



3 Sonde géothermique de test

3.1 Localisation

La figure ci-dessous indique le positionnement du forage de reconnaissance qui a été réalisé sur le site du château de PONTARME.

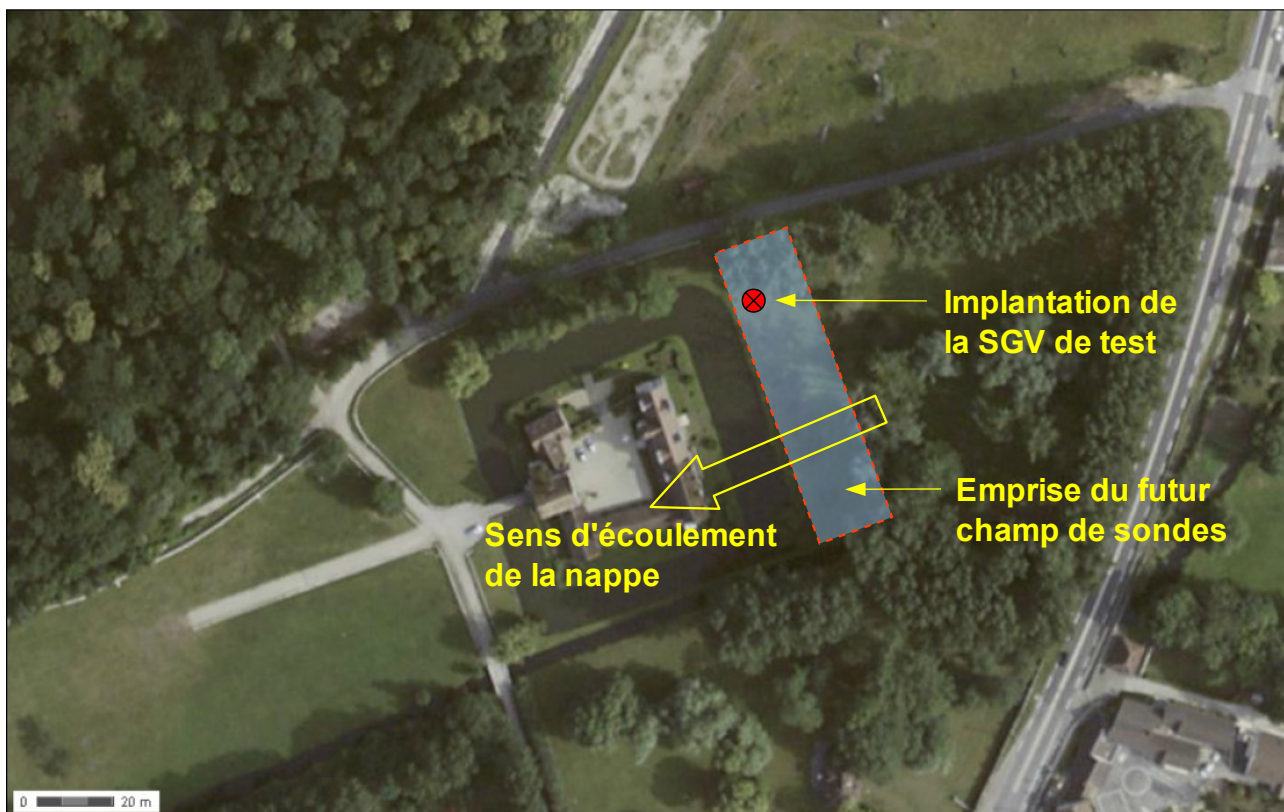


Fig.1. Localisation du forage test.

Relevé GPS de la position du forage test : **N 49.156209, E 2.549427**

3.2 Caractéristiques

Les principales caractéristiques de l'échangeur géothermique qui a été installé sont indiquées dans le tableau 1 ci-dessous.

Tab.1. ECHANGEUR GEOTHERMIQUE DE TEST	
Diamètre du forage :	Ø121 mm, (+ tubage provisoire Ø180mm sur 12m)
Profondeur active H de la sonde :	100 m
Echangeur géothermique	FRANK, Double-U, DN32
Matériau de cimentation	SCHWENK, Füllbinder EWK

Projet : Château de PONTARME	Document N° : ETD150502	Date : 29/05/15
Client : SNC Philippe LEFEVRE et Cie	Révision : A	Page : 5 / 30



3.3 Forage

Le forage et la mise en place de la sonde géothermique ont été réalisés par la société ERBOTECH.

