

GEONEX INGENIERIE

AQUA SYSTEM

**Commune de BOURGS SUR
COLAGNE (48)
Complexe multifonction**

Test de Réponse Thermique

Rapport



GEONEX INGENIERIE
SAS au capital de 10 000 €
RCS GRENOBLE 819 306 853
SIRET 819 306 853 00014
29 Boulevard des Alpes
38240 Meylan

Émetteur	Destinataires
Bruno SEGUIN +33 0(6) 75 73 98 56	Mr. Pierre DELMAS AQUA SYSTEM Rue du Senecon Parc d'activité de Lioujas 12740 LA LOUBIERE Mme Pauline ALBARET IN.S.E. 132 rue Marc Robert 12850 ONET-LE-CHÂTEAU

Projet : BOURGS SUR COLAGNE (48)	Document N° : TRT220705	Date : 15/07/2022
Client : AQUA SYSTEM		Page : 2 / 16



Table des matières

1 Avant propos.....	4
2 Symboles.....	4
3 Test de réponse thermique.....	5
3.1 Géologie du site.....	5
3.2 Echangeur géothermique.....	5
3.3 Principe du test de réponse thermique.....	6
3.4 Module de test.....	7
3.5 Paramètres de test.....	8
4 Résultats des mesures.....	9
4.1 Température initiale moyenne du sous-sol (T_0).....	9
4.2 Conductivité moyenne du sous-sol (λ).....	10
4.3 Chaleur spécifique moyenne du sous-sol (C_p).....	13
4.4 Résistance équivalente de la sonde (R_b).....	13
4.5 Résumé des résultats.....	14
5 Analyse des résultats du TRT.....	14
6 Références.....	15
7 Annexe : Table des valeurs usuelles.....	16



1 Avant propos

Ce document fait la synthèse des résultats du Test de Réponse Thermique qui a été effectué à CHIRAC (commune de BOURGS SUR COLAGNE) (48).

Le test de réponse thermique constitue l'étape préalable indispensable pour dimensionner un système géothermique mettant en œuvre un ensemble de pieux échangeurs ou de sondes géothermiques verticales. Le test est réalisé à l'aide d'une ou plusieurs sondes géothermiques pilote. Ce test permet :

- ✓ de caractériser les propriétés thermiques du sous-sol sur le site, en vue de l'installation d'un système géothermique,
- ✓ de prévoir, au vu de la géologie locale, la technique de forage la plus appropriée pour la réalisation du projet dans son ensemble.

2 Symboles

Définitions et symboles utilisés dans le document :

PEHD :	PolyEthylène Haute Densité
SGV :	Sonde Géothermique Verticale
TRT :	Test de Réponse Thermique
Cp :	Chaleur spécifique volumique moyenne du terrain (J/m ³ .K)
Cpf :	Chaleur spécifique volumique du fluide (J/m ³ .K)
H :	Profondeur active de la sonde (m)
k :	Pente de la courbe de tendance logarithmique
P :	Puissance thermique totale transférée au terrain durant le test (W)
p :	Puissance thermique transférée au terrain par mètre de sonde (W/m)
Q :	Débit volumique de fluide caloporteur (m ³ /h)
Rb :	Résistance équivalente de la sonde géothermique (m.K/W)
t :	Temps compté à partir du démarrage du test (h)
To :	Température initiale moyenne du terrain (°C)
Tentrée :	Température du fluide à l'entrée de la sonde (°C)
Tmoy :	Température moyenne du fluide dans la sonde = (Tentrée + Tsortie)/2
Tsortie :	Température du fluide en sortie de la sonde (°C)
ΔT :	Ecart de température entrée/sortie de la sonde = (Tentrée - Tsortie)
λ :	Conductivité thermique moyenne du terrain (W/m.K)

Projet : BOURGS SUR COLAGNE (48)	Document N° : TRT220705	Date : 15/07/2022
Client : AQUA SYSTEM		Page : 4 / 16



3 Test de réponse thermique

3.1 Géologie du site

La géologie relevée pendant l'opération de forage fait apparaître essentiellement du grès jusqu'à -20m, puis des schistes jusqu'à -140m. Ci-après le relevé géologique d'après [3].

Profondeur (m)		Nature du sous-sol		
de	0.00m	à	4.50m	Terrain de surface
de	4.50m	à	20.00m	Grès rouge
de	20.00m	à	140.00m	Schiste

Tab.1. Relevé géologique du site.

3.2 Echangeur géothermique

Les principales caractéristiques de la sonde de test sont indiquées dans le tableau 2.

