

Réhabilitation d'un bâtiment patrimonial en bureaux

Bâtiment 8 - Caserne d'ESPAGNE - 32000 Auch

MAITRISE D'OUVRAGE

SARL Immobilière de Juillan

Place Jean David - 32000 Auch
Tél. 05 62 61 62 66 - courriel : l.lacourt@gers.cci.fr

BUREAU DE CONTRÔLE

SOCOTEC

Gregory Loubet
13, Ter Place du Maréchal Lannes
32000 AUCH
Tél: +33 (0)5 62 63 47 20 - +33 (0)6 26 34 52 77
gregory.loubet@socotec.com



COORDINATEUR SPS

SOCOTEC

Elhuyar Marc
72 rue du Maréchal Foch
65000 Tarbes
0623806599
marc.elhuyar@socotec.com



MAITRISE D'OEUVRE



ATELIER D'ARCHITECTURE AIROLDI

6 rue Eugène Sue 32000 AUCH
Tél. 05 62 61 83 53
courriel : atelier@ab-architectes.com
site web : www.ab-architectes.com



BET STRUCTURE STRUKTURA

37 Rue du Moulin
32810 CASTIN
struktura.be@gmail.com
0766211712



BET CVS / ELEC. / THERMIQUE - SETES

14 Avenue des Tilleuls - Quartier de l'Arsenal
65000 TARBES
Tél. 05 62 34 25 54
cl.setes@setes.fr



ECONOMISTE - DAVID SIST

14 rue Marc Chagall 32000 AUCH
Tél. 05 62 05 53 62 Fax. 05 62 05 64 25
courriel : d.sist@dsist.fr



BET ENVIRONNEMENT - SOLER IDE

4 Rue Jules Vedrines,
31031 Toulouse
Tél : +33 (0)6 15 35 09 70
csentes@soler-ide.fr



BET ACOUSTIQUE - EMACOUSTIC

6 rue des tonneliers
31700 BLAGNAC
06 28 04 59 15
f.garry@emacoustic.fr

ECHELLE(S) :

TEST REPONSE THERMIQUE SONDES

01/10/2024

Indice :	Modif :	Date :

23-1396

PIECES ECRITES

20

Bio Energies Diffusion

Rapport d'essai de réponse thermique de la sonde géothermique située sur le site de l'ancienne caserne, à Auch

Client : ARAC Occitanie

Test réalisé du 10 septembre au 14 septembre 2020

Contacts :

Adèle Dufailly
Chargée d'affaires
dufaily@bioenergies31.com
06 78 47 57 84



Bruno Lazard
Gérant
lazard@bioenergies31.com
06 17 96 14 97

Table des matières

1. Présentation de la société Bio-énergies diffusion	2
2. Principe et mise en œuvre du test de réponse thermique	3
2.1. Principe de mesure.....	3
2.2. Banc de test.....	3
2.3. Définition des paramètres mesurés et calculés :	3
2.4. Description du forage.....	4
2.5. Test de réponse thermique	5
3. Déroulement du test de réponse thermique	6
3.1. Illustrations de la mise en place de l'essai	6
3.2. Analyse des données de la phase 1 : mesure de la température initiale du sol	8
3.3. Analyse des données de la phase 2 : mesure de la réponse thermique et de la conductivité	9
3.3.1. Enregistrement des températures et du débit.....	9
3.3.2. Puissance injectée dans le forage.....	10
3.3.3. Calcul de la conductivité thermique.....	11
3.3.4. Calcul de la résistance thermique de la sonde	12
4. Synthèse et conclusion	14

1. Présentation de la société Bio-énergies diffusion

« Bio-énergies diffusion » est une société spécialisée dans le dimensionnement et l'installation de systèmes à énergies renouvelables et plus particulièrement tout ce qui concerne la géothermie sur forage vertical. Une présentation des activités de la société est consultable sur le site : www.bioenergies31.com

« Bio-énergies diffusion » est la première société française à avoir obtenu la certification Qualibat 831-3 (géothermie – technicité supérieure) qui s'appelle depuis 2019 « Qualibat 5232 -RGE ».

La société a également développé une technique de test de sonde géothermique de grande précision.

Contact et responsable de l'essai :

Adèle Dufailly

Tél : 06 78 47 57 84

Mail : dufaily@bioenergies31.com

2. Principe et mise en œuvre du test de réponse thermique

L'objet du test de réponse thermique est d'optimiser le nombre de sondes et surtout d'éviter tout risque de sous-dimensionnement qui pourrait se produire en cas de terrain de mauvaise qualité. Cet essai concerne une future installation de pompes à chaleurs sur forages située sur le site de l'ancienne caserne à Auch dans le Gers.

2.1. Principe de mesure

Le test de réponse thermique est basé sur une injection dans le terrain d'une puissance thermique afin d'en déduire les performances du forage en exploitant les courbes de l'évolution de la température du sol.

2.2. Banc de test

Le matériel de test est constitué de :

- D'un système chauffant électrique de 1 à 9 kW (utilisable en mono ou triphasé) composé de 6 résistances différentes.
- **2 sondes de température PT100 1/10 DIN** 4 fils avec connecteur mémorisant les données de calibration. La résolution de ces sondes est de 0,01°C, la précision absolue est meilleure que 0,03[°C]+0,0005*T. Les essais de calibration des sondes ont permis de garantir une **précision relative entre les 2 sondes meilleure que 0,015°C** sur 60 heures d'essais de calibration à des températures allant de 0°C à 35°C. Les mesures de température génèrent une erreur sur la mesure de puissance prélevée inférieure 0,3%, ce qui est négligeable.
- Une sonde de température ambiante extérieure à titre indicatif.
- Un compteur d'énergie relevant des impulsions volumiques pour donner un débit de grande précision.
- Une centrale d'acquisition de haute précision réglée pour une acquisition toutes les 60 sec durant toute la durée des essais.
- Toute l'hydraulique nécessaire à la mise en œuvre de l'essai.
- Un ordinateur portable pour la sauvegarde en temps réel et l'exploitation des données.

