GEOSYNERGIE
BUREAU D'ÉTUDES EXPERT EN GÉOTHERMIE

RAPPORT D'ETUDE
TEST DE REPONSE THERMIQUE
1919 Route de Mende
34293 MONTPELLIER Cedex 5

Emetteur	Destinataire
GEOSYNERGIE	CNRS 34 Délégation Régionale Occitanie Est

	Indice	Date	Rédactrice	Relecteur	Relecteur
OPQIBI L'INGÉNIERIE QUALIFIÉE N° CERTIFICAT 20 12 4074	A	18/07/24	Fantine PEREIRA HARI	Siffrein CROSET	William PAYET
			Visa	Visa	Visa

TABLE DES MATIERES

LISTE DES FIGURES **3**

LISTES DES TABLEAUX **3**

LISTES DES ANNEXES **3**

1. SYMBOLES **4**

2. INTRODUCTION **5**

3. PARAMETRES DU PROJET **6**

3.1. CARACTERISTIQUES DE LA SONDE TEST 6
3.2. LOCALISATION DU T.R.T. 6
3.3. LOG LITHOLOGIQUE : DECOMPOSITION PAR TYPE DE ROCHE 8

4. TEST DE REPONSE THERMIQUE **9**

4.1. PRINCIPE GENERAL 9
4.2. MODULE DE TEST 10
4.3. METHODOLOGIE 11
4.4. INTERPRETATION DU TEST DE REPONSE THERMIQUE 12

5. PARAMETRES DU TEST **13**

6. RESULTATS DU TEST **15**

6.1. TEMPERATURE INITIALE DU SOUS-SOL T_0 15
6.2. CONDUCTIVITE MOYENNE DU SOUS-SOL 15
6.3. TEMPERATURE MOYENNE DU FLUIDE 16
6.4. COURBE DE TENDANCE DE LA DROITE 17

7. SYNTHESE DES RESULTATS DU TEST DE REPONSE THERMIQUE **20**

8. CONCLUSION **21**

9. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES **23**

10. ANNEXES **24**

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : LOCALISATION DU PROJET SUR FOND IGN (GEOPORTAIL.GOUV.FR) 7
FIGURE 2 : LOCALISATION DU PROJET SUR FOND ORTHOPHOTOGRAPHIQUE (GEOPORTAIL.GOUV.FR) 7
FIGURE 3 : LOG LITHOLOGIQUE REALISE A PARTIR DU FORAGE DE LA SONDE TEST 8
FIGURE 4 : REPRESENTATION D'UN MODULE DE TEST - SOURCE : TERRENDIS [5] 10
FIGURE 5 : SCHEMA SIMPLIFIE D'UN DISPOSITIF DE TRT - SOURCE : RAPPORT BRGM/RP-60816-FR [2] 11
FIGURE 6 : EVOLUTION DE LA TEMPERATURE, DU DEBIT ET DE LA PUISSANCE EN FONCTION DU TEMPS 14
FIGURE 7 : RELEVES DES TEMPERATURES D'ENTREE, DE SORTIE ET MOYENNE EN FONCTION DU TEMPS 16
FIGURE 8 : GRAPHIQUE DE LA TEMPERATURE MOYENNE EN FONCTION DU TEMPS SUR UNE ECHELLE LOGARITHME 17
FIGURE 9 : COURBE DE TENDANCE DE LA TEMPERATURE MOYENNE EN FONCTION DU TEMPS EN ECHELLE LOGARITHME 18

LISTES DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : INFORMATIONS GENERALES DU PROJET 5
TABLEAU 2 : CARACTERISTIQUES DE L'ECHANGEUR GEOTHERMIQUE 6
TABLEAU 3 : PARAMETRES CHOISIS POUR LA REALISATION DU TEST 13
TABLEAU 4 : TEMPERATURE INITIALE DU SOUS-SOL 15
TABLEAU 5 : : EQUATION DE LA COURBE DE TENDANCE LOGARITHMIQUE 18
TABLEAU 6 : CONDUCTIVITE THERMIQUE DU SOUS-SOL 18
TABLEAU 7 : RESISTANCE EQUIVALENTE DE LA SONDE 19
TABLEAU 8 : CHALEUR SPECIFIQUE MOYENNE DU SOUS-SOL 19
TABLEAU 9 : SYNTHESE DES RESULTATS DU TEST DE REPONSE THERMIQUE 20

LISTES DES ANNEXES

ANNEXE 1 : TABLE DES VALEURS USUELLES ..... **ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.**
ANNEXE 2 : PHOTO DU TRT 25

1. Symboles

A : Coefficient directeur de la courbe de tendance logarithmique

B : Ordonnée à l'origine de la courbe de tendance logarithmique

C_p : Chaleur spécifique volumique du terrain ($J/m^3.K$)

C_{pf} : Chaleur spécifique massique du fluide ($J/kg.K$)

H : Profondeur active de la sonde (m)

P : Puissance totale injectée lors du test (W)

P_l : Puissance linéique injectée lors du test (W/ml)

Q_v : Débit volumique du fluide (m^3/h)

R_b : Résistance équivalente de la sonde (m.K/W)

t : Temps du test de réponse thermique (s)

T_0 : Température moyenne du sous-sol (°C)

T_e : Température du fluide à l'entrée de la sonde (°C)

T_m : Température moyenne du fluide dans la sonde (°C)

T_s : Température du fluide à la sortie de la sonde (°C)

α : Diffusivité thermique (m^2/s)

ΔΘ : Différence de température moyenne entre l'entrée et la sortie de la sonde (°C)

λ : Conductivité thermique moyenne du sous-sol (W/m.K)

2. Introduction

Un Test de Réponse Thermique est une opération préliminaire au dimensionnement d'un champ de sondes. Le test se compose d'une série de mesures qui s'étalent sur plusieurs jours, généralement 3 jours (72h). Le test est réalisé sur site à l'aide d'une sonde géothermique pilote, valorisée par la suite dans le futur champ de sondes. Les mesures relevées lors du test ne sont valables que dans le contexte de sa réalisation, notamment en ce qui concerne la profondeur et le type de la sonde test. De ce fait, les paramètres du test doivent, de la façon la plus rigoureuse possible, être représentatifs de la conception (forage, type de sonde, cimentation, profondeur) du champ de sondes de l'installation future.