Tab.2. ECHANGEUR GEOTHERMIQUE DE TEST	
Diamètre du forage :	127mm
Profondeur active H de la sonde :	140 m
Echangeur géothermique	PEHD Double-U, DN32
Matériau de cimentation	Coulis géothermique PROMACEM



3.3 Principe du test de réponse thermique

Le test de réponse thermique consiste à appliquer au sous-sol un stress thermique, par l'intermédiaire de la sonde géothermique pilote, celle-ci servant d'échangeur entre un fluide (eau) et le terrain : le fluide, en circulation dans la sonde, délivre au sous-sol une énergie calorifique fournie par un réchauffeur électrique situé dans le module de test.

Le sous-sol, en absorbant cette énergie, se réchauffe progressivement tout au long du test. En fonction de la valeur de la conductivité thermique λ du terrain, l'élévation de température du sous-sol en contact avec la sonde géothermique est plus ou moins importante, selon que le phénomène de diffusion thermique dans le sol est lent (faible conductivité) ou au contraire rapide (conductivité élevée). L'analyse de la courbe représentant la variation de la température du fluide circulant dans la sonde pendant le test, permet alors d'évaluer la valeur de la conductivité thermique moyenne du sous-sol.

La méthodologie du test est la suivante :

Phase préalable : Mesure de la température initiale du terrain T_0

Durant cette phase préalable, le fluide est mis en circulation dans la sonde tout en maintenant le réchauffeur à l'arrêt. Après un laps de temps d'environ 1/2h, le fluide se stabilise à la température du terrain T_0 , qui est ainsi mesurée.

Phase de test

Mesure : Le fluide circule dans la sonde avec un débit qui est maintenu constant. Le réchauffeur électrique est enclenché, et la puissance thermique injectée dans le sol au travers de la sonde est également maintenue constante. la durée de cette phase de test est de 48 à 72h.

On mesure alors le débit Q dans la sonde, ainsi que les deux températures du fluide en entrée et en sortie de la sonde géothermique, respectivement notées **$T_{entrée}$** et **T_{sortie}** .

Analyse : Les courbes de température relevées sont analysées par la méthode de la source linéaire de chaleur ^[2], qui permet de déterminer la conductivité moyenne du sous-sol sur la profondeur de la sonde, notée λ , ainsi que la résistance équivalente de la sonde, notée **R_b** .

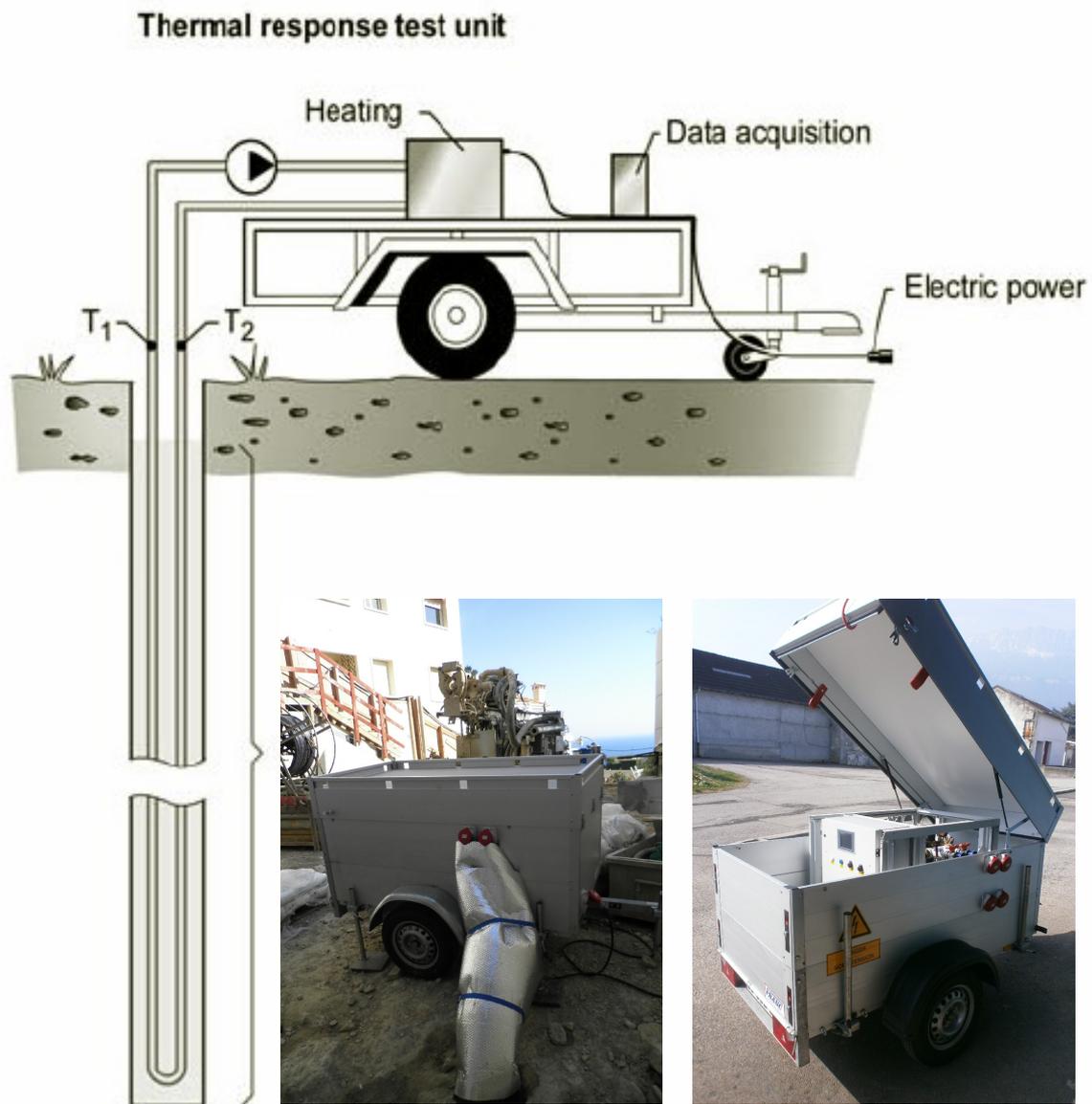
La chaleur spécifique moyenne du sous-sol, notée **C_p** , est quant à elle évaluée avec suffisamment de précision à partir de tables ^[1], et du relevé géologique du site.