Les 2 sondes de température PT100 sont implantées au plus proche de la tête de forage afin de ne pas être perturbées par les éventuelles pertes ou éventuels apports thermiques entre le forage et les mesures précises de températures.

2.3. Définition des paramètres mesurés et calculés :

T_0 = Température du sol avant essai [°C]

T_r = Température de retour du forage [°C]

T_d = Température de départ vers le forage [°C]

T_f = Température du forage [°C] = $\frac{T_r + T_d}{2}$

$DT = T_r - T_d$

D = débit primaire dans le forage [m³.h⁻¹]

$P(t)$ = puissance prélevée dans le forage en fonction du temps [W]

$Q(t)$ = flux thermique prélevé dans le forage par mètre de forage [$W.m^{-1}$]

Q_{ref} = flux thermique de référence égal à 65 [$W.m^{-1}$]

$\tau(t)$ = constante de temps [-]

λ = conductivité thermique du forage [$W.m^{-1}.K^{-1}$]

C = conductance thermique du forage [$W.m^{-1}.K^{-1}$]

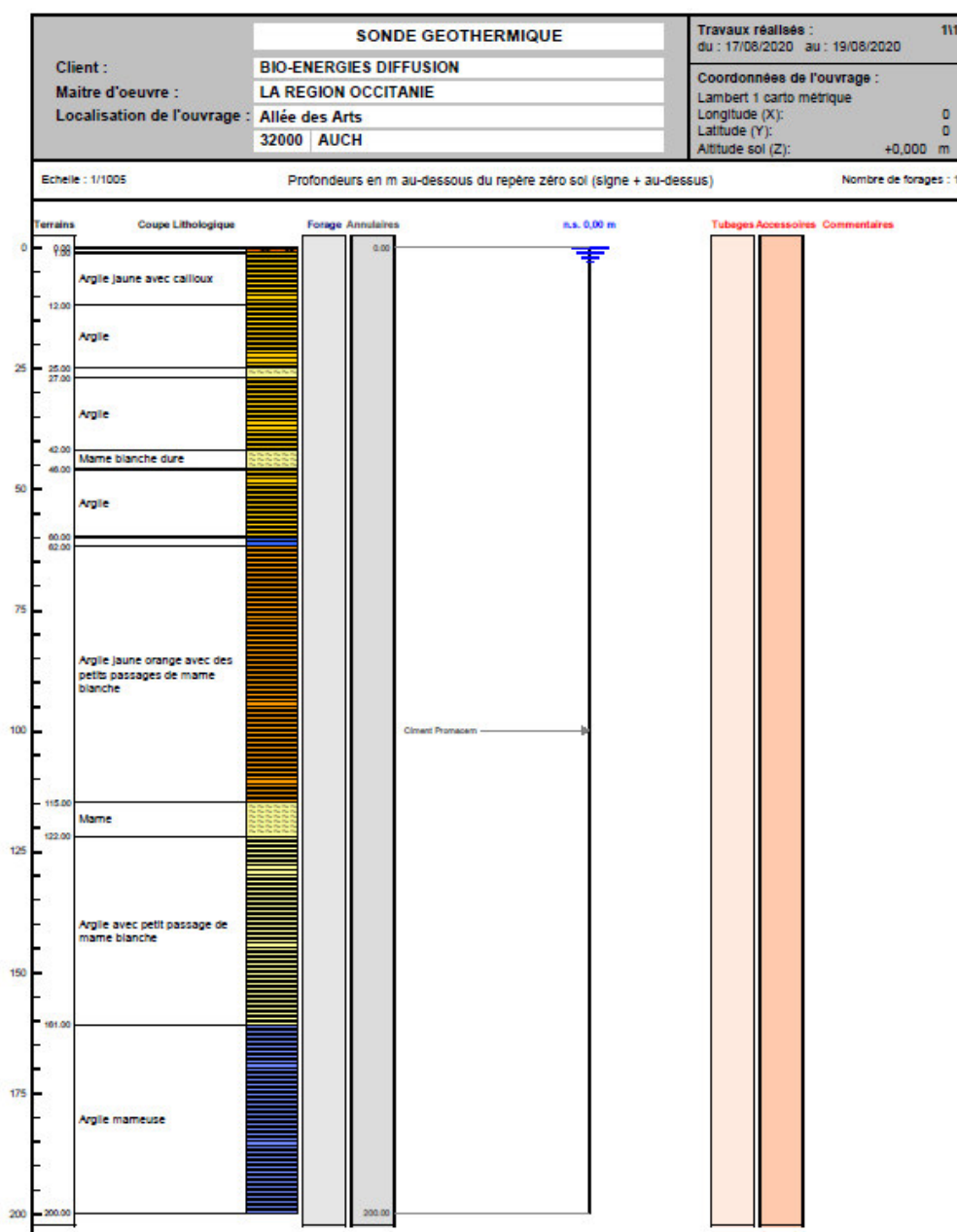
R_s = Résistance thermique de la sonde [$m.K.W^{-1}$]

R_t = Résistance thermique du terrain [$m.K.W^{-1}$]

2.4. Description du forage

Le forage a été réalisé par la société « GEOFORAGE ». La profondeur utile du forage est de 200 m.

Ci-après se trouve la coupe lithologique de la localisation de l'ouvrage.



La chaleur spécifique du sous-sol est obtenue par calcul de la moyenne pondérée des chaleurs spécifiques des formations géologiques observées sur le site. Dans le cas du forage test d'Auch on obtient : $C_p = 2,48 \text{ MJ.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$

Le diamètre du forage est de 170 mm (diamètre du tube de 165 mm), soit 8,5 cm de rayon moyen pour les calculs de résistance thermique.

Les sondes sont en PEHD 40x3,7. Il y a deux tuyaux allers et deux tuyaux retour dans le forage.

