

Dopage thermique de la bentonite pour l'intensification des transferts thermiques en géothermie basse température.

Fabien DELALEUX ^{1-2*}, Xavier PY¹, Régis OLIVES ¹, Antoine DOMINGUEZ ²

¹Laboratoire PROCédés Matériaux Energie Solaire PROMES-CNRS UPR 8521
Rambla de la Thermodynamique, Tecnosud - 66100 Perpignan

²Dominguez-Energie

18, rue des Martins Pêcheurs – 66700 Argelès sur Mer

* (auteur correspondant : fabien.delaleux@promes.cnrs.fr)

Résumé - Une sonde géothermique se compose généralement d'un forage profond pouvant aller jusqu'à plusieurs centaines de mètres, dans lequel se trouvent deux tubes en U de polyéthylène haute densité (PEHD), servant à faire circuler le fluide, et un coulis de scellement appelé bentonite, sorte de béton liquide, utilisé pour colmater le forage comme le montre la vue en coupe ci-dessous :

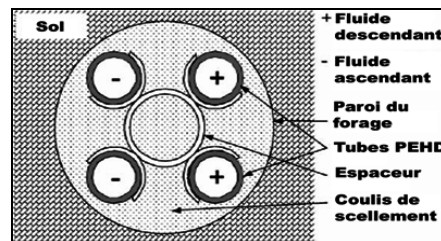


Figure 1 : Vue en coupe d'un forage géothermique

Le principal coût dans une installation géothermique est le forage en lui-même. Une piste à étudier est l'amélioration de la conductivité thermique du coulis de scellement (bentonite) pour intensifier les échanges thermiques et ainsi diminuer la profondeur du forage et par la même occasion les coûts.

Nomenclature

GNE Graphite naturel expansé
GNEg GNE compressé puis broyé
GNEgx GNEg de masse volumique x
 q quantité de dopant, % m

Symboles grecs

λ conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$

Indices et exposants

b bentonite

1. Introduction

Le matériel utilisé pour la réalisation d'une sonde géothermique est simple ; elle est composée de tubes en polyéthylène enrobés dans un coulis de scellement appelé bentonite. Ce matériau est également utilisé dans des applications de confinement de déchets radioactifs [1]. Cette technologie a fait preuve de son bon fonctionnement, mais très peu voire aucune étude n'a été menée jusqu'à présent pour améliorer les transferts thermiques associés à cette technologie. L'expérience des installateurs nous donne une valeur de puissance linéaire extraite grâce à une sonde géothermique de l'ordre de $50W.m^{-1}$; valeur qui nous semble être possible d'augmenter, limitant ainsi les profondeurs de forage nécessaires pour une même puissance. Toutefois, il est important de conserver les matériaux utilisés. Pour obtenir des

améliorations à coûts restant raisonnables, il est judicieux d'étudier, dans un premier temps, l'optimisation du système utilisé actuellement.

2. Etude préliminaire

La figure 2 montre le profil de température obtenu en extraction d'énergie, entre le fluide (eau glycolée en général) et le sous-sol environnant. L'origine du graphe correspond au centre d'un des tubes de la sonde. Nous pouvons voir que le gradient thermique le plus important se trouve dans la bentonite, qui a une conductivité thermique entre $1,5$ et $2 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. La bentonite étant une sorte de ciment, améliorer sa conductivité thermique nous semble être une solution adaptée pour intensifier les transferts thermiques.