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

- La température moyenne stabilisée du sous-sol T_0 ;
- La conductivité thermique moyenne du milieu rencontré λ ;
- La qualité en tant qu'échangeur thermique de la sonde test R_b.

Sauf spécification contraire, les figures, calculs et tableaux exposés dans ce rapport ont été réalisés par la société GEOSYNERGIE et concernent le projet ci-dessous.

Tableau 1 : Informations générales du projet

Informations générales du projet	
Nom du projet	CNRS 34
Localisation	1919 Route de Mende 34293 MONTPELLIER Cedex 5
Maitre d'Ouvrage	CNRS 34 Délégation Régionale Occitanie Est
Forage(s)	
Entreprise	LUROFORAGE
Date de réalisation	20 juin 2024
Test(s) de réponse thermique	
Entreprise	GEOSYNERGIE
Date de réalisation	08/07/24 au 11/07/24

3. Paramètres du projet

3.1. Caractéristiques de la sonde test

Tableau 2 : Caractéristiques de l'échangeur géothermique

Caractéristiques de l'échangeur géothermique	
Diamètre pondéré du forage	166,09 mm
Profondeur du forage	103 m
Type de sonde utilisée	Double U spiralée - ELYDAN - 32 x 3,00 mm
Cimentation utilisée	PROMACEM Haute Conductivité (> 2 W/m.K)

3.2. Localisation du T.R.T.

Le projet est situé approximativement aux coordonnées GPS suivantes (Lambert 93) :

X : 769637.01 m

Y : 6282397.47 m

Les coordonnées sont issues du site geoportail.gouv.fr et devront être affinées après l'intervention d'un géomètre expert.

L'emplacement du forage de la sonde test est indiqué par les cartes suivantes.

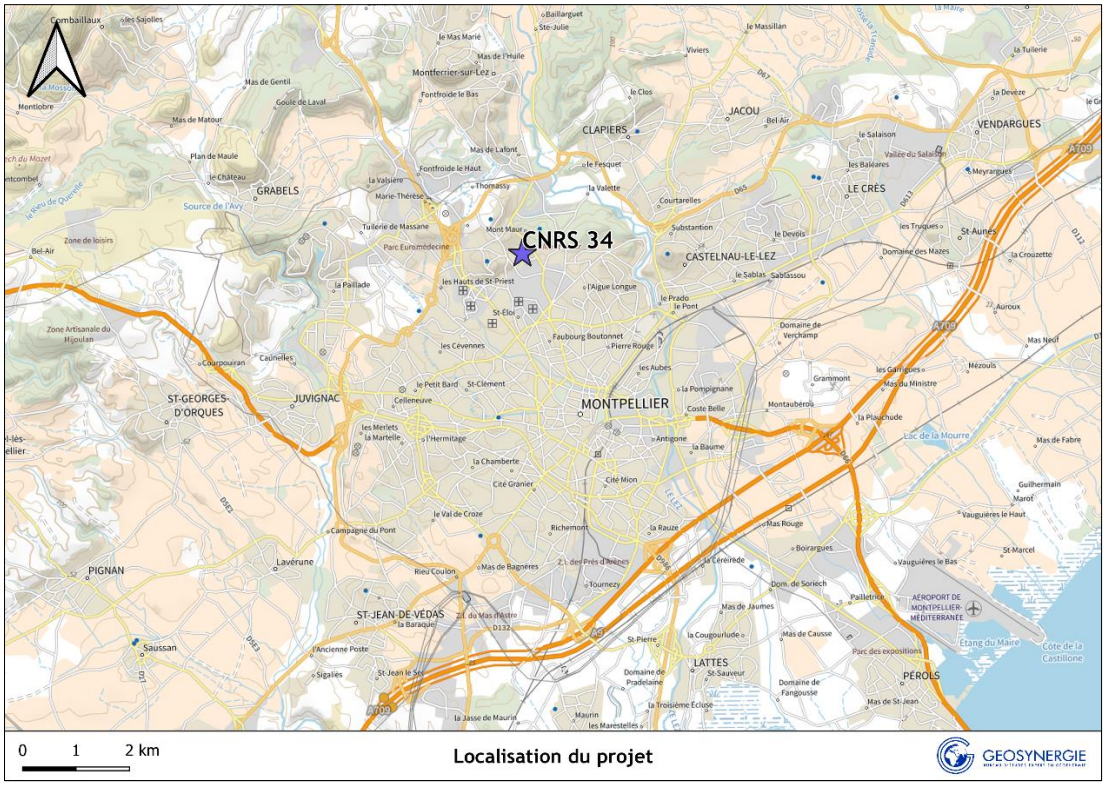


Figure 1 : Localisation du projet sur fond IGN (geoportail.gouv.fr)