Le remplissage est effectué avec du ciment bentonite de marque Promacem avec une conductivité thermique $\lambda \geq 2,35 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$

Les opérations de forage se sont déroulées en août 2020 et se décomposent en plusieurs étapes :

- Mise en place du matériel (foreuse, manitou, fournitures, etc.).
- Réalisation du forage
- Nettoyage du forage
- Descente de la sonde composée de 4 tuyaux PEHD 40 (double U) et d'un tuyau d'injection.
- Retrait du tubage.
- Cimentation de l'ouvrage en injectant un coulis de ciment bentonite par le tuyau d'injection.
- Essais de pression et de circulation d'eau.

Une fois le forage terminé, il est laissé au repos durant minimum 1 semaine afin de laisser la bentonite durcir et la température du forage revenir à sa température naturelle.

Les coordonnées GPS du forage sont les suivantes :

N 43.65142

E 0.59220

2.5. Test de réponse thermique

Après la phase de calibration, le système chauffant électrique a été enclenché, 6 résistances ont été allumées pour une puissance injectée d'environ 9 kW.

Lors de cette phase, on mesure et on enregistre T_r , T_d et le débit avec une périodicité de 60 sec. Les résistances injectant 9 kW dans le sol, la température du forage et du sol va augmenter selon une loi logarithmique dont la forme permet d'identifier la conductivité thermique du sol puis la résistance thermique de la sonde.

3. Déroulement du test de réponse thermique

Les essais ont démarré le 10 septembre 2020, soit un mois environ après la réalisation du forage. Par conséquent, la bentonite est parfaitement sèche et la température du sol est au repos. Le test de réponse thermique a duré 4 jours.

10 septembre 2020	9h30	Arrivée sur le site – mise en place des raccordements
	10h51	Début de l'essai phase 1
	11h28	Fin de la phase 1 (calibration)
10 septembre 2020	11h29	Mise en route des résistances (phase 2)
14 septembre 2020	11h04	Arrêt des résistances
	11h25	Départ du site

3.1. Illustrations de la mise en place de l'essai

Illustration 1 : Banc de test installé avec raccordements faits et protection en place