Nous avons, par simulation avec le logiciel Comsol, augmenté artificiellement la conductivité thermique de la bentonite afin de voir son effet sur les transferts thermiques. Ces résultats sont reportés sur la figure 3. Pour une valeur de conductivité classique, le gradient thermique observé dans la bentonite est de l'ordre de 4°C sur environ 3 cm , puis il diminue fortement ($1,5^\circ\text{C}$ environ) jusqu'à une conductivité de $4 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour se stabiliser ensuite (1°C pour $\lambda = 7 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$). Pour cette dernière valeur de conductivité, le facteur limitant n'est plus la bentonite mais le sol lui-même. Cette première étude nous montre donc qu'il est possible de ne plus être limité par la sonde géothermique elle-même si on augmente suffisamment la conductivité thermique de la bentonite

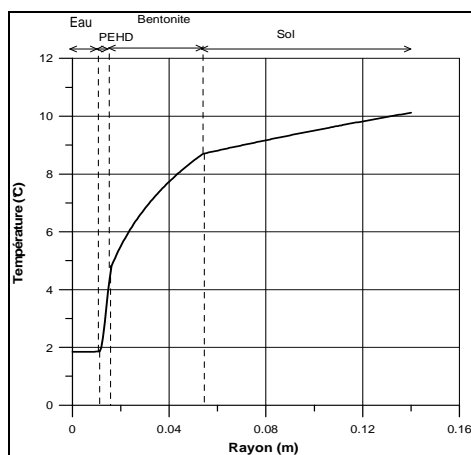


Figure 2 : Evolution de la température dans un forage géothermique

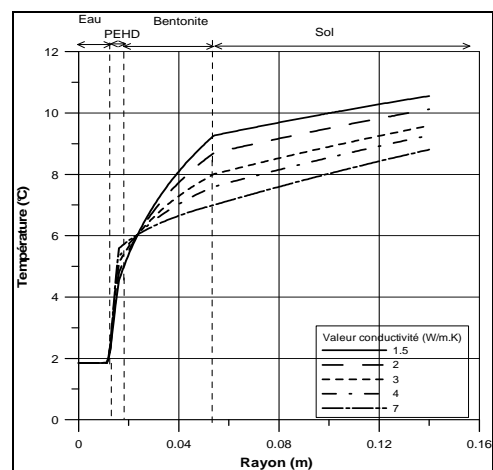


Figure 3 : Evolution de la température dans un forage pour différentes valeurs de conductivité thermique de la bentonite

On retrouve cette évolution sur la figure 4, la résistance thermique globale d'un forage géothermique de diamètre classique (160 mm) chute quand la conductivité de la bentonite augmente jusqu'à se stabiliser pour une valeur de λ_b de 4 à $5 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. A cette valeur là, il est très clair que la bentonite n'est plus la résistance thermique principale du forage et va permettre comme le montre la figure 5, un gain en puissance linéaire extraite important. L'augmentation de la conductivité thermique de la bentonite de sa valeur initiale comprise entre $1,5$ et $2 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ à une valeur de $5 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, permet un gain en puissance d'environ 50% . Nous pouvons donc fixer comme un objectif à cette étude la valeur cible de λ_b à atteindre de $5 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Cette valeur semble être un bon compromis pour obtenir un gain en puissance suffisant.

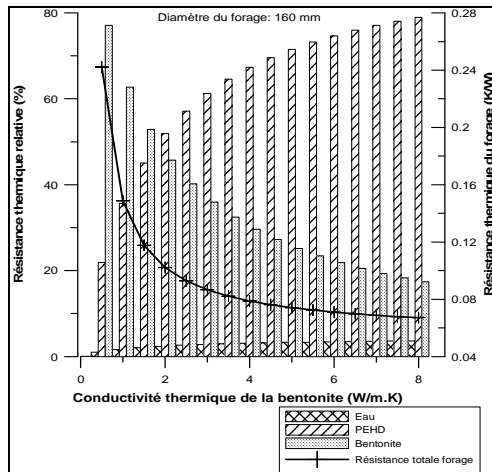


Figure 4 : Résistance thermique d'un forage en fonction de la conductivité thermique de la bentonite