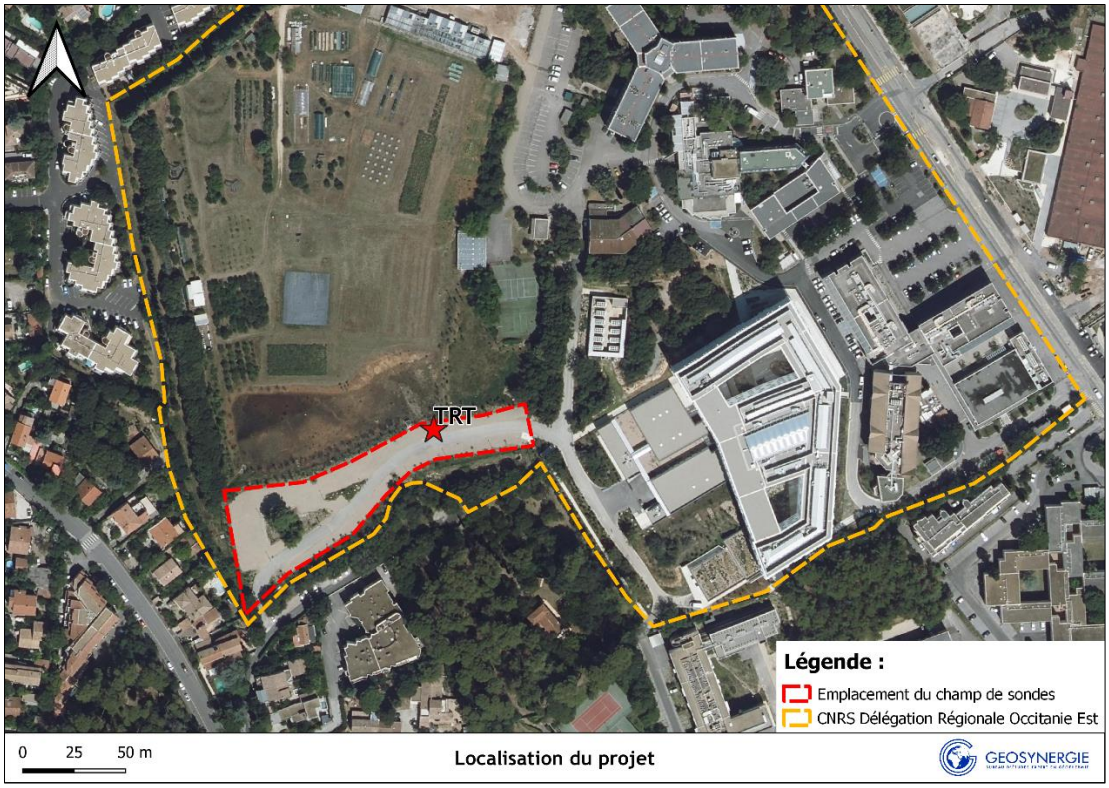


Figure 2 : Localisation du projet sur fond orthophotographique (geoportail.gouv.fr)

GEOSYNERGIE
358, Chemin de la Coutelière, 84800 Lagnes
Courriel : geosynergie@gmail.com
SIRET : 535.396.683.00034

CNRS 34 Délégation Régionale Occitanie Est
1919 Route de Mende
34293 MONTPELLIER Cedex 5

3.3. Log lithologique : décomposition par type de roche

Ci-dessous le log lithologique à partir du forage de la sonde test réalisée par la société LUROFORAGE, posée à 102 m de profondeur. Plusieurs arrivées d'eau ont été observées : 3 m³/h à 29 m/TN, 25 m³/h à 75 m/TN et 45 m³/h à 95 m/TN. Le niveau d'eau s'est stabilisé à 33 m/TN.