Projet : BOURGS SUR COLAGNE (48)	Document N° : TRT220705	Date : 15/07/2022
Client : AQUA SYSTEM		Page : 6 / 16



3.4 Module de test

Le module de test est composé d'un circuit hydraulique raccordé à la sonde géothermique, et d'un dispositif permettant la régulation automatique de la puissance injectée dans la sonde. Le dispositif effectue l'acquisition des mesures (débit, température en entrée et en sortie de la sonde géothermique) toutes les minutes, et l'archivage des données.



Appareil mobile de test.

Projet : BOURGS SUR COLAGNE (48)	Document N° : TRT220705	Date : 15/07/2022
Client : AQUA SYSTEM		Page : 7 / 16



Le test de réponse thermique a été effectué sur une durée de 92h, entre le 20 et le 24 juin 2022.



Test de Réponse Thermique réalisé à CHIRAC.

3.5 Paramètres de test

Le procédé de test de réponse thermique impose que la puissance thermique **P** injectée dans le sous-sol soit constante pendant toute la durée du test.

Le tableau ci-dessous présente les paramètres qui ont été choisis pour le test.

Tab.3. PARAMETRES DE TEST	
Durée du test :	92 h
Fluide :	Eau
Chaleur spécifique du fluide C_{pf} :	4.18 MJ/m ³ .K
Débit Q :	1.35 m ³ /h
Ecart de température entrée/sortie ΔT :	4.46 °C
Puissance thermique P :	7 000 W
Puissance thermique par mètre p (1) :	50.00 W/m

Note (1) : La puissance thermique par mètre **p** est définie comme la puissance thermique totale **P** injectée dans le sous-sol durant le test, divisée par la longueur active **H** de la sonde indiquée dans le Tab.2 (**p = P/H**).



4 Résultats des mesures

4.1 Température initiale moyenne du sous-sol (T_0)

Sur la profondeur de la sonde test, nous pouvons considérer que la température moyenne du sous-sol est indépendante des variations de la température extérieure.

En effet, les variations journalières de la température induisent des variations de température qui ne sont plus significatives au-delà de 1 mètre de profondeur. Ce sont les variations de température saisonnières qui se répercutent le plus profondément, mais leur effet est limité aux premiers 10 à 20 m. La figure ci-dessous permet d'illustrer l'influence de la surface sur le profil vertical de température au cours d'une année. L'exemple est calculé en considérant une variation sinusoïdale de la température en surface comprise entre 0 et 20°C.