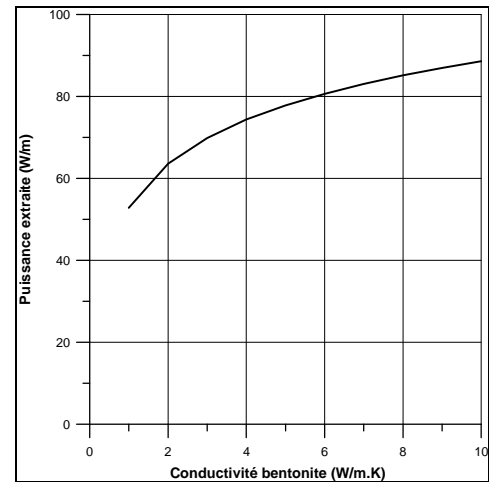


Figure 5 : Puissance linéaire extraite par un forage en fonction de la conductivité de la bentonite

Le laboratoire PROMES possédant une expérience importante en matière d'élaboration de composites à forte conductivité thermique, la solution retenue pour améliorer la conductivité thermique de la bentonite est de réaliser des dopages au graphite. La première étape consiste à tester différents types de graphite pour sélectionner celui qui donne les meilleurs résultats.

3. Dopage avec différentes formes de graphite

Plusieurs types de mise forme du graphite sont possibles. Nous avons décidé d'étudier le graphite sous deux formes : les paillettes et le graphite naturel expansé (GNE). Plusieurs tailles de paillettes de graphite ont été testées (T75, T115, KS150 et KS300) afin de concentrer les essais sur la taille qui nous donne les meilleurs résultats.

3.1. Dopage au graphite KS300

Les essais ont montré que la taille de paillettes qui donnait les meilleurs résultats était le KS300. On peut expliquer le fait que le dopage avec ce type de graphite soit le plus efficace grâce à sa taille comprise entre 500 et 1000 μm , à comparer au T15 qui est compris entre 40 et 60 μm par exemple. La taille de ces paillettes plus importante que les autres, leur permet d'être plus facilement en contact les unes aux autres et ainsi favoriser le transfert de chaleur par conduction à l'intérieur du matériau composite. Dans le cas des paillettes plus fines, le graphite est dispersé dans le composite et ne crée pas, par conséquent, de réseau de transfert de chaleur qui améliorerait de manière significative la conductivité thermique du composite.

Les résultats des essais de dopage au graphite KS300 sont représentés dans la figure 6. Les points représentent les valeurs moyennes ainsi que les valeurs minimales et maximales obtenues au cours des différents essais.

Les résultats expérimentaux permettent de tracer une courbe de tendance de la conductivité thermique du composite, en fonction de la quantité de dopant KS300 :

$$\lambda = 2,3 + 0,7.q^{0,55} \quad (1)$$

3.2. Dopage au GNEg

Un autre type de mise en forme de graphite a été testée, le GNE. Le GNE sous forme de vermicules n'était pas intéressant, de part son caractère très poreux qui aurait entraîné des composites peu conducteurs et à tenues mécaniques réduites. Pour allier ses caractéristiques thermiques à une bonne tenue mécanique de notre composite, la solution d'utiliser le GNE compressé puis broyé afin d'obtenir des particules de GNE beaucoup plus denses, a été choisie. En effet, le GNE a une masse volumique de 3 kg/m^3 , alors que le GNEg réalisé a lui une masse volumique de 100 kg/m^3 , noté GNEg100. Les résultats expérimentaux sont reportés dans la figure 6. Nous pouvons déduire des résultats expérimentaux une courbe de tendance de la conductivité thermique obtenue en fonction de la quantité de GNEg100, qui suit une allure comparable aux résultats obtenus avec le KS300, mais avec des valeurs de conductivités plus importantes. On note également une chute de ces valeurs pour un dopage supérieur à 15%.

3.3. Comparaison

Une étude de dopage thermique de la bentonite avec du graphite a été menée par M Jobmann et al [2] en 2009. Cette étude a permis d'établir une corrélation entre la conductivité thermique du composite et la quantité de dopant de la forme :

$$\lambda = \frac{c_1}{1 + \exp[-c_2 \cdot (q - c_3)]} \quad (2)$$

Avec $c_1 = 11,74$; $c_2 = 0,079$ et $c_3 = 30,74$.