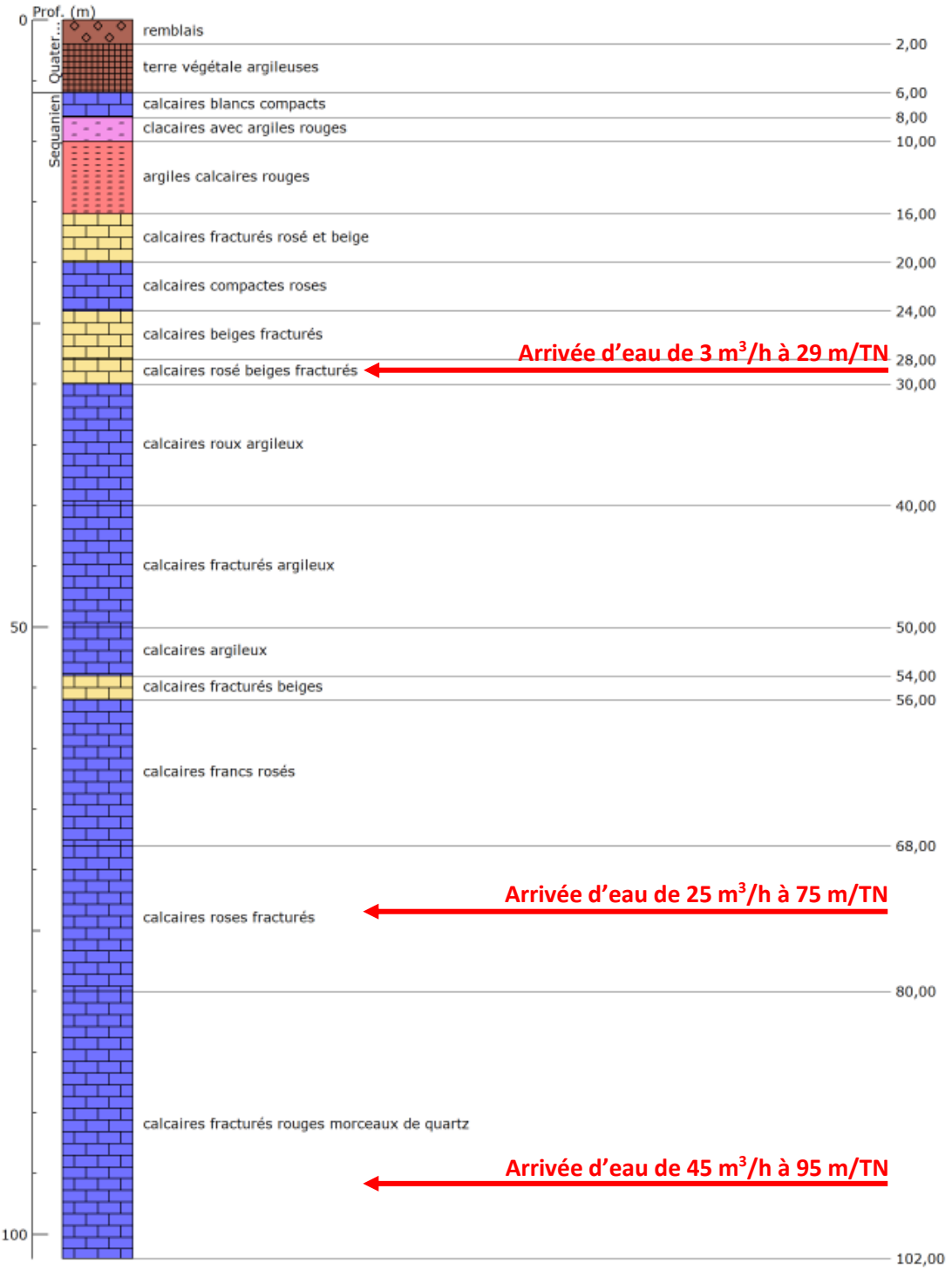


Figure 3 : Log lithologique réalisé à partir du forage de la sonde test

4. Test de Réponse Thermique

4.1. Principe général

Le principe du test repose sur l'observation de l'évolution des régimes de températures en entrée et en sortie de la sonde test (T_e et T_s) lorsqu'une puissance thermique est appliquée au fluide qui la parcourt. La sonde sert alors d'échangeur thermique entre le fluide et le sous-sol. Le fluide chauffé en circulation dans la sonde délivre au sous-sol une énergie calorifique fournie par un réchauffeur électrique situé dans le module test.

La puissance injectée en watt est donnée par la formule suivante :

$$P = Q_m * C_{pf} * \Delta\Theta$$

Dans notre cas, c'est sur le module test que la puissance injectée par le réchauffeur est réglée en fonction de la longueur de la sonde.

Tout au long du test, le sous-sol absorbe cette quantité d'énergie et se réchauffe progressivement. Suivant la valeur de la conductivité thermique λ du sous-sol (W/m.K), l'élévation de la température de celui-ci au contact de la sonde sera plus ou moins rapide suivant la vitesse du phénomène de diffusion thermique.

Une conductivité thermique du sous-sol élevée entraînera une élévation de température lente. Inversement, une conductivité basse du sous-sol entraînera une élévation rapide de la température.

L'analyse de la courbe représentant la variation de la température moyenne du fluide tout au long du test permet d'évaluer la valeur de conductivité thermique moyenne du sous-sol.

La puissance thermique injectée est maintenue constante au cours des 72h de test.

4.2. Module de test



Figure 4 : Représentation d'un module de test - Source : Terrendis [5]

Ci-dessous, le schéma simplifié et explicatif du fonctionnement de la sonde de test :

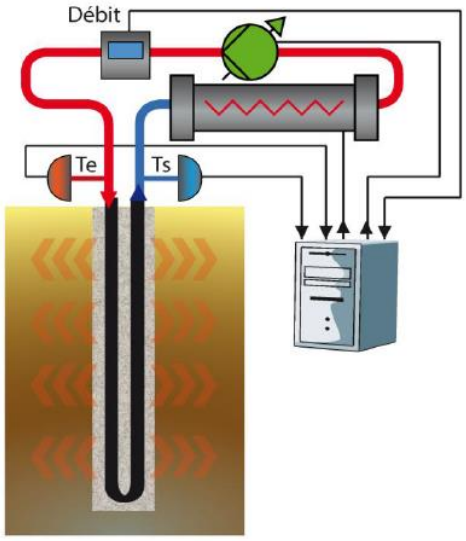


Figure 5 : Schéma simplifié d'un dispositif de TRT - Source : Rapport BRGM/RP-60816-FR [2]

4.3. Méthodologie

Phase préliminaire

La première étape consiste à déterminer la température moyenne sur la profondeur du sous-sol T_0. Durant cette phase, le fluide est mis en circulation dans la sonde par le circulateur du module test, en laissant le réchauffeur électrique à l'arrêt. Après une période de 30 à 45 min (selon la profondeur de la sonde), la température du fluide s'équilibre à la température initiale du sous-sol T_0.

Phase de test

Le fluide circule dans la sonde avec un débit maintenu constant. La puissance du réchauffeur électrique est aussi maintenue constante grâce à un régulateur de puissance, afin de garantir des résultats les plus précis possibles. Cette phase dure 72h.

Lors de cette phase, le module test effectue chaque minute un relevé des températures en entrée et en sortie du fluide, des relevés de pression, de puissance et des pertes de charge. Cela permet de détecter avec précision toute anomalie de régulation durant les 72h de test.

4.4. Interprétation du test de réponse thermique

Les courbes de relevés de température en fonction du temps sont analysées grâce à la théorie de la source linéaire infinie de chaleur. Cette théorie permet de déterminer les conductivités moyennes du sous-sol sur la profondeur de la sonde, ainsi que la résistance équivalente de la sonde.

Cette théorie consiste à considérer la sonde test comme une source linéaire, verticale, générant un flux de chaleur radial[1] et isotrope[2] dans un milieu infini de conductivité λ (W/m.K) et de capacité calorifique Cp (J/m³.K), voir référence bibliographique [4]. On note α la diffusivité thermique du terrain (m²/s).

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

$$T(r,t) = T_0 + \frac{P_l}{4\pi\lambda}\left(\ln\left(\frac{4\alpha t}{r^2}\right) - \Upsilon\right)$$

où ϒ est la constante d'Euler.