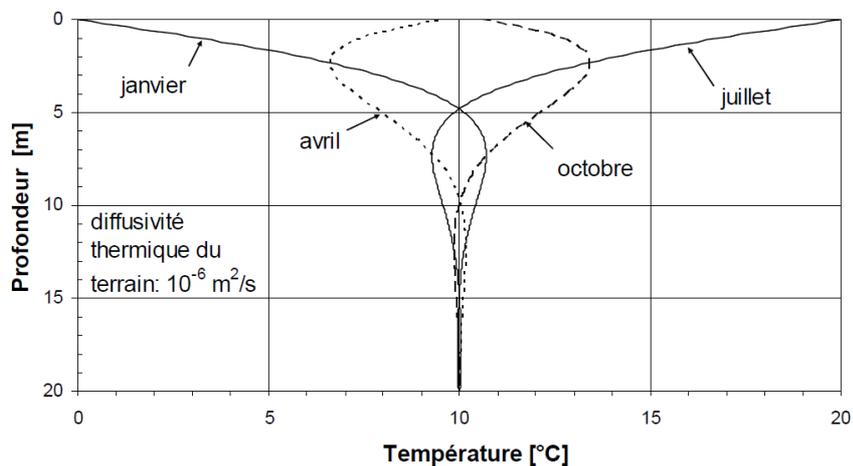


Fig.1. Profil de température du sous-sol en fonction de la saison.

La température du sous-sol résulte d'un équilibre entre le flux géothermique provenant du centre de la terre et l'échange convectif à sa surface. La température moyenne du sous-sol est donc liée à la température ambiante moyenne annuelle du lieu.

Nous avons pu constater, par différents tests de réponses thermiques effectués dans différentes zones géographiques en France, que la température moyenne du sous-sol sur une profondeur de 150m est supérieure d'environ 2 à 4°C à la température ambiante moyenne annuelle du lieu. Les températures moyennes de sous-sol que nous avons pu mesurer sur le territoire français, en plaine, s'échelonnent de 10°C au nord à plus de 18°C au sud.

La température initiale du terrain a été relevée à 13.8°C, valeur très correcte et cohérente avec la situation géographique du site, puisqu'elle est supérieure de 3.7°C à la température ambiante moyenne annuelle de 10.1°C relevée sur la région de MENDE.

Projet : BOURGS SUR COLAGNE (48)	Document N° : TRT220705	Date : 15/07/2022
Client : AQUA SYSTEM		Page : 9 / 16



Tab.4. TEMPERATURE INITIALE DU SOUS-SOL T_0

Température initiale mesurée T_0 :	13.80°C
--------------------------------------	---------

4.2 Conductivité moyenne du sous-sol (λ)

Relevé des températures d'entrée/sortie de la sonde pilote

La figure 2 ci-dessous présente l'évolution des températures en entrée et en sortie de la sonde durant le test, ainsi que la température moyenne du fluide **Tmoy**, définie comme la demi-somme (**Tentrée+Tsortie**)/2.

Le zéro de l'échelle des temps correspond au démarrage de la phase de test, c'est-à-dire à l'enclenchement du réchauffeur.