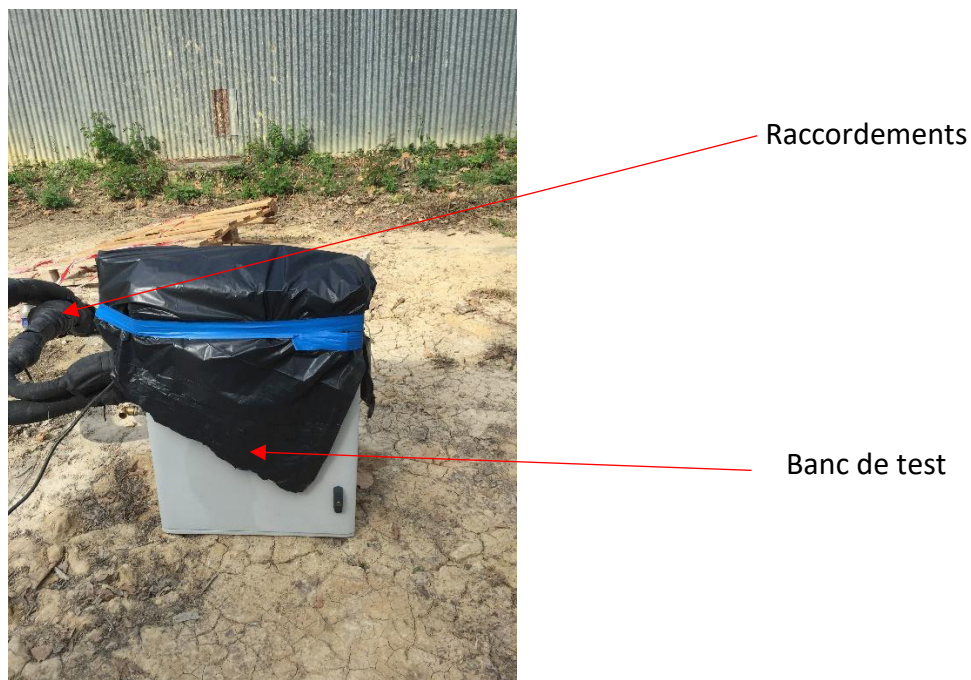


Illustration 2 : Zoom sur la tête de forage

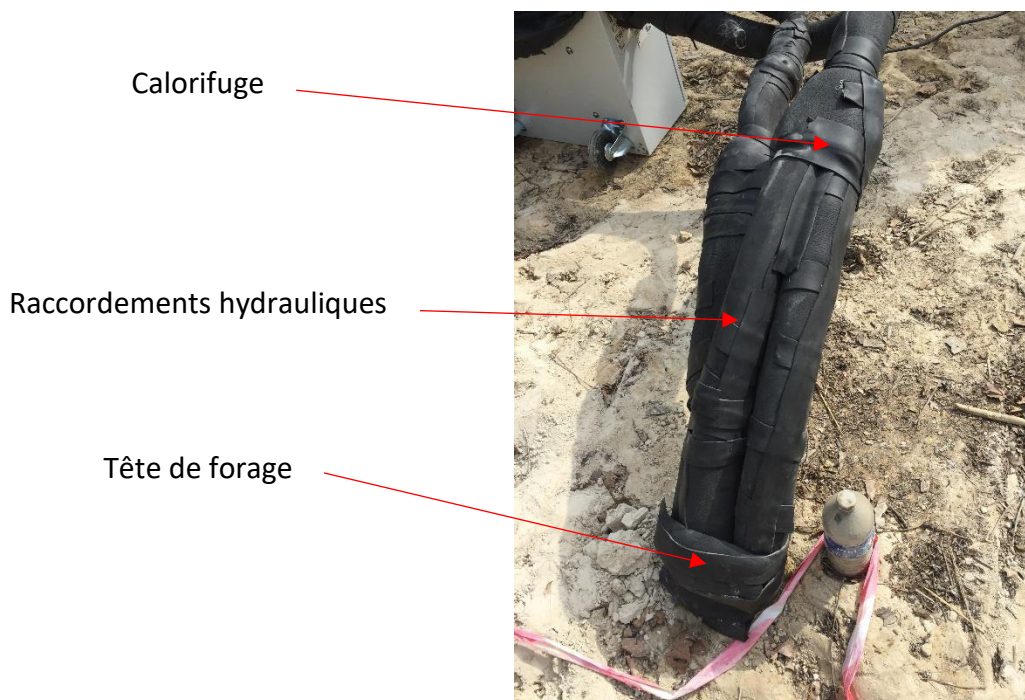


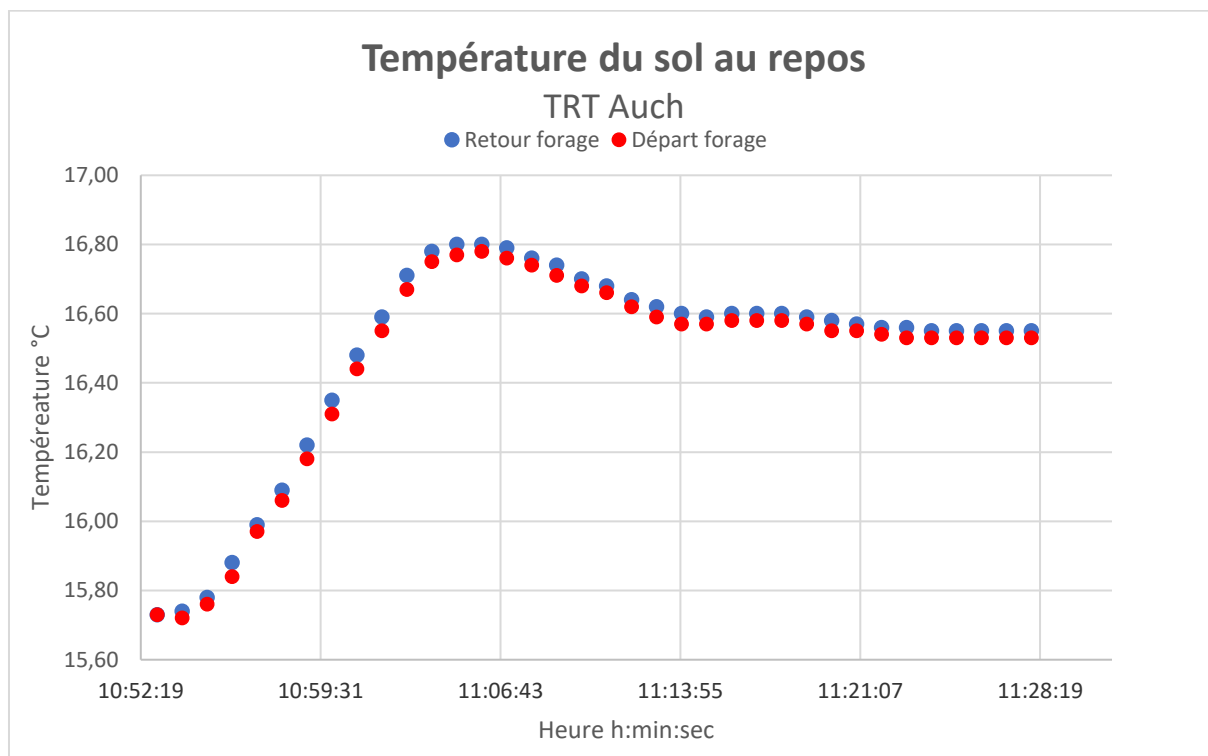
Illustration 3 : Calorifugeage des raccords hydrauliques jusqu'au banc de test



3.2. Analyse des données de la phase 1 : mesure de la température initiale du sol

La courbe ci-dessous donne les mesures des températures de départ et de retour du forage au cours de cette phase de calibration du sol (phase 1). L'eau circulant dans le forage a stagné pendant plusieurs semaines dans les sondes et est donc à la température du sol au repos.

Au début de l'essai, nous constatons que les températures augmentent puis oscillent avant de se stabiliser. Cela correspond à une phase d'homogénéisation de la température du forage.



A partir de ces mesures nous déduisons la température moyenne du sol avant essai :