Nous pouvons comparer nos résultats obtenus avec un dopage au KS300 puis au GNEg100 avec la corrélation décrite par M Jobmann. Cette comparaison est représentée par la figure 6.

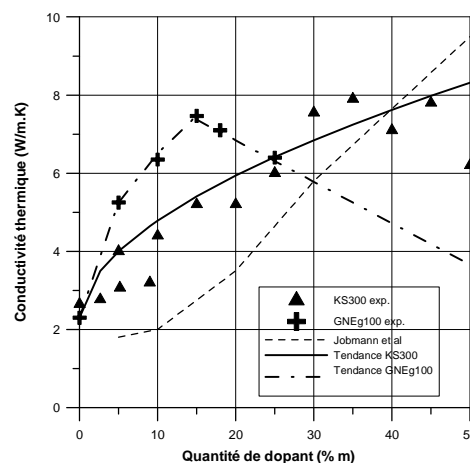


Figure 6 : Comparaison entre différentes formes de dopants

En reprenant notre valeur cible de $5 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ définie par l'étude préliminaire, les résultats de dopage effectués par Jobmann donnent une quantité de graphite égale à environ 25%, que nous pouvons comparer aux 10 à 15% pour le dopage au KS300 et aux 5% obtenus avec un dopage au GNEg100. Les résultats obtenus avec le GNEg apportent une amélioration aux travaux antérieurs effectués.

Les quantités de dopant introduit dans le mélange ne sont pas les seuls facteurs influents sur la conductivité thermique du composite obtenu. En effet d'autres paramètres entrent en jeu

comme la masse volumique de GNEg, la teneur en eau du mélange et le diamètre du forage réalisé.

4. Autres paramètres influents

4.1. Masse volumique du GNEg utilisé

Le GNEg étant du GNE sous forme de vermicules compressés puis broyés, on peut facilement jouer sur sa masse volumique en le comprimant plus ou moins. Notre approche a été de réaliser du GNEg de masse volumique 20 à 150 kg/m³ et de voir l'effet de ce paramètre sur la conductivité thermique du composite. La figure 7 nous montre ces résultats.

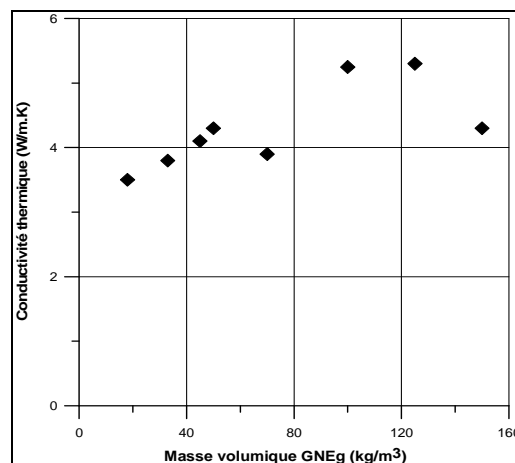


Figure 7 : Conductivité thermique de la bentonite dopée à 5% de GNEg

Les essais sont réalisés avec un taux de dopage de 5%. Pour du GNEg20 à GNEg100, la conductivité thermique augmente de 3 à 5 W/m.K, avant de se stabiliser et de chuter à partir d'une masse volumique de 120 kg/m³. La courbe présente un optimum qui se trouve être entre 100 et 120 kg/m³. Ceci s'explique par le fait qu'un GNEg de faible masse volumique, a une forte porosité et a donc une conductivité thermique plus faible. Ensuite, au-delà de 120 kg/m³, on diminue le volume total de GNEg présent dans l'échantillon et les probabilités de créer des liaisons entre les particules de graphite diminuent.

4.2. Teneur en eau

Lors des essais, le même protocole expérimental a été respecté tant au niveau du dosage donné par le fabricant de la bentonite, qu'au niveau du temps de séchage de l'échantillon, fixé à 24 heures, entre la réalisation et le passage au banc de conductivité pour la mesure. Malgré toutes les précautions prises pour respecter le protocole établi, les valeurs de conductivité obtenues pour un même taux de dopage varient d'un échantillon à l'autre de manière significative. Une piste à étudier est l'influence de la teneur en eau du composite sur sa conductivité thermique. En effet, l'apport d'eau dans un matériau peu conducteur comme la bentonite, améliore la conductivité thermique. Nous avons voulu tester ce paramètre, afin de quantifier l'effet de la teneur en eau et vérifier que les résultats de dopage au graphite ne sont pas noyés dans cet effet.