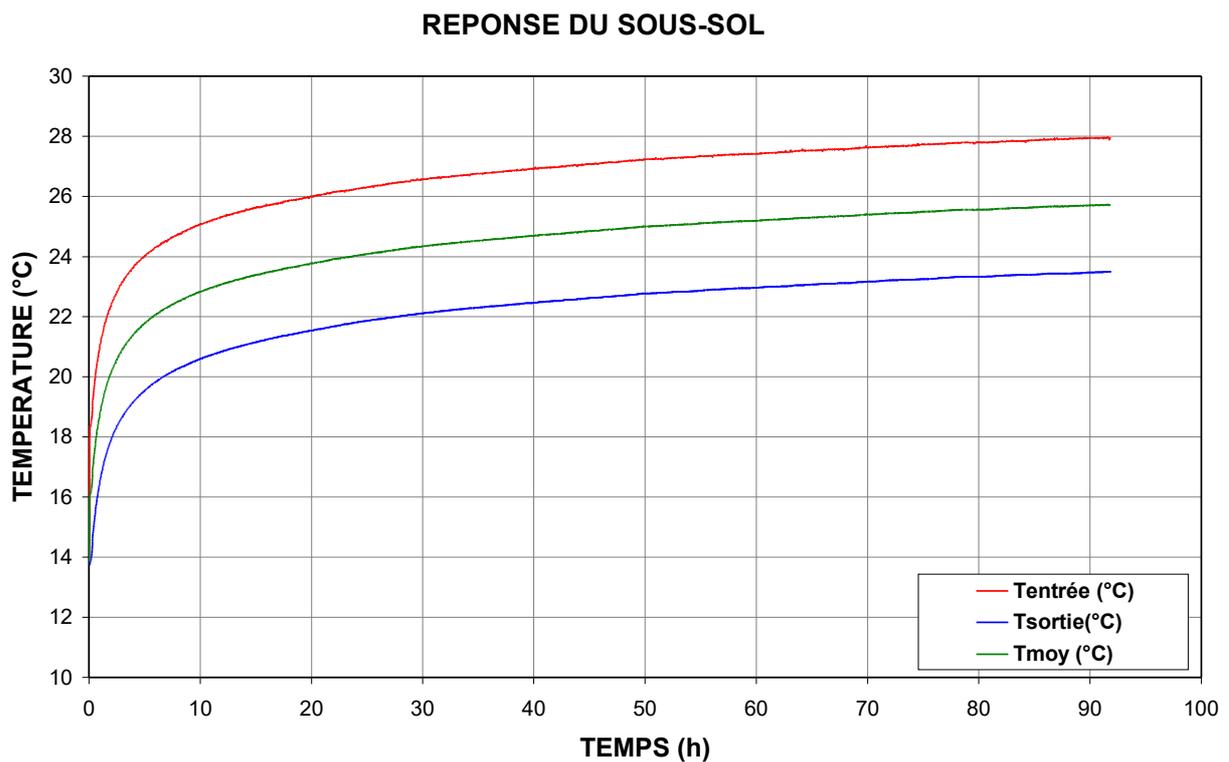


Fig.2. Evolution des températures du fluide durant le test.



Tracé de la température moyenne T_{moy}

La courbe représentant la température moyenne du fluide dans la sonde **T_{moy}**, est tracée sur la figure 3 ci-dessous avec une échelle logarithmique des temps. Selon la théorie de la source linéaire de chaleur, cette courbe doit suivre une droite une fois atteint le régime stationnaire. On considère dans la pratique que ce régime stationnaire est atteint après environ 10h de test.

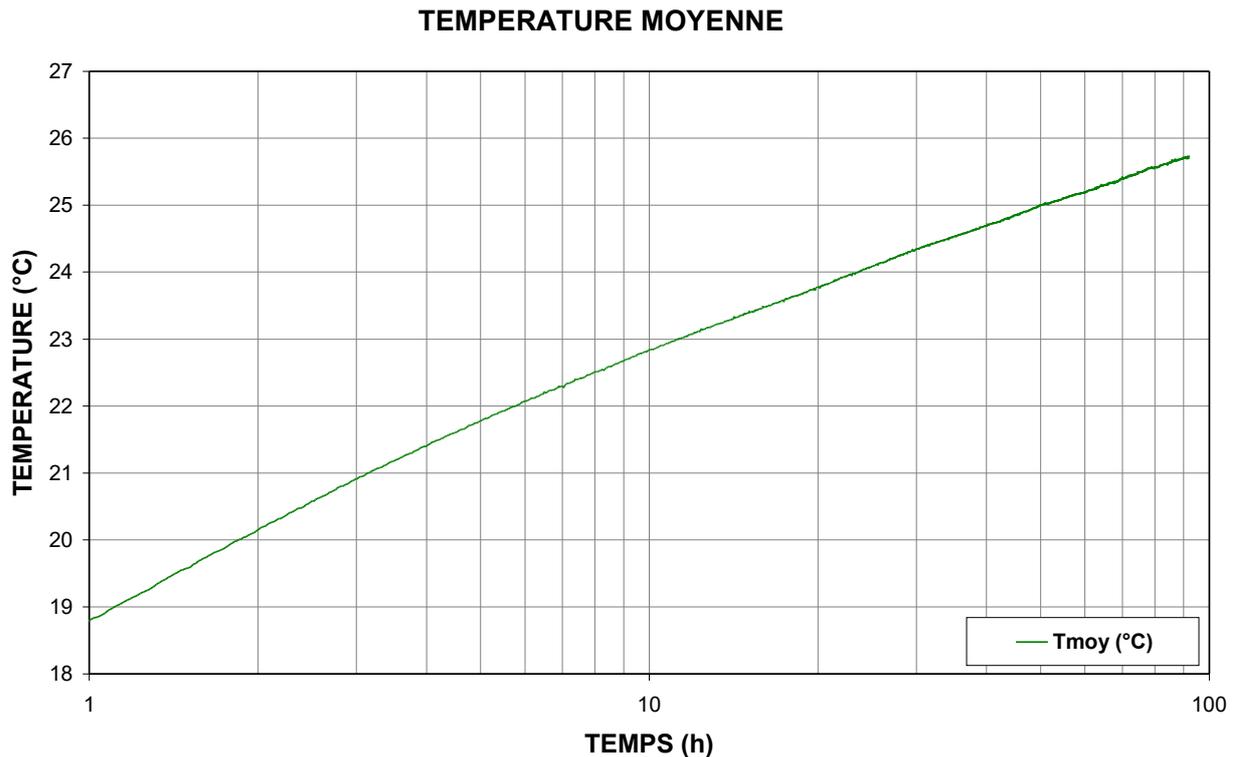


Fig.3. Température moyenne, en échelle logarithmique du temps.