Si on considère que r = r_b (rayon du forage), on obtient ainsi la température à la frontière du forage. En tenant également compte de la résistance thermique de la sonde R_b, on obtient finalement une équation régissant la température moyenne du fluide T_m :

$$Tm(t) = \frac{P_l}{4\pi\lambda}\ln(t) + \frac{P_l}{4\pi\lambda}\left(\ln\left(\frac{4\alpha}{{r_b}^2}\right) - \Upsilon\right) + T_0 + P_l R_b$$

Concernant la chaleur spécifique de sous-sol notée C_p, celle-ci est évaluée avec précision grâce des tables de valeurs usuelles et une coupe lithologique, effectuée par l'entreprise ayant réalisé le forage.

Ainsi, l'enregistrement de l'évolution des températures en entrée et sortie de sonde permet de mesurer la température moyenne T_m du fluide. En excluant les mesures des 10 premières heures de test afin d'obtenir un régime stationnaire pour pouvoir utiliser correctement la théorie de la source linéaire infinie de chaleur et en traçant l'évolution de la température moyenne du fluide sur une échelle logarithmique du temps, on doit obtenir une droite permettant d'établir numériquement les valeurs de A (Coefficient directeur de la courbe de tendance) etde B (Ordonnée à l'origine de la droite). Connaissant les autres paramètres du test, A permet de calculer λ et B permet de calculer R_b.

[1] Radial = horizontal
[2] Isotrope = qui présente les mêmes propriétés dans toutes les directions (Les dictionnaires Le Robert)

5. Paramètres du test

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

Le tableau ci-dessous représente les paramètres choisis pour la réalisation du test de réponse thermique.

Tableau 3 : Paramètres choisis pour la réalisation du test

Paramètres du test	
Fluide utilisé	Eau douce et claire
Chaleur spécifique du fluide	4185 J/kg.°C
Débit massique du fluide (kg/h)	1010,0
Différence de température ΔΘ	3,999 °C
Puissance totale injectée	4689 W
Puissance linéique	45,53 W/ml

La réussite du test est conditionnée par :

- La régularité de la puissance injectée dans la sonde.
- La régularité du débit sur la durée du test.
- Un delta de température constant.

La figure ci-dessous représente les relevés effectués minute par minute lors de la phase de test.

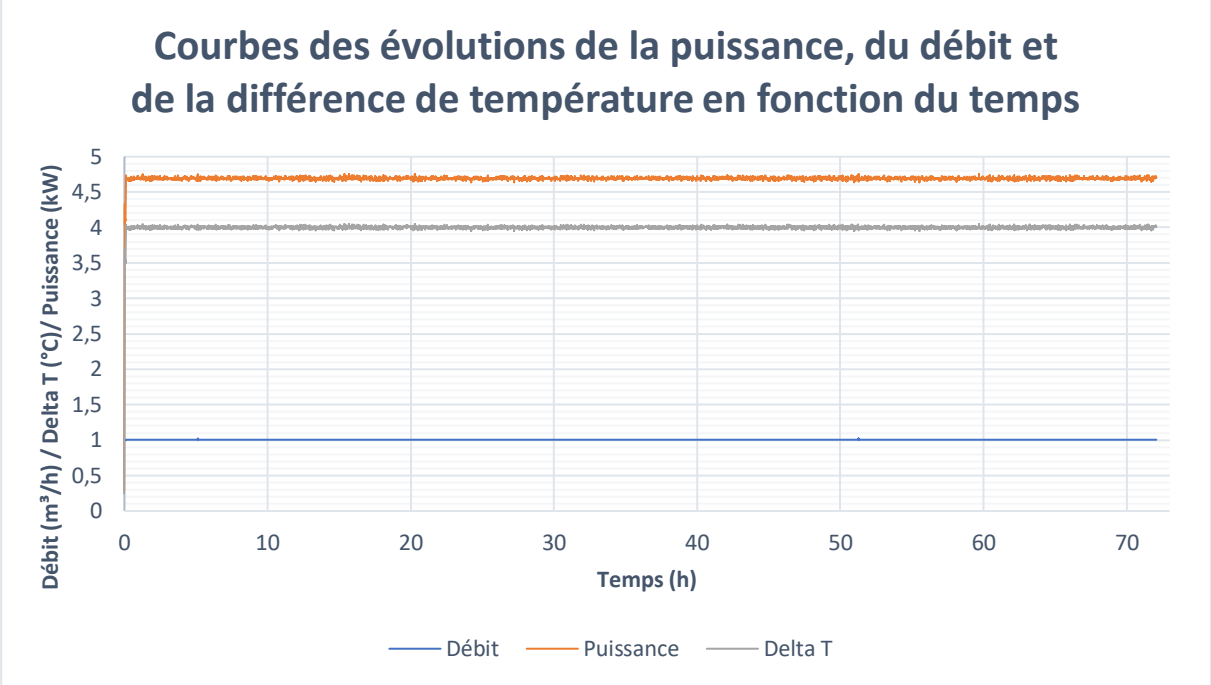


Figure 6 : Evolution de la température, du débit et de la puissance en fonction du temps

6. Résultats du test

6.1. Température initiale du sous-sol T_0

Les variations climatiques journalières n'ont pas d'influence sur la température du sous-sol au-delà de 5 m de profondeur. Seules les variations de températures saisonnières peuvent avoir une influence sur l'évolution de la température du sous-sol jusqu'à 20 m.

Sur une profondeur d'environ 80 à 100 m, on considère que la température moyenne du sous-sol est indépendante des variations de la température extérieure. Le sous-sol garde une température constante de l'ordre de 10 à 14°C (en général), à partir d'une profondeur d'une dizaine de mètres.

La valeur de la température du sous-sol, obtenue après la phase préliminaire de l'essai, est donnée dans le tableau ci-dessous.