En respectant les dosages donnés par le fabricant de la bentonite, la teneur en eau initiale au moment de la réalisation de l'échantillon est de l'ordre de 45% massique et de 35% massique au moment de la mesure de conductivité. Un essai a été réalisé pour un matériau

non dopé et pour un matériau dopé à 10% de GNEg100 ; les résultats sont reportés sur la figure 8.

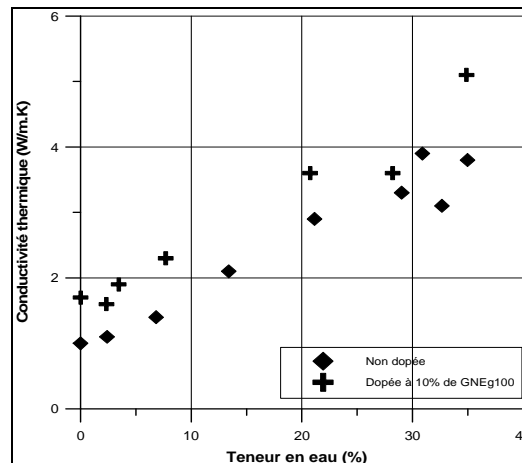


Figure 8 : Conductivité thermique de la bentonite en fonction de la teneur en eau

Ces résultats nous montrent une évolution linéaire de la conductivité thermique du composite en fonction de la teneur en eau. La pertinence d'un dopage au graphite est vérifiée, puisqu'à même teneur en eau, le composite reste plus conducteur que la bentonite seule. Les valeurs varient linéairement pour une bentonite non dopée de 1 à 4 W/m.K et de 1.8 à 5 W/m.K pour un matériau dopé.

5. Conclusion et perspectives

Les essais de dopage thermique de la bentonite pour intensifier les transferts thermiques en géothermie basse température ont donné des résultats satisfaisants. En effet la conductivité thermique de la bentonite peut être multipliée par 2 ou 3, permettant d'atteindre la valeur cible de $5 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ définie dans l'étude préliminaire. Cette valeur de conductivité de la bentonite, permet d'augmenter de 50% la puissance linéaire extraite du sous-sol par un forage et ainsi réduire les coûts d'investissement d'une installation géothermique. La suite de ce travail sera de définir des corrélations donnant la conductivité de la bentonite (et donc la puissance linéaire extraite) en fonction de tous les paramètres influent le transfert thermique (quantité de dopant, diamètre de forage, teneur en eau etc...). Des corrélations tenant compte de certains phénomènes ont déjà été établies par Ould-Lahoucine et al [3] en 2002 et Tang et al [4] en 2008. La dernière phase de ce travail sera de réaliser une étude technico-économique pour définir les rentabilités d'un tel procédé de dopage.

Références

- [1] R.N Yong, A.M.O Mohamed, I.S Shooshpasha, C Onofrei, Hydro-thermal performance of unsaturated bentonite-sand buffer material, *Engineering Geology* 47 (1997) 351-365
- [2] M Jobmann , G Buntebarth , Influence of graphite and quartz addition on the thermal-physical properties of bentonite for sealing heat-generating radioactive waste , *Applied Clay science* 44 (2009) 206-210
- [3] C Ould-Lahoucine, H Sakashita, T Kumada, Measurement of thermal conductivity of buffer materials and evaluation of existing correlations predicting it, *Nuclear Engineering and Design* 216 (2002) 1-11
- [4] A.M Tang, Y.J Cui, T.T Le, A study on the thermal conductivity of compacted bentonites, *Applied Clay Science* 41 (2008) 181-189