Compte tenu de la géologie locale, il a été nécessaire de changer d'outil en cours de forage : le calcaire a été foré au marteau fond de trou à l'air, puis à partir de 30m le forage a été poursuivi dans les sables au rotary, avec circulation de boue dans le puits.



Fig.2. Atelier de forage ERBOTECH sur le site du château de PONTARME.

3.4 Géologie

Ci-après le relevé géologique effectué durant l'opération de forage. Le dossier technique du forage est fourni en annexe [3].

Profondeur (m)	Nature du sous-sol
de 0.00m à 3.00m	Terre végétale
de 3.00m à 10.00m	Marne et calcaire
de 10.00m à 30.00m	Calcaire
de 30.00m à 45.00m	Sable
de 45.00m à 46.00m	Marne
de 46.00m à 61.00m	Sable
de 61.00m à 65.00m	Sable et Marne
de 65.00m à 100.00m	Sable

Tab. 2. Relevé géologique du site de PONTARME sur 100m de profondeur.

Projet : Château de PONTARME	Document N° : ETD150502	Date : 29/05/15
Client : SNC Philippe LEFEVRE et Cie	Révision : A	Page : 6 / 30



4 Test de réponse thermique

4.1 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 :

A. 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.

B. 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 d'environ 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 **Tentrée** et **Tsortie**.

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 **Rb**.

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

Projet : Château de PONTARME	Document N° : ETD150502	Date : 29/05/15
Client : SNC Philippe LEFEVRE et Cie	Révision : A	Page : 7 / 30



4.2 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 mesure (débit, température en entrée et en sortie de la sonde géothermique) toutes les minutes, et l'archivage des données.