Tableau 4 : Température initiale du sous-sol

Température initiale du sous-sol	
T_0	21,81 °C

6.2. Conductivité moyenne du sous-sol

Le graphique ci-dessous représente l'évolution des températures en entrée et en sortie de la sonde durant toute la phase de chauffe ainsi que la température moyenne.

On note la température moyenne :

$$Tm = \frac{T_e + T_s}{2}$$

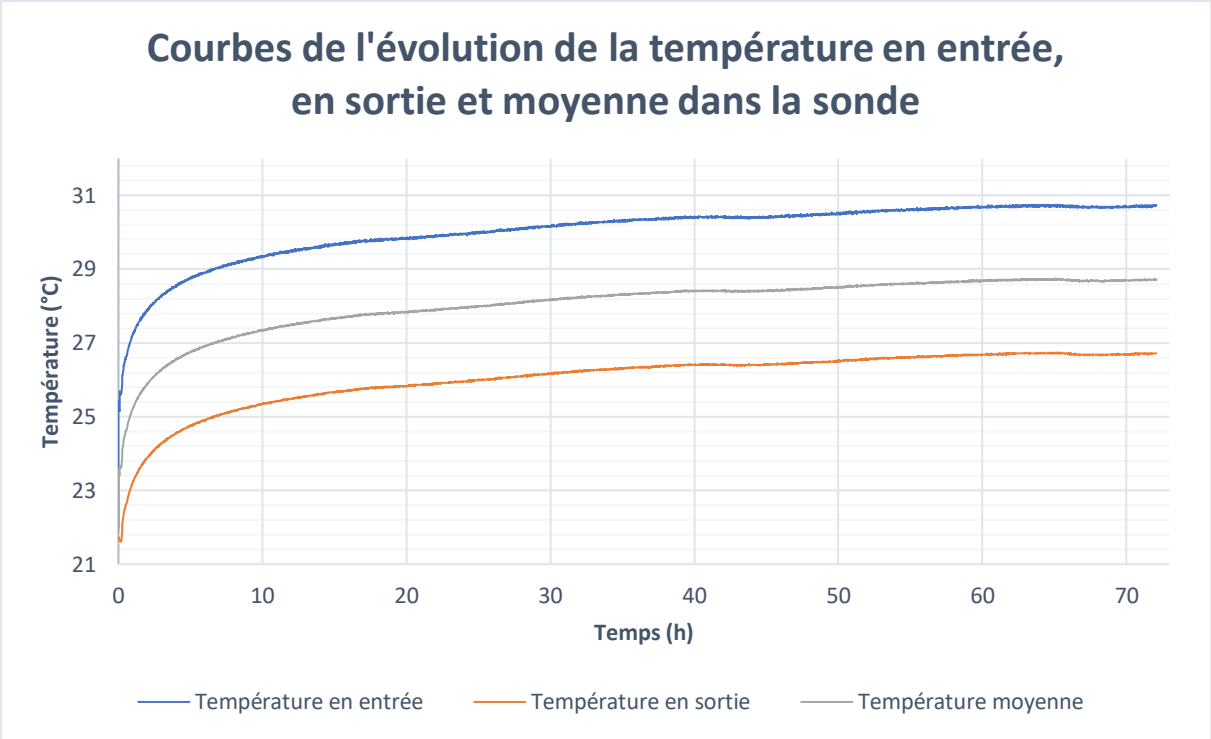


Figure 7 : Relevés des températures d'entrée, de sortie et moyenne en fonction du temps

6.3. Température moyenne du fluide

Le graphique ci-dessous représente l'évolution de la température moyenne du fluide, avec une échelle logarithmique du temps. Si on se réfère à la théorie de la source linéaire infinie de chaleur, cette évolution doit suivre une droite après que le régime stationnaire ait été atteint. Pour cela, les données des 10 premières heures sont ignorées, afin d'obtenir une équation de la droite la plus juste et représentative possible.