$$T_0 = 16,56^{\circ}\text{C}$$

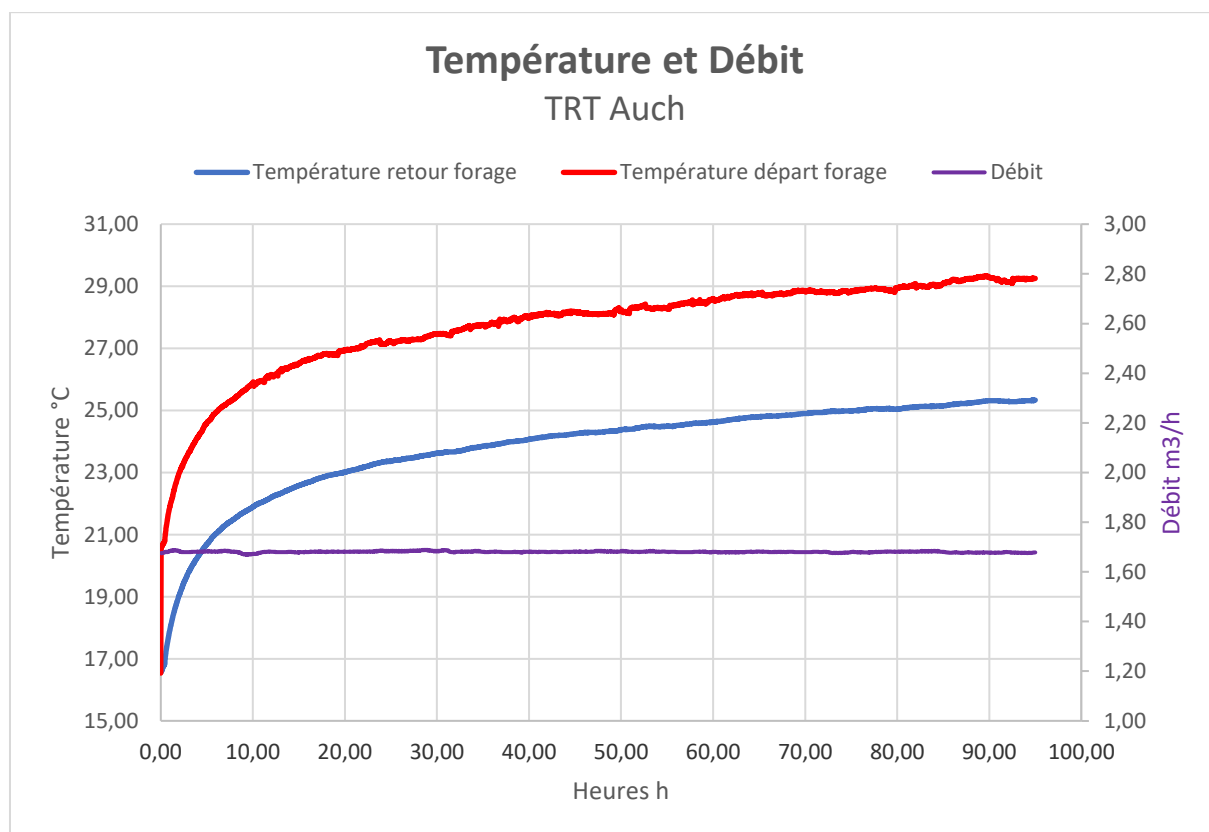
La puissance injectée durant cet essai de calibration est de 60 W d'après les mesures. Cela correspond à l'apport énergétique de la pompe de circulation nécessaire à faire circuler l'eau. Cette puissance est cohérente avec la puissance de la pompe de circulation. Les pertes/apports thermiques parasites du moyen de test sont donc négligeables, ce qui valide la qualité du calorifuge.

3.3. Analyse des données de la phase 2 : mesure de la réponse thermique et de la conductivité

Dans cette partie, l'accent est mis sur l'analyse des données extraites du test de réponse thermique. Les données sont exploitées sous Excel et les résultats sont explicités au travers des courbes suivantes.

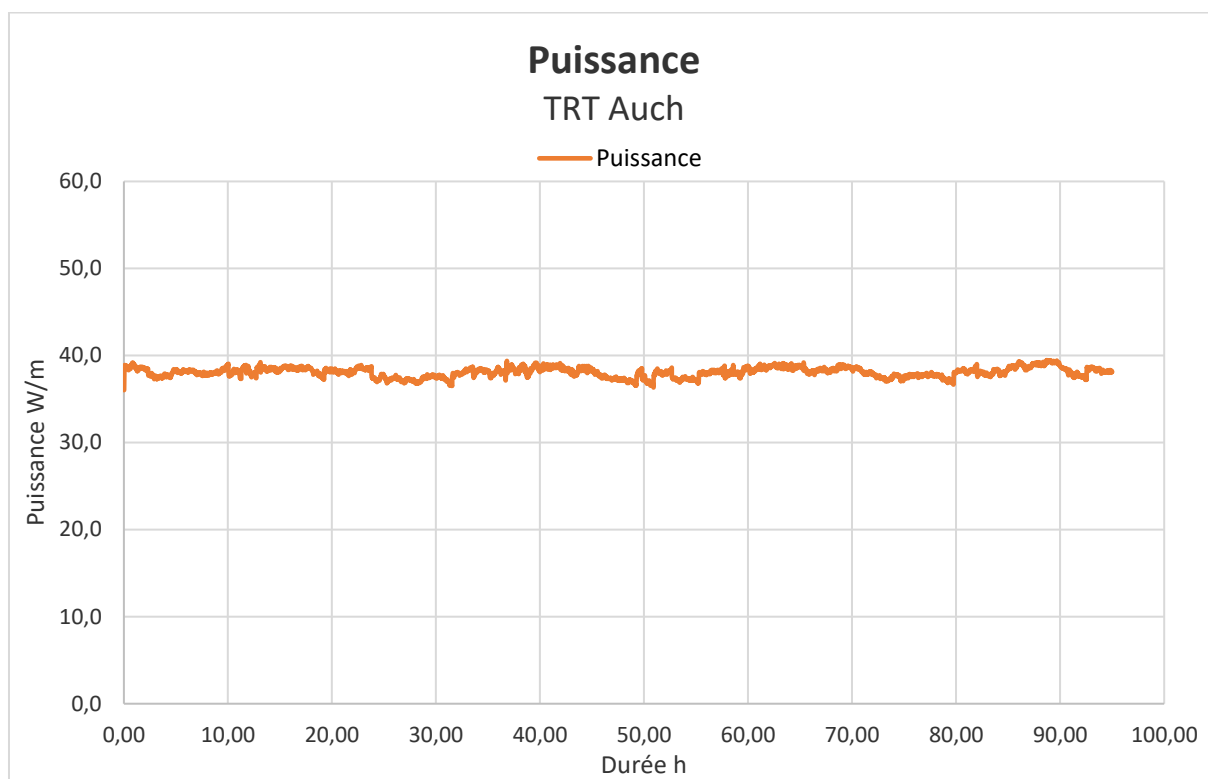
3.3.1. Enregistrement des températures et du débit

Les heures sont comptées à partir du 10 septembre 2020 à 11h29. La deuxième phase de l'essai a commencé à 11h29 précisément avec l'enclenchement des six résistances.