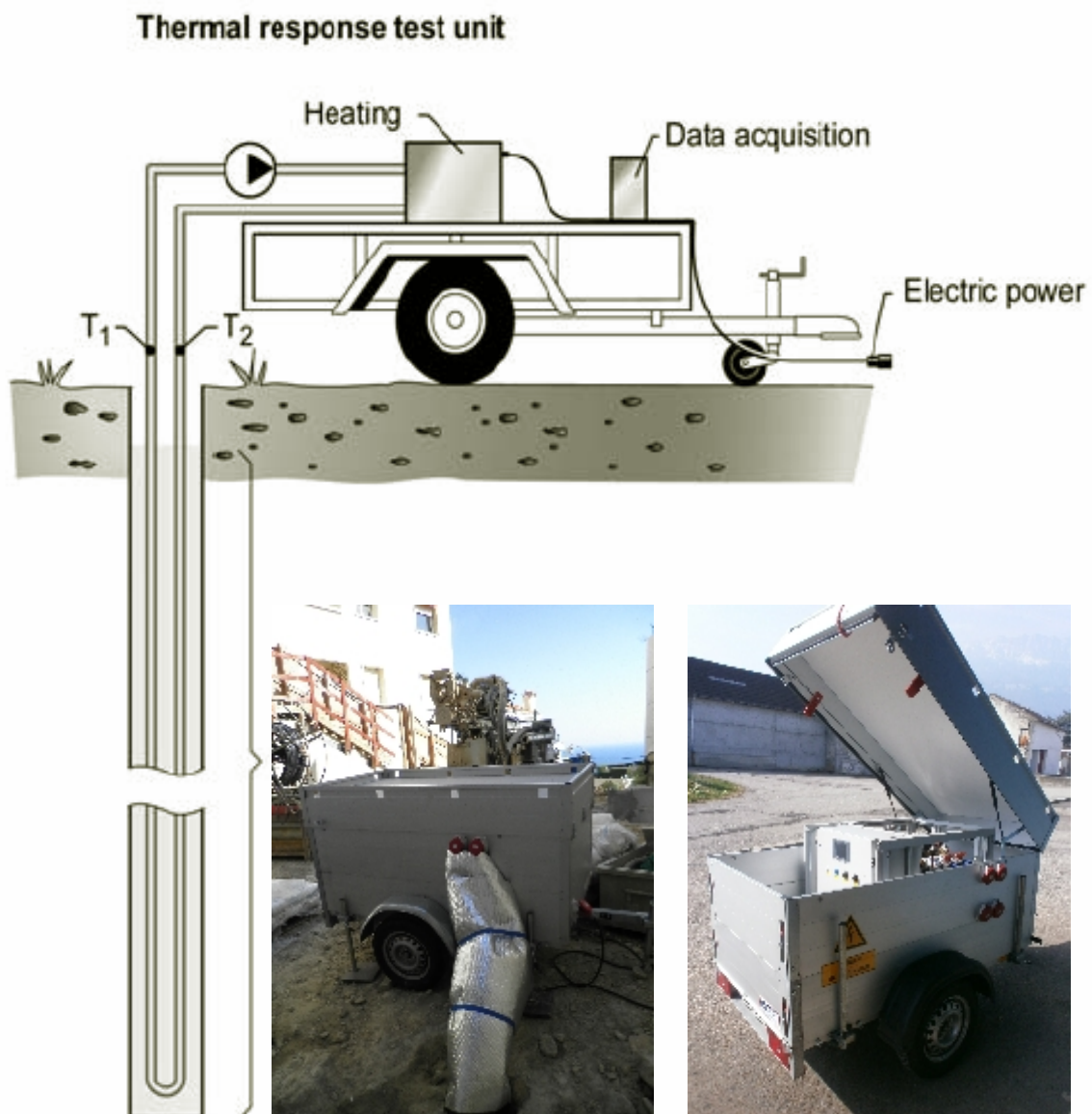


Fig.3. Appareil mobile de test

Projet : Château de PONTARME	Document N° : ETD150502	Date : 29/05/15
Client : SNC Philippe LEFEVRE et Cie	Révision : A	Page : 8 / 30



La photo ci-dessous montre le module raccordé à la sonde test sur le site du château de PONTARME.



Fig.4. Test de Réponse Thermique réalisé sur le site du château de PONTARME.

4.3 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	
Fluide :	Eau
Chaleur spécifique du fluide C_{pf} :	4.18 MJ/m ³ .K
Débit Q :	1.16 m ³ /h
Ecart de température entrée/sortie ΔT :	2.97 °C
Puissance thermique P :	4 000 W
Puissance thermique par mètre p ⁽¹⁾ :	40.00 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.1 (**p = P/H**).

Projet : Château de PONTARME	Document N° : ETD150502	Date : 29/05/15
Client : SNC Philippe LEFEVRE et Cie	Révision : A	Page : 9 / 30



4.4 Résultats

4.4.1 Température initiale moyenne du sous-sol (T_0)

Sur une profondeur de 100m, 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 de température vertical 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.

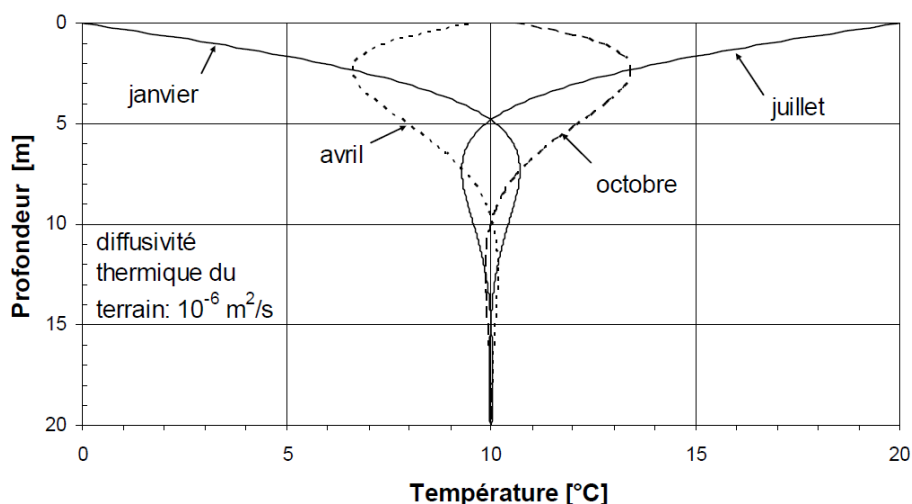


Fig.5. Profil de température du sous-sol en fonction de la saison.

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 réponse thermique effectués dans différentes zones géographiques en France, que la température moyenne du sous-sol sur une profondeur de 100m est supérieure d'environ 1 à 3°C à la température ambiante moyenne annuelle du lieu.

Par ailleurs, 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 17°C au sud.

La température initiale du terrain a été relevée à **12.2°C**, qui est une valeur parfaitement cohérente avec la situation géographique du site, puisque la température ambiante moyenne annuelle sur PONTARME est de 11°C.