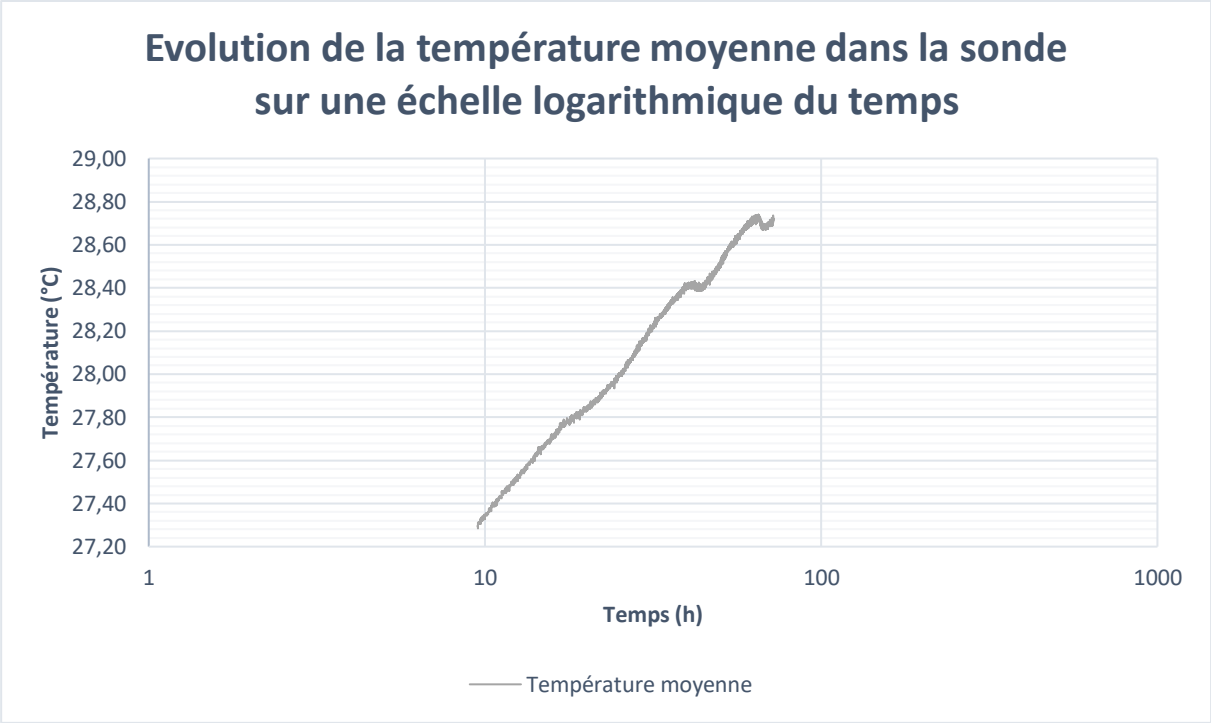


Figure 8 : Graphique de la température moyenne en fonction du temps sur une échelle logarithme

6.4. Courbe de tendance de la droite

Selon la théorie de la source linéaire infinie de chaleur, la courbe de tendance obtenue à partir de l'évolution de la température moyenne en échelle logarithmique du temps, doit être de la forme suivante :

$$T_{moy} = A * \ln(x) + B$$

où A = Coefficient directeur de la droite et B = Ordonnée à l'origine de la droite

Les valeurs de A et B serviront notamment à calculer les valeurs de la conductivité thermique λ (W/m.K) et de la résistance équivalente de la sonde R_b (m.K/W)

La figure ci-dessous donne la valeur de la courbe de tendance logarithmique après une phase de 10h de test avec ici un temps en seconde.

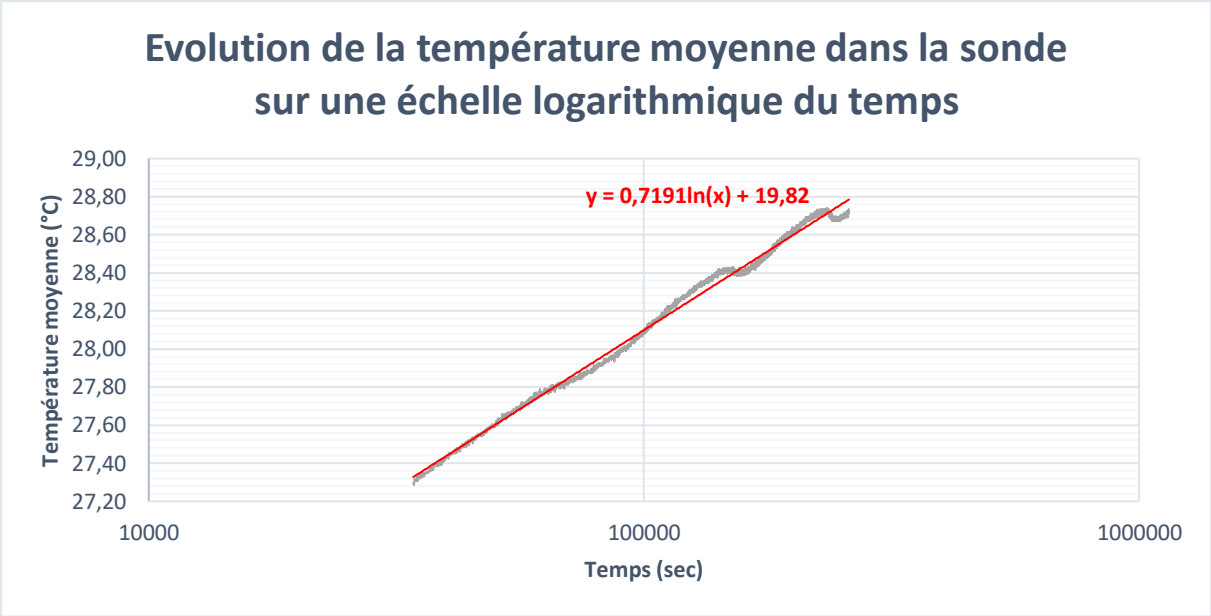


Figure 9 : Courbe de tendance de la température moyenne en fonction du temps en échelle logarithme

Tableau 5 : : Equation de la courbe de tendance logarithmique

Courbe de tendance logarithmique	
Equation de la courbe de tendance	y(t)=0,7191ln(t) + 19,82

6.4.1. Calcul de la conductivité thermique

La conductivité thermique moyenne du sous-sol est calculée à partir de la puissance linéique et du coefficient directeur A de la courbe de tendance logarithmique obtenu ci-dessus. Les détails de ce calcul sont expliqués dans la référence bibliographique [4].

$$\lambda = \frac{P_l}{4\pi A}$$

La valeur de la conductivité thermique moyenne du sous-sol est indiquée dans le tableau ci-dessous :

Tableau 6 : Conductivité thermique du sous-sol

Conductivité thermique du sous-sol	
λ	5.038 W/m.K

6.4.2. Calcul de la résistance équivalente de la sonde

La résistance équivalente de la sonde est un paramètre qui caractérise la qualité de l'échange thermique entre la sonde (tuyaux + cimentation) et le sous-sol. Celle-ci est calculée à partir de l'ordonnée à l'origine B de la courbe de tendance logarithmique. Le calcul est détaillé dans la référence bibliographique [1] et [4].

