
Evaluation de la durabilité d'un coulis géothermique

P. Monnot¹, C. Poinclou², Ph. Blanc¹, A. Rojo³, L. Molez⁴, C. Lanos³

¹ BRGM, Direction des Geo-ressources - Unité Ressources géothermales profondes et superficielles (3, avenue Claude-Guillemin, BP 36009 - 45060 Orléans cedex 2 – France)

² ANTEAGROUP (803 Boulevard Duhamel du Monceau, 45160 Olivet– France)

³ Univ Rennes, LGCGM EA 3913 (F-35000 Rennes, France – christophe.lanos@univ-rennes1.fr)

⁴ Univ Rennes, INSA, LGCGM EA 3913 (F-35000 Rennes, France – laurent.molez@insa-rennes.fr)

RÉSUMÉ. La durabilité d'un coulis géothermique est évaluée dans les conditions d'usage d'une sonde géothermique verticale. L'étude intègre une approche expérimentale et des modélisations géochimiques. Le vieillissement accéléré du coulis géothermique est évalué en laboratoire en reproduisant le type d'agressions géochimiques et thermiques auxquelles le coulis peut être soumis. Les paramètres liés à la conductivité thermique et la perméabilité sont particulièrement suivis. Un montage expérimental permet de reproduire les conditions d'exploitation d'une sonde géothermique dans des conditions de confinement réalistes. Les résultats expérimentaux alimentent des modèles de dégradation géochimique permettant de simuler sur une échelle de temps longue la dégradation autour de la sonde. Des conclusions portant sur la durée de service découlent de cette étude.

ABSTRACT. The durability of a geothermal grout used to seal vertical geothermal probe is evaluated. The study integrates an experimental approach and geochemical models simulations. The accelerated ageing of the geothermal grout is evaluated in laboratory subjecting the grout to realistic geochemical and thermal aggressions to which the grout can be subjected. The parameters related to the thermal conductivity and the permeability are particularly monitored. An experimental setting is developed to reproduce the operating conditions of a geothermic probe under realistic containment conditions. The experimental results are input of the geochemical degradation models leading to the simulation of long time scale degradation around the probe. Conclusions relating to the service life rise from this study.

MOTS-CLÉS : coulis géothermique, conductivité thermique, perméabilité.

KEY WORDS : geothermal grout, thermal conductivity, permeability.

1. Introduction

La durabilité des coulis géothermiques représente un enjeu majeur, car la réalisation des sondes géothermiques verticales (SGV) est confrontée à la difficulté de sceller « de façon continue et pérenne » des équipements (boucles de sonde) dans les forages réalisés dans le terrain encaissant. Dans un tel contexte, les principaux objectifs d'une bonne cimentation sont, d'assurer la protection de l'environnement en évitant notamment les infiltrations de surface ou la mise en connexion de plusieurs aquifères, d'assurer l'équilibre des contraintes mécaniques dans le forage, mais également d'optimiser le transfert de l'énergie (chaud et/ou froid) entre le sous-sol et l'échangeur. La particularité du comportement thermomécanique du coulis dans une sonde géothermique est principalement liée aux sollicitations thermiques associées au fonctionnement de la pompe à chaleur (en chaud ou en froid), ainsi qu'aux pics de fonctionnement à puissance maximale qui peuvent aboutir, dans le cas d'un dimensionnement inadapté de l'échangeur, au gel du coulis et des terrains. Pour garantir, sur le long terme (à minima la durée d'exploitation de la pompe à chaleur, si possible davantage), le bon scellement de l'ouvrage et les performances thermiques de l'installation géothermique, le coulis doit être à même de préserver sa capacité de transfert de chaleur (conductivité thermique), ainsi que ses propriétés mécaniques initiales et une stabilité physicochimique. Les travaux réalisés dans le cadre du projet DURACIM, ont pour principal objectif, de caractériser, en laboratoire, le vieillissement accéléré du coulis géothermique, en reproduisant les conditions

d'exploitation d'une sonde géothermique et d'agressions géochimiques auxquelles le coulis peut être soumis. Les phénomènes physiques observés et l'apparition d'éventuelles pathologies ont été couplés à un modèle géochimique permettant d'extrapoler, sur le long terme, la durabilité du coulis.

2. Approche expérimentale et modélisation des processus de dégradation

La méthodologie mise en œuvre pour évaluer la durabilité des coulis géothermiques repose sur le développement de deux dispositifs de caractérisation du coulis, l'interprétation des données thermomécaniques en liaison avec le vieillissement accéléré des échantillons en laboratoire et le développement des deux modèles géochimiques permettant de faire l'extrapolation du vieillissement accéléré sur une période de 25 ans.

Sur le plan expérimental, le projet s'articule autour de deux axes majeurs :

- Le développement d'un dispositif couplé, permettant de reproduire, à échelle réduite, le contexte de fonctionnement d'une SGV dans des conditions proches de celles d'un forage de ~200 m de profondeur. Ce dispositif permet de recréer les conditions de confinement du coulis dans une cellule œdométrique en acier, sous sollicitations thermiques, hydrauliques et contrainte mécanique constante (Figure 1).
- L'évaluation des conditions de dégradation d'éprouvettes de coulis géothermiques en dissociant les différents mécanismes d'altération (dispositif découplé). Ce dispositif permet d'immerger les éprouvettes de coulis dans un bain thermo-régulé, rempli de solutions plus ou moins agressives, sous contrainte atmosphérique.