Projet : Château de PONTARME	Document N° : ETD150502	Date : 29/05/15
Client : SNC Philippe LEFEVRE et Cie	Révision : A	Page : 10 / 30



Tab.4. TEMPERATURE INITIALE DU SOUS-SOL T_0

Température initiale mesurée T_0 :	12.20°C
--------------------------------------	---------

4.4.2 Conductivité moyenne du sous-sol (λ)

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

La figure 6 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.

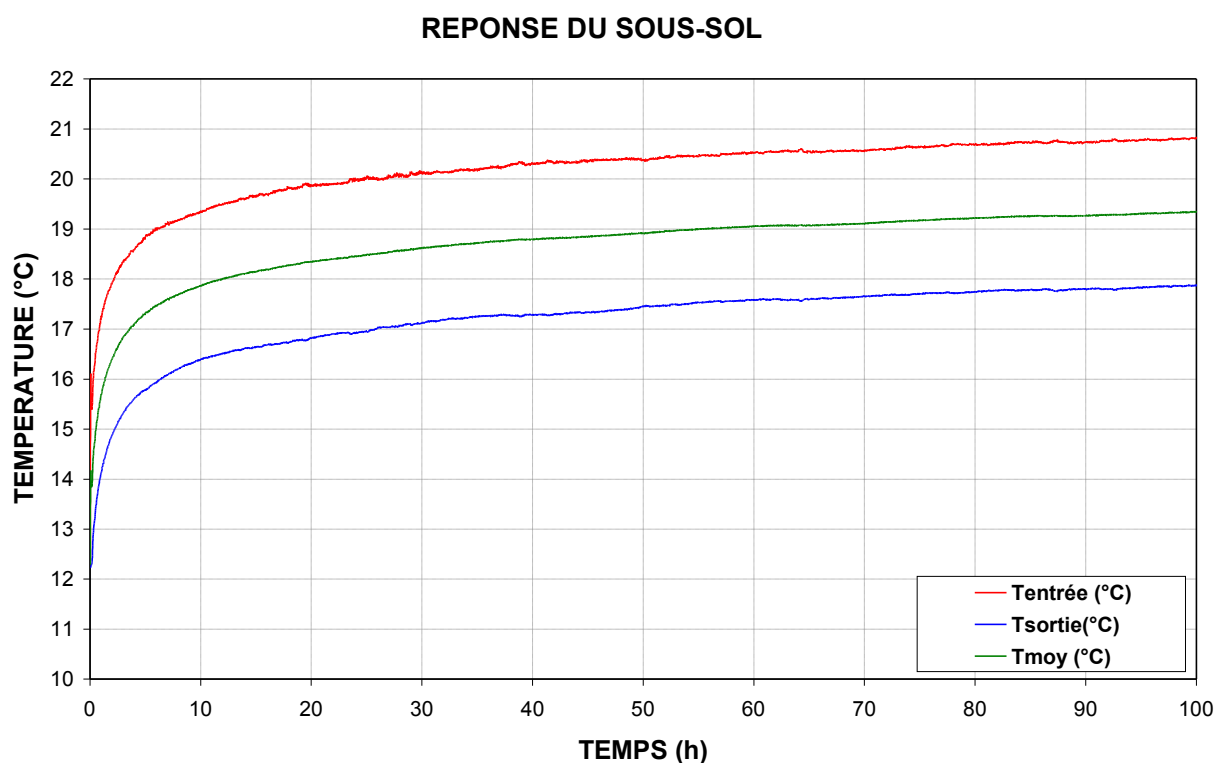


Fig.6. Evolution des températures du fluide durant le test.