La valeur de la résistance équivalente de la sonde est indiquée dans le tableau ci-dessous :

Tableau 7 : Résistance équivalente de la sonde

Résistance équivalente de la sonde	
R_b	0,0702 m.K/W

6.4.3. Détermination de la chaleur spécifique moyenne du sous-sol

La chaleur spécifique du sous-sol est déterminée dans un premier temps grâce à la coupe lithologique effectuée lors du forage qui donne avec précision l'épaisseur, les types de couches traversées et éventuellement la présence d'aquifère avec une estimation du débit rencontré. Dans un second temps, la chaleur spécifique moyenne du sous-sol est calculée grâce à une table de valeurs établie en fonction de la nature des roches *(voir annexe 1)*.
La valeur de la chaleur spécifique moyenne du sous-sol est donnée dans le tableau ci-dessous :

Tableau 8 : Chaleur spécifique moyenne du sous-sol

Chaleur spécifique du sous-sol	
C_p	2,228 MJ/m³.K

7. Synthèse des résultats du test de réponse thermique

Les résultats du test de réponse thermique sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 9 : Synthèse des résultats du test de réponse thermique

Résultats du test de réponse thermique	
Température initiale du sous-sol T_0	21,81 °C
Conductivité thermique λ du sous-sol	5,038 W/m.K
Chaleur spécifique C_p du sous-sol	2,228 MJ/m³.K
Résistance équivalente R_b de la sonde	0,0702 m.K/W

Le pourcentage d'incertitude lié à l'application de la théorie de la source linéaire de chaleur est inférieur ou égal à 2.5 % car $\alpha t/r^2 > 20$ (BRGM, 2012).

8. Conclusion

La conductivité thermique λ du sous-sol caractérise la capacité du terrain à échanger de la chaleur avec la sonde géothermique et à la diffuser. La conductivité thermique déterminée grâce au Test de Réponse Thermique est ici de 5.038 W/m.K et témoigne donc d'excellentes conditions pour l'installation d'un champ de sondes géothermiques.

Cette valeur est plus élevée que la conductivité thermique moyenne donnée pour les calcaires (2.8 W/m.K, voir **Annexe 1**), roche majoritairement traversée lors du forage, cela peut s'expliquer par la forte productivité de la nappe. Toutefois, étant donné l'hétérogénéité géologique de la zone, il est préférable de se référer à la valeur maximum de la conductivité thermique pour les calcaires (4 W/m.K) .

La résistance équivalente de l'ouvrage est égale à R_b = 0,0702 m.K/W. C'est une bonne valeur pour une sonde géothermique diamètre 32 mm à 103 m de profondeur et démontre que la sonde a correctement été mise en place.

La température initiale T_0 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 s'échelonnent de 8°C au nord ou dans les montagnes à plus de 19.6°C dans le sud de la France.

La température initiale du sous-sol mesurée sur site est ici de 21.81°C. Cette température est relativement élevée compte tenu de la profondeur et de la localisation du forage. Les importantes arrivées d'eau observées lors du forage test proviendraient de l'aquifère du Pli de Montpellier qui est réputé pour avoir des anomalies thermiques. En effet, la température de la nappe mesurée dans un forage à proximité du projet dans les mêmes formations géologiques se situe autour des 27°C (laboratoire HSM – 2019). Cette température en lieu et place du projet constitue un élément favorable à l'emploi de la géothermie sur sondes car elle permet d'obtenir des COP (Coefficient de Performance) élevés sur la ou les pompes à chaleur en production de chaud ou de froid.

Le test de réponse thermique réalisé ici a permis dans un premier temps de confirmer la lithologie de la zone d'étude mais aussi d'établir les caractéristiques thermodynamiques du sous-sol de la zone concernée par le projet.

Dans un second temps, le forage test et la réalisation du test de réponse thermique ont caractérisé les propriétés du sous-sol, avec des résultats qui démontrent la faisabilité d'un dispositif de chauffage et de rafraîchissement par géothermie sur sondes sèches, tout en fixant les limites et les contraintes.

En conclusion, l'ouvrage géothermique présente à la fois une très bonne température initiale du sous-sol et une excellente conductivité thermique permettant l'application d'une géothermie pérenne.

Il est également nécessaire de rappeler que l'ensemble des résultats présentés ci-dessus ne sont valides que dans le cas **où l'ensemble des futurs forages qui composent le champ de sondes sera réalisé de la même façon qu'a été réalisé le forage test (diamètre, profondeur, cimentation etc…)**. C'est-à-dire en respectant la norme NF X 10-970 par une société rompue aux pratiques du forage géothermique et ayant la qualification « QualiForage module sonde ».

Nota bene :

- Toute anomalie en cours de forage devra être signalée.
- Les éléments de cette étude pourront faire l'objet d'une réunion de travail avec les intervenants techniques de cette affaire.

Nous nous tenons à votre disposition pour tout complément d'information.

9. Références bibliographiques

[1] - ADEME. (2020, Février). *Cahier des charges. Réalisation d'un test de réponse thermique de terrain (TRT)*. Disponible sur : Réalisation d'un test de réponse thermique de terrain (TRT) – ADEME

[2] BRGM. (2012, Mars). *Protocole de test de réponse thermique, Rapport final, BRGM/RP-60816-FR*. Disponible sur : RP-60816-FR.pdf (brgm.fr)

[3] - Google Earth

[4] - S. Gehlin. (2002). *Thermal response Test. Method Development and Evaluation*. Disponible sur: Thermal response test: method development and evaluation (diva-portal.org)

[5] - https://terrendis.com

[6] - https://www.brgm.fr/fr

10. Annexes

La table des valeurs ci-dessous, donne pour chaque type de roche la conductivité thermique ainsi que la capacité thermique volumétrique associées.

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

Annexe 1 : Table des valeurs usuelles



Annexe 2 : Photo du TRT



Figure 10 : Photo du TRT (2)

GEOSYNERGIE
358, Chemin de la Coutelière, 84800 Lagnes
Courriel : geosynergie@gmail.com
SIRET : 535.396.683.00034

CNRS 34 Délégation Régionale Occitanie Est
1919 Route de Mende
34293 MONTPELLIER Cedex 5