Le test de réponse thermique fonctionne à l'inverse du mode de chauffage géothermique. Nous injectons dans le forage de l'eau plus chaude que le sol qui contribue à réchauffer le terrain. C'est pourquoi nous observons une température de départ toujours supérieure à la température de retour du forage.

3.3.2. Puissance injectée dans le forage



Les légères oscillations peuvent provenir de variations de tension provenir d'une baisse de tension sur le réseau ERDF.

Cependant, nous observons une puissance relativement stable. La puissance totale est la puissance indiquée sur cette courbe multipliée par le cumul de la profondeur du forage et de la distance du forage au collecteur. Cela s'illustre dans la formule ci-dessous :

$$P_{Totale} = 200 [m] \times 38,1 [W.m^{-1}]$$

$$P_{Totale} = 7\,620 [W]$$

$$P_{Totale} = 7,6 [kW]$$

Cette puissance correspond bien à la puissance cumulée de la résistance électrique et de la pompe de circulation.

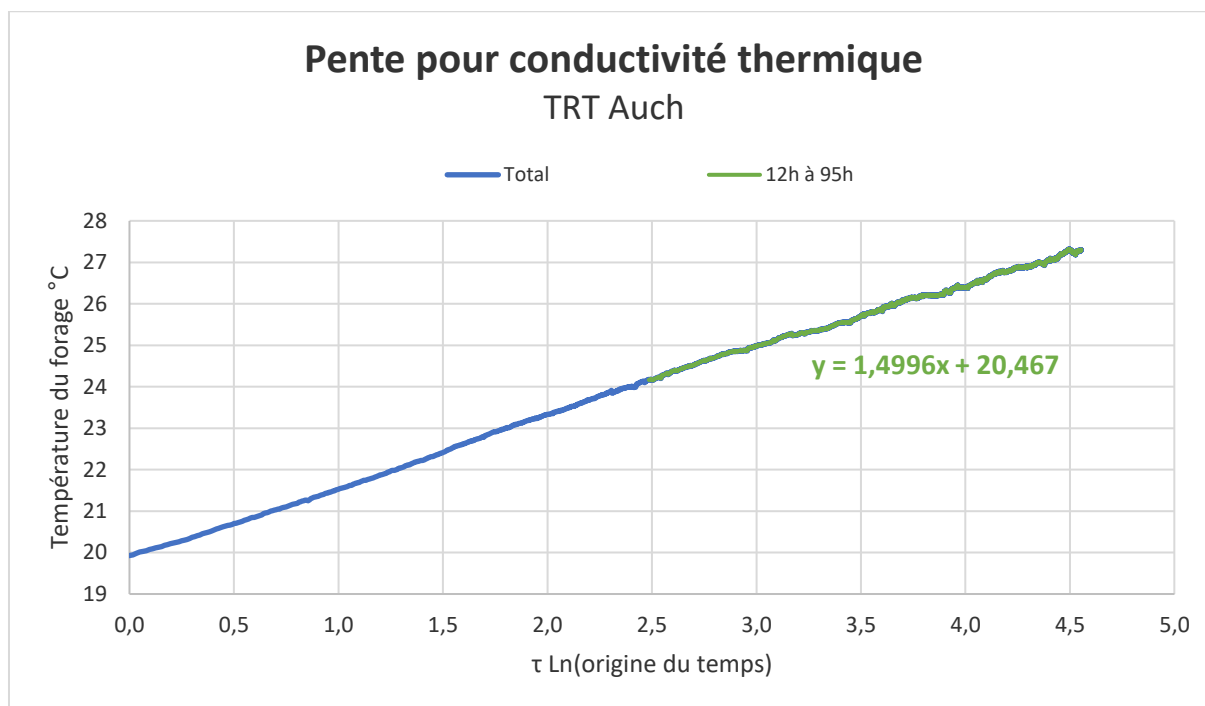
3.3.3. Calcul de la conductivité thermique

La courbe ci-dessous permet de mettre en évidence la forme de la loi logarithmique de croissance de la température du forage. La conductivité thermique se calcule à partir de la pente de cette courbe selon la formule.

$$\lambda = \frac{Q_{ref}}{4\pi \times pente} [W.m^{-1}.K^{-1}]$$

La partie gauche de la courbe (en bleu ci-dessous) correspond au début de l'essai et n'est pas exploitable car la chaleur injectée dans le forage chauffe tout d'abord l'eau, le PEHD et la bentonite. Dans un second temps, cette chaleur se met à chauffer la terre.

La pente sur le début de l'essai représente plus spécifiquement la conductivité thermique de l'ouvrage réalisé que celle du sol à analyser. La fin de l'essai est significative pour mesurer la conductivité propre au sol.