B. 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 7 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.

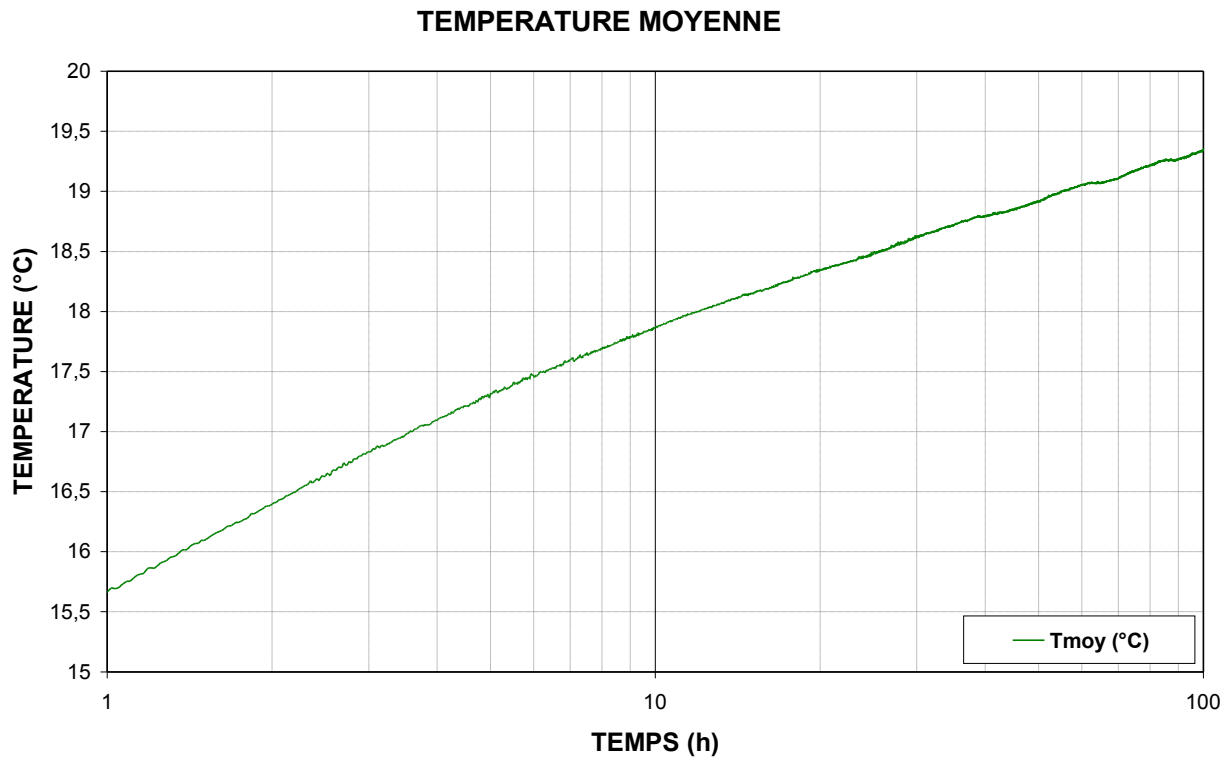


Fig.7. Température moyenne, en échelle logarithmique du temps.



C. 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 8 ci-dessous présente, après 10h de test, la courbe de tendance logarithmique approximant le mieux la courbe de température moyenne.