Courbe de tendance

L'échange thermique est essentiellement radial le long de la sonde. Selon la théorie de la source linéaire de chaleur ^[2], l'évolution de la température moyenne du fluide doit suivre une loi logarithmique du type : **$Y(t) = k \ln(t) + C$**

La figure 4 ci-dessous présente, après 10h de test, la courbe de tendance logarithmique approximant le mieux la courbe de température moyenne.

Projet : BOURGS SUR COLAGNE (48)	Document N° : TRT220705	Date : 15/07/2022
Client : AQUA SYSTEM		Page : 11 / 16

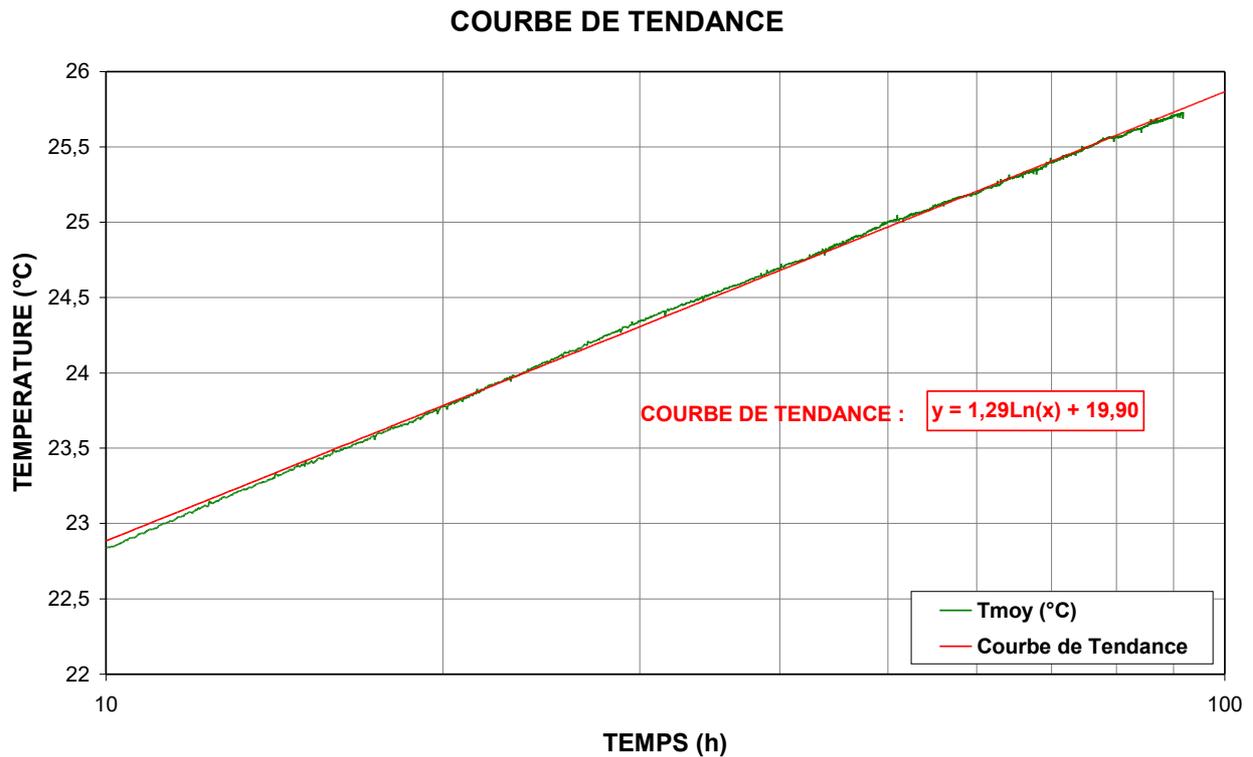


Fig.4. Courbe de tendance logarithmique approximant Tmoy.

La courbe de tendance ainsi obtenue est indiquée dans le tableau 5 ci-dessous :

Tab.5. COURBE DE TENDANCE LOGARITHMIQUE	
Courbe de tendance $Y(t) = k.\ln(t) + C$	$Y(t) = 1.29 \ln(t) + 19.90$

Calcul de la conductivité λ

La conductivité thermique moyenne du terrain λ est évaluée à partir de la puissance thermique p injectée par mètre linéaire de sonde (indiquée au Tab.3.) et de la pente k de la courbe de tendance logarithmique (indiquée au Tab.5). Le principe du calcul est détaillé dans la référence [2] : $\lambda = p / (4\pi k)$

La valeur de la conductivité obtenue après calcul est indiquée dans le tableau 6 ci-dessous.