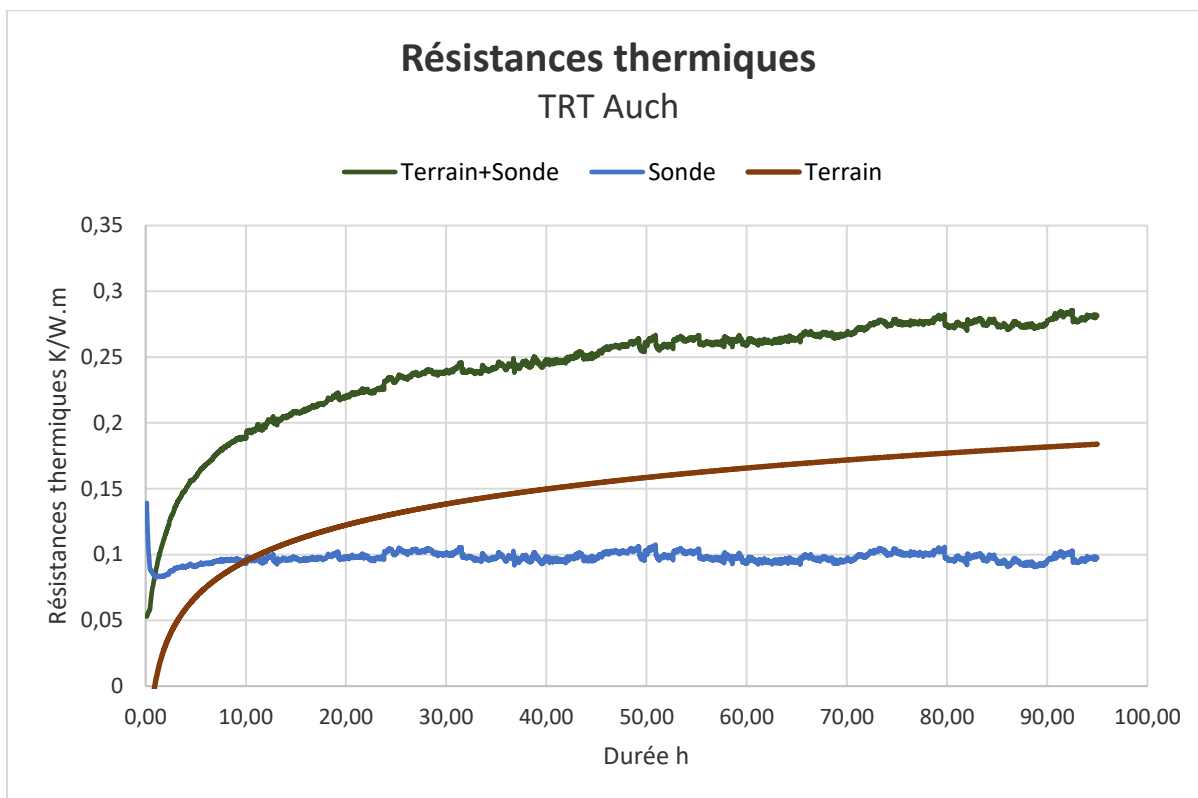


Finalement on obtient : $\lambda = \frac{38,1 [W.m^{-1}]}{4\pi \times 1,4996 [K]} = 2,02 [W.m^{-1}.K^{-1}]$

Conductivité thermique du sol : 2,02 W.m⁻¹.K⁻¹

Cette conductivité est cohérente avec nos retours d'expérience dans la région. Elle témoigne d'une bonne performance du sol.

3.3.4. Calcul de la résistance thermique de la sonde



Sur ce graphique nous avons calculé trois résistances thermiques. Le principe est de calculer la résistance de l'ensemble Terrain+Sonde et la résistance du terrain seul. La résistance de la sonde s'obtient en faisant la différence des deux précédentes.

- Résistance thermique Terrain+Sonde : elle est calculée avec précision car elle ne fait appel à aucune hypothèse sur les caractéristiques du sol.

$$R_S + R_T(t) = \frac{(T_0 - T_f)}{Q(t)}$$

- Résistance thermique du terrain : elle est calculée à partir d'une loi empirique issue de la thèse Elkinson soutenue à l'Ecole Polytechnique de Lausanne.

$$R_T = \frac{1}{4\pi\lambda} \times \left(\ln \left(a \times 4 \times \frac{t}{r^2} \right) - 0.5772 \right)$$

a : diffusivité thermique [m².s⁻¹]

t : durée de la phase de prélèvement thermique [s]

r : rayon de la sonde [m]

On notera que le coefficient α est une valeur typique estimée et non une valeur mesurée qui influence la répartition entre la résistance thermique du terrain et celle de la sonde. Cela n'a aucun impact sur l'allure de la courbe pour le contrôle de la conductivité.

- Résistance thermique de la sonde : elle est obtenue par différence des deux résistances précédentes et dépend donc des hypothèses sur la diffusivité thermique prises en compte dans la formule de Elkinson. Toutefois, la résistance thermique de la sonde devant être constante, on vérifie la cohérence des calculs entre la résistance thermique et la conductivité thermique qui intervient également dans ce calcul.

On constate que la courbe de résistance thermique de la sonde est constante (hormis les irrégularités liées aux variations de tension du réseau), ce qui valide la valeur de la conductivité thermique calculée précédemment.

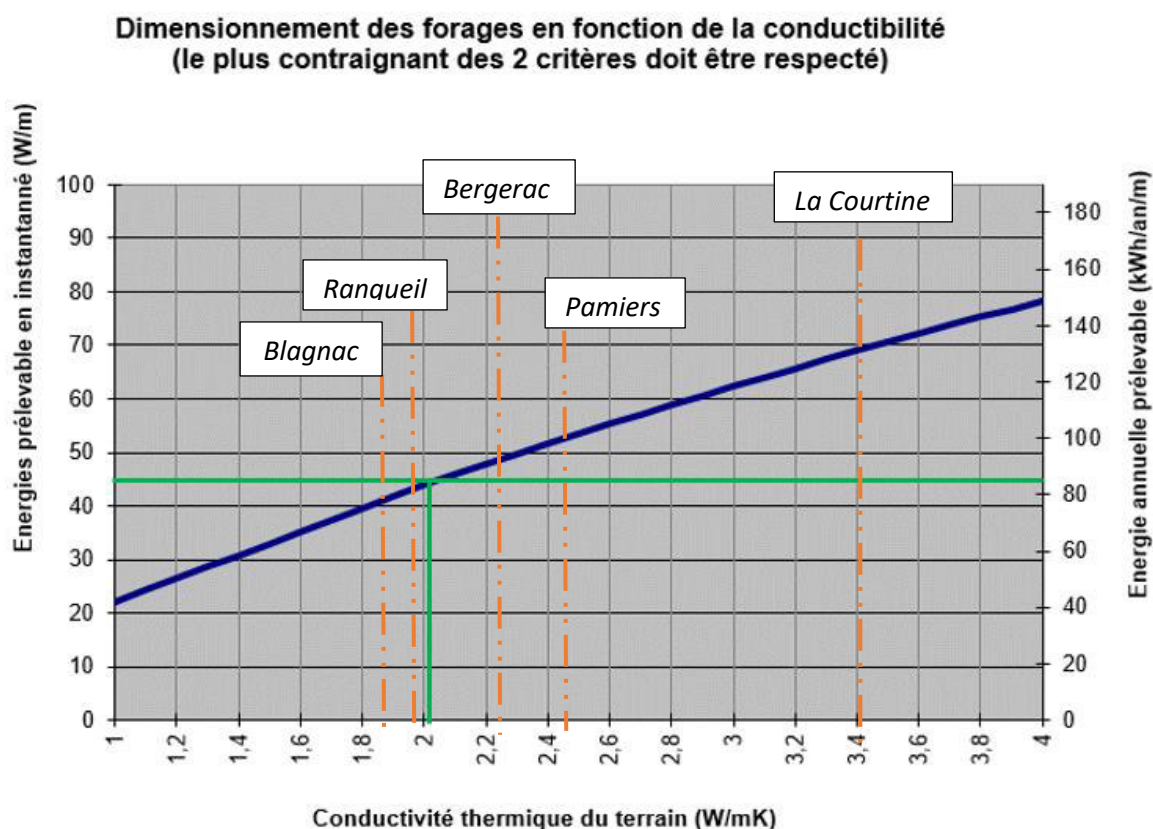
Résistance thermique de la sonde : $0,097 \text{ K.W}^{-1}.\text{m}^{-1}$