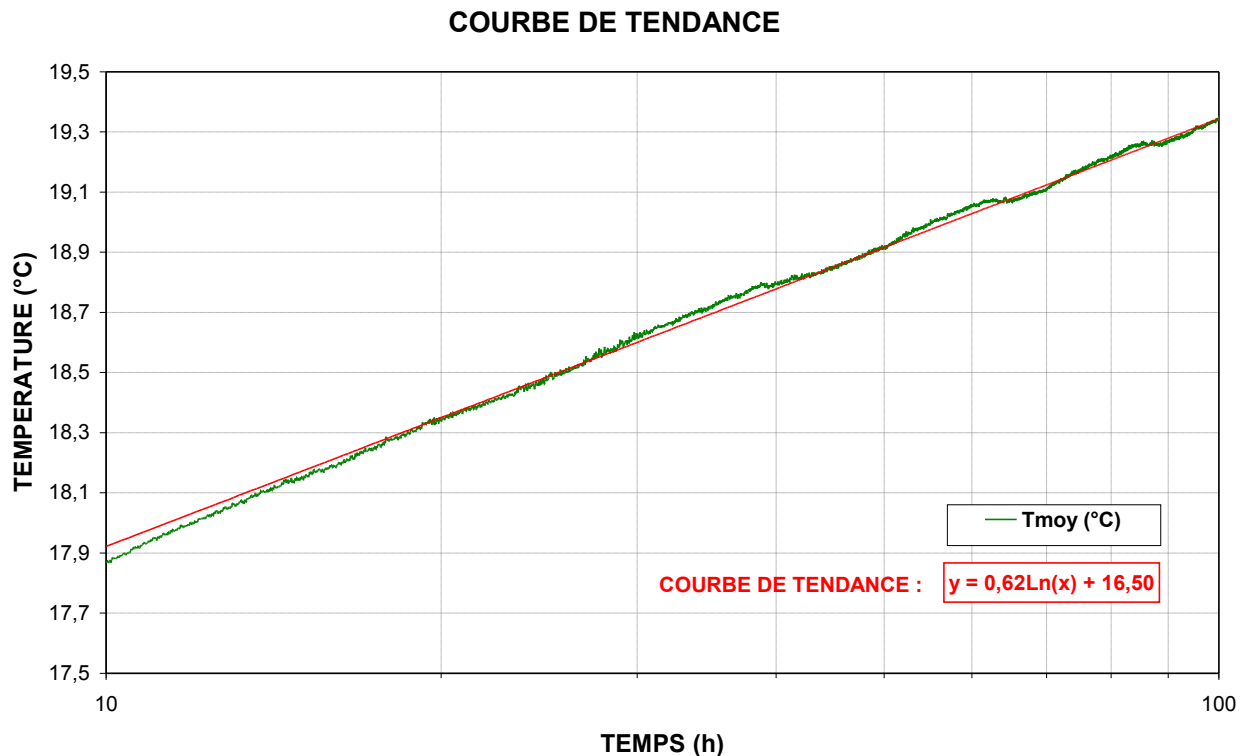


Fig.8. Courbe de tendance logarithmique approximant Tmoy.

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

Tab.5. COURBE DE TENDANCE LOGARITHMIQUE	
Courbe de tendance $Y(t) = k \cdot \ln(t) + C$	$Y(t) = 0.62 \ln(t) + 16.50$



D. 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 :	5.13 W/m.K
--------------------------	------------

4.4.3 Chaleur spécifique moyenne du sous-sol (C_p)

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.

La chaleur spécifique du sous-sol ainsi évaluée, est indiquée dans le tableau 7 ci-dessous.

Tab.7. CHALEUR SPECIFIQUE DU SOUS-SOL C_p

Chaleur spécifique C_p :	2.45 MJ/m ³ .K
----------------------------	---------------------------

4.4.4 Résistance équivalente de la sonde (R_b)

La résistance équivalente de la sonde R_b 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 R_b

Résistance R_b :	0.083 m.K/W
--------------------	-------------

Cette valeur de résistance équivalente R_b , mesurée à 0.083m.K/W, correspond aux valeurs typiquement mesurées sur des sondes cimentées avec un coulis géothermique à conductivité élevée : entre 0.07 et 0.10 m.K/W.



4.4.5 Résumé des résultats

Les paramètres mesurés par le test de réponse thermique sont résumés dans le tableau 9 ci-dessous. Pour chacun des 4 paramètres, l'incertitude sur la mesure, due aux diverses incertitudes de la chaîne de mesure (capteurs, cartes d'acquisition,...), est indiquée dans le tableau.

Tab.9. RESULTATS DU TEST DE REPONSE THERMIQUE

PARAMETRE	RESULTAT	INCERTITUDE
Température initiale du sous-sol T₀ :	12.20 °C	±0.10 °C
Conductivité du sous-sol λ :	5.13 W/m.K	±0.05 W/m.K
Chaleur spécifique du sous-sol C_p :	2.45 MJ/m ³ .K	±0.20 MJ/m ³ .K
Résistance de la sonde R_b :	0.083 m.K/W	±0.010 m.K/W

4.5 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 (5.13 W/mK) est très élevée. D'après la référence [1], la conductivité des sables saturés d'eau peut atteindre de telles valeurs : entre 1.7 et 5 W/m.K, avec une moyenne à 2.4 W/m.K; et les calcaires peuvent également présenter une conductivité élevée : entre 2.5 et 4 W/m.K, avec une moyenne à 2.8 W/m.K. Compte tenu de la géologie locale, il n'est donc pas surprenant de mesurer une conductivité moyenne du sous-sol élevée. Mais une telle valeur mesurée de conductivité peut également s'expliquer par l'influence des écoulements souterrains, qui ont été mis en évidence au cours de l'étude de faisabilité ^[5].

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 s'échelonnent de 10°C au nord à plus de 17°C au sud.

La température initiale du sous-sol qui a été mesurée (12.2°C) n'est pas très élevée, mais cette valeur est tout à fait cohérente avec la situation géographique du site puisqu'elle est supérieure de 1.2°C à la température moyenne annuelle à PONTARME (11.0°C).

En conclusion, le sous-sol présente une excellente conductivité thermique, une hydrogéologie très favorable, et une température correcte pour la zone géographique. Le site peut être considéré comme très favorable pour l'utilisation de la géothermie sur sondes verticales.