Tab.6. CONDUCTIVITE THERMIQUE DU SOUS-SOL λ	
Conductivité λ :	3.08 W/m.K



4.3 Chaleur spécifique moyenne du sous-sol (Cp)

La chaleur spécifique du sous-sol est quant à elle évaluée à partir de tables [1] et du relevé géologique effectué sur le site pendant l'opération de forage.

L'évaluation de la chaleur spécifique du sous-sol par calcul de la moyenne pondérée des chaleurs spécifiques des formations géologiques observées sur le site, est indiquée dans le tableau 7 ci-dessous.

Tab.7. CHALEUR SPECIFIQUE DU SOUS-SOL Cp CALCULEE6

Formation géologique	Hauteur totale	Chaleur spécifique moyenne d'après [1]
Grès	20.0m	2.20 MJ/m ³ .K
Schiste	120.0m	2.20 MJ/m ³ .K
Moyenne pondérée Cp :	140.0m	2.20 MJ/m ³ .K

4.4 Résistance équivalente de la sonde (Rb)

La résistance équivalente de la sonde **Rb** est un paramètre caractérisant la qualité d'échangeur thermique de la sonde (tuyaux + cimentation). Elle est évaluée à partir de la constante **C** de la courbe de tendance logarithmique. Le principe du calcul est détaillé dans la référence [2]. La valeur de la résistance équivalente de la sonde obtenue après calcul est indiquée dans le tableau 8 ci-dessous.

Tab.8. RESISTANCE EQUIVALENTE DE LA SONDE Rb

Résistance Rb :	0.096 m.K/W
------------------------	-------------

Cette valeur de résistance équivalente Rb correspond aux valeurs typiquement mesurées sur des sondes cimentées avec un coulis géothermique à conductivité élevée, généralement comprises entre 0.060 et 0.120 m.K/W.



4.5 Résumé des résultats

Les paramètres mesurés par le test de réponse thermique sont résumés dans le tableau 9 ci-dessous, qui indique également l'incertitude globale sur les mesures, due aux diverses incertitudes de la chaîne de mesure : capteurs, cartes d'acquisition,...

Tab.9. RESULTATS DU TEST DE REPONSE THERMIQUE

PARAMETRE	RESULTAT	INCERTITUDE
Température initiale du sous-sol T₀ :	13.80 °C	±0.10 °C
Conductivité du sous-sol λ :	3.08 W/m.K	±0.05 W/m.K
Chaleur spécifique du sous-sol C_p :	2.20 MJ/m ³ .K	±0.20 MJ/m ³ .K
Résistance de la sonde R_b :	0.096 m.K/W	±0.01 m.K/W

5 Analyse des résultats du TRT

La conductivité thermique **λ** du sous-sol caractérise la capacité du terrain à échanger de la chaleur avec la sonde géothermique et à diffuser la chaleur. On considère que l'emploi de la géothermie sur sondes verticales est possible à partir d'une conductivité de 1.5 W/mK et favorable à partir d'une valeur de conductivité de 2 W/mK. Des valeurs supérieures à 3 W/mK sont excellentes pour la géothermie sur sondes.

La conductivité du sous-sol mesurée sur site (**3.08W/mK**) est très favorable pour l'installation d'un champ de sondes géothermiques. Cette valeur est assez cohérente si on la compare aux valeurs de conductivité rencontrées dans la littérature pour les différentes formations géologiques observées sur le site ^[1] : les schistes présentent une conductivité comprise entre 1.5 et 3.1 W/m.K, les grès présentent quand à eux une conductivité comprise entre 1.3 et 5.1 W/m.K.

La température initiale **T₀** du sous-sol conditionne quant à elle directement le niveau de température du fluide circulant dans les sondes géothermiques.

Les températures moyennes de sous-sol que nous avons pu mesurer sur le territoire français, en plaine, s'échelonnent de 10°C au nord à plus de 18°C au sud.

La température initiale du sous-sol qui a été mesurée (**13.8°C**) est très correcte, et cohérente avec la situation géographique du site, puisqu'elle est supérieure de 3.7°C à la température ambiante moyenne annuelle relevée sur MENDE, qui est d'environ 10.1°C.

En conclusion, le sous-sol sur le site de CHIRAC présente une excellente conductivité thermique et une température moyenne initiale très correcte et cohérente avec la situation géographique du lieu. Le site de CHIRAC peut être considéré comme très favorable pour l'utilisation de la géothermie sur sondes verticales.