4. Synthèse et conclusion

Récapitulons les valeurs dimensionnantes à retenir :

- La température du forage au repos est de **16,56°C**.
- La conductivité thermique du terrain est de **2,02 W.m⁻¹.K⁻¹**.
- La résistance thermique de la sonde est de **0,097 m.K.W⁻¹**.

La performance du sol est très bonne. Elle est parfaitement adaptée à la réalisation d'un chauffage géothermique.



La courbe ci-dessus, et en particulier le paramètre de l'énergie annuelle prélevable [kWh.m⁻¹.an⁻¹], est issue de standards de modélisation réalisés pour un DJU toulousain de façon à garantir que la température de retour de forage reste supérieure à 7°C en pire cas sur une période de 25 ans.

Quand le forage travaille à l'eau et non à l'eau glycolée, il est préconisé de prendre une marge de 20% sur le critère de l'énergie annuelle prélevable [kWh.m⁻¹.an⁻¹].

Recommandations pour les spécifications des forages sur le site de l'ancienne caserne à Auch :

La méthode mise en place par Bio-énergies diffusion pour spécifier les forages géothermiques, en conformité avec les prescriptions du BRGM, a permis de définir trois critères fondamentaux : la puissance frigorifique instantanée, l'énergie frigorifique maximale prélevée annuellement et l'efficacité du géocooling.

Pour établir ces abaques, nous avons réalisé un jeu de simulations sur 50 ans pour différentes conductivités et pour un climat standard de la région Toulousaine. Ces simulations ont été recalées par le retour d'expérience accumulé sur 15 ans.

Pour définir les seuils de kWh et de kW, nous avons considéré les hypothèses complémentaires suivantes :

- Seuil de kW : durée de fonctionnement inférieure à 1800 [h.an⁻¹] pour la ou les PAC de l'installation
- Seuil de kWh : répartition des appels de puissances selon le climat toulousain avec une T° minimale de retour forage de 7°C (départ forage 3°C) en fin de vague de froid après 50 ans de fonctionnement. Ce seuil de kWh est à minorer de 20% pour des installations sans glycol afin de restaurer 2°C de marge de T° vis-à-vis du risque de gel.

A partir de ces mesures et suite au test de réponse thermique, Bio-énergies diffusion recommande de respecter les trois valeurs suivantes :

- La puissance frigorifique instantanée [W.m⁻¹] de la pompe à chaleur retenue devra être au plus égal à **45 W.m⁻¹**, calculée au point de fonctionnement 7°C/35°C.
N.B : Si les PAC fonctionnent nettement moins de 1800 [h.an⁻¹] (PAC en redondance), ce critère peut être légèrement relâché dans la mesure où le critère suivant est strictement respecté sur un hiver.
- L'énergie frigorifique maximale prélevée annuellement [kWh.an⁻¹.m⁻¹] devra être inférieure à **85 kWh.an⁻¹.m⁻¹** (ou **68 kWh.an⁻¹.m⁻¹** si l'on travaille sans glycol). Cette valeur permet d'éviter une dégradation thermique du sol qui conduirait à avoir une température de forage trop basse après plusieurs années.
N.B : Ce critère correspond à une valeur algébrique, en effet, si l'on puise de temps en temps un peu plus d'énergie qu'il n'en est prescrit, cela ne portera pas préjudice à la longévité de l'installation tant que cette énergie est retournée au sol durant l'été via l'injection de chaleur lors du rafraichissement.
- Le linéaire de forage pour le géocooling devra être supérieur à **0,8 – 1,2 m de forage par m² à rafraichir** (à pondérer en cas de grands volumes). Cette valeur dépend des critères de température de confort et des apports thermiques dans le bâtiment. Pour des groupes scolaires fermés 2 mois l'été, on sera plutôt vers 0,8 m de forage par m² alors que pour des bâtiments de bureaux avec de fortes charges thermiques on sera plutôt vers 1,2 m de forage par m².
N.B : Ce critère est très variable suivant les régions de France (T° du sol, besoins de rafraichissement) et cette valeur est applicable uniquement dans une large région Toulousaine.

L'activecooling est moins contraignant que le geocooling car la seule contrainte est de ne pas dépasser les 40°C en départ de forage pour ne pas endommager le PEHD. Or la limite de 40°C ne sera jamais atteinte sur des installations classiques car elle est largement supérieure aux températures attendues. Il faudra néanmoins être prudent dans le cas de thermofrigopompe où le mode de régulation de la décharge du ballon chaud peut, dans certains cas, conduire à une température de départ vers les forages supérieure à 40°C.

Des préconisations pourront être données suite au retour de la STD par le BE.