6 Références

- [1] VDI 4640 Engineering Guideline : Thermal use of the underground. Part1 : Fundamentals, approvals, environmental aspects. VDI Guideline, Allemagne, 2000.
- [2] S. Gehlin. "Thermal Response Test", Doctoral Thesis, 2002, Department of Environmental Engineering, Luleå University of Technology, Luleå, Suède.
- [3] "Dossier technique - Forage de reconnaissance - Commune de BOURGS SUR COLAGNE - 48100 CHIRAC", AQUA SYSTEM.

Projet : BOURGS SUR COLAGNE (48)	Document N° : TRT220705	Date : 15/07/2022
Client : AQUA SYSTEM		Page : 15 / 16



7 Annexe : Table des valeurs usuelles

Les valeurs usuelles de conductivité thermique et de capacité thermique (ou chaleur spécifique) des roches les plus courantes sont indiquées dans la table suivante (d'après [1]).

Type de roche – <i>rock type</i>	Conductibilité thermique – <i>Thermal conductivity</i> λ (W/mK)			Capacité thermique volumétrique – <i>Volumetric thermal</i> <i>capacity</i> ρC (MJ/m ³ K)
	min	valeur typique	max	
Roches magmatiques – <i>Magmatic rocks</i>				
Basalte – <i>basalt</i>	1.3	1.7	2.3	2.3 – 2.6
Diorite – <i>diorite</i>	2.0	2.6	2.9	2.9
Gabbro – <i>gabbro</i>	1.7	1.9	2.5	2.6
Granit – <i>granite</i>	2.1	3.4	4.1	2.1 – 3.0
Péridotite – <i>peridotite</i>	3.8	4.0	5.3	2.7
Rhyolithe – <i>rhyolite</i>	3.1	3.3	3.4	2.1
Roche métamorphiques – <i>Metamorphous rocks</i>				
Gneiss – <i>gneiss</i>	1.9	2.9	4.0	1.8 – 2.4
Marbre – <i>marble</i>	1.3	2.1	3.1	2.0
Métaquartzite – <i>metaquartzite</i>		env. 5.8		2.1
Micaschistes – <i>micaschists</i>	1.5	2.0	3.1	2.2
Schistes argilleux – <i>argillaceous schists</i>	1.5	2.1	2.1	2.2 – 2.5
Roches sédimentaires – <i>Sedimentary rocks</i>				
Calcaire – <i>limestone</i>	2.5	2.8	4.0	2.1 – 2.4
Marne – <i>marl</i>	1.5	2.1	3.5	2.2 – 2.3
Quartzite – <i>quartzite</i>	3.6	6.0	6.6	2.1 – 2.2
Sel – <i>salt</i>	5.3	5.4	6.4	1.2
Grès – <i>sandstone</i>	1.3	2.3	5.1	1.6 – 2.8
Roches argilleuses, limoneuses – <i>claystone/siltstone</i>	1.1	2.2	3.5	2.1 – 2.4
Roches non consolidées – <i>Unconsolidated rocks</i>				
Gravier, sec – <i>gravel, dry</i>	0.4	0.4	0.5	1.4 – 1.6
Gravier, saturé d'eau – <i>gravel, watersaturated</i>		env. 1.8		env. 2.4
Moraine – <i>moraine</i>	1.0	2.0	2.5	1.5 – 2.5
Sable, sec – <i>sand, dry</i>	0.3	0.4	0.8	1.3 – 1.6
Sable, saturé d'eau – <i>sand, watersaturated</i>	1.7	2.4	5.0	2.2 – 2.9
Argile/limon, sec – <i>clay/silt, dry</i>	0.4	0.5	1.0	1.5 – 1.6
Argile/limon, saturé d'eau – <i>clay/silt, watersaturated</i>	0.9	1.7	2.3	1.6 – 3.4
Tourbe – <i>peat</i>	0.2	0.4	0.7	0.5 – 3.8
Autres substances – <i>Other substances</i>				
Bentonite – <i>bentonite</i>	0.5	0.6	0.8	env. 3.9
Béton – <i>concrete</i>	0.9	1.6	2.0	env. 1.8
Glace (-10°C) – <i>ice (-10°C)</i>		2.32		1.87
Plastique (PE) – <i>plastic (PE)</i>		0.39		-
Air (0-20°C, sec) – <i>air (0-20°C, dry)</i>		0.02		0.0012
Acier – <i>steel</i>		60		3.12
Eau (+10 °C) – <i>water (+10 °C)</i>		0.58		4.19

Valeurs usuelles de conductivité et chaleur spécifique des formations géologiques

Projet : BOURGS SUR COLAGNE (48)	Document N° : TRT220705	Date : 15/07/2022
Client : AQUA SYSTEM		Page : 16 / 16