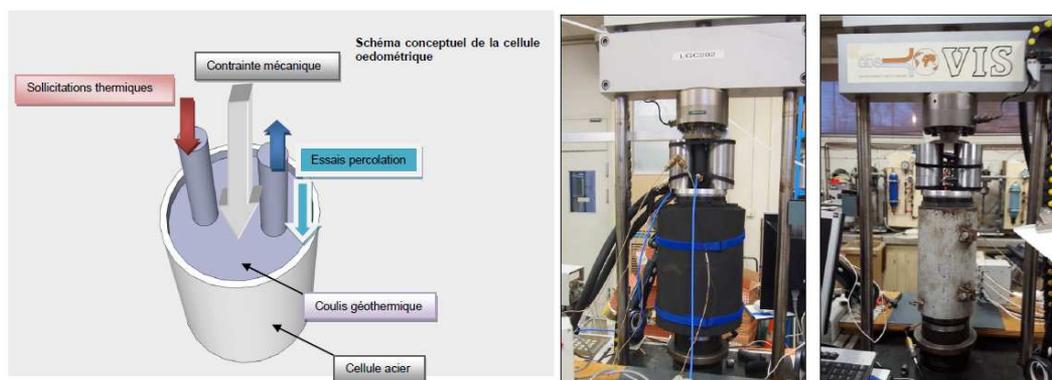


Figure 1. Schéma conceptuel et développement de la cellule œdométrique.

L'étude a été réalisée sur un coulis produit par un partenaire industriel (Heidelberg Cement). Le produit commercial retenu est le Thermocem, représentatif des produits disponibles sur le marché. La durabilité du coulis est évaluée en analysant l'évolution de deux indicateurs de performance :

- La conductivité thermique (λ), paramètre qui influence la capacité à transférer l'énergie (chaud – froid), depuis les terrains vers le fluide caloporteur de la sonde géothermique, et donc, les performances de l'installation géothermique ;
- La perméabilité hydrique (K), paramètre qui influence la capacité du coulis à empêcher les éventuelles contaminations depuis la surface vers les eaux souterraines, mais également à éviter la mise en connexion des éventuels aquifères, et donc, de protéger l'environnement.

L'analyse et le suivi de l'évolution de ces deux paramètres sont faites sur des éprouvettes de coulis ayant subi des sollicitations thermiques, des cycles de gel - dégel, ainsi qu'une agression chimique.

Parallèlement au développement de ces deux dispositifs expérimentaux, deux modèles géochimiques sont développés [BLA 10] :

- Le premier, dénommé « modèle coulis » est un modèle géochimique de l'altération du coulis sans transport des éléments chimiques. Ce modèle prend en compte l'influence de la température ainsi que des différentes solutions chimiques au contact du coulis. Le modèle fournit la composition minéralogique et la composition de la solution obtenue au bout d'un temps théoriquement infini. Ce modèle permet de situer les évolutions des paramètres analysées en fonction du temps.
- Le deuxième modèle géochimique, dénommé « modèle d'altération », permet la production de calculs avec différents scénarios de contextes hydrogéologiques. Sur la base des résultats obtenus sur le pilote d'essais (dispositif couplé), le premier modèle géochimique (modèle coulis) a été complété en intégrant une composante de transport, afin de simuler la percolation de la solution et les conséquences sur la stabilité chimique du coulis. La prise en compte de la diffusion/advection de la solution de percolation

permet d'introduire une composante cinétique dans la simulation. Les calculs réalisés permettent d'évaluer la cohérence entre les paramètres physiques mesurés et l'évolution des paramètres chimiques et minéralogiques.

3. Résultats

Un certain nombre de travaux ont étudié l'influence de la composition du coulis sur sa conductivité thermique : teneurs relatives en ciments pur, bentonite, eau et en quartz [TAN 07], [PAR 11], [ALL 00], [LEE 10], voire en graphite [JOB 09] [DEL 12]. Il ressort de ces études qu'un coulis constitué principalement de sable, de ciment et d'eau, avec un rapport massique sable/eau très élevé (compris entre 2,0 et 2,4), présente une conductivité thermique de l'ordre de $2,3 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$. La conductivité thermique de ce matériau est peu sensible à la teneur en eau (dessiccation), contrairement aux bentonites ou ciments [PER 09]. [ALL 00] a mesuré la conductivité hydraulique d'un échantillon de ce coulis, contenu dans un tube polyéthylène (PE) et a trouvé qu'elle est comprise entre 10^{-9} et 10^{-7} m.s^{-1} .

Plusieurs essais ont été réalisés dans le dispositif couplé. Afin de reproduire les conditions de fonctionnement d'une SGV, au cours d'un essai, différents cycles de température ont été réalisés, pouvant conduire au gel et au dégel du coulis. Durant l'essai une charge verticale est appliquée sur le coulis et les pressions de fluide en amont et en aval sont contrôlées afin de générer un gradient vertical de pression de fluide. Les températures sont mesurées en différents points de la section de coulis. Le matériau étudié se révèle être de très bonne qualité et aucune altération de ses performances (dans l'optique d'une application géothermique) n'a pu être observée.

Dans le dispositif découplé, différentes conditions de dégradation sont étudiées : dans un premier cas, les éprouvettes de coulis sont exposées à différentes solutions agressives (eau, eau gypseuse, eau acide) dans des conditions de température isothermes ; dans le second cas, en plus des solutions agressives, les éprouvettes sont exposées à des cycles journaliers de gel / dégel (Figure 2). La conductivité thermique est mesurée après différentes périodes d'exposition ou cycles de gel /dégel. La conductivité thermique est mesurée en condition immergée par la méthode au fil chaud, en régime transitoire. Les résultats indiquent qu'il y a très peu d'évolution, que ce soit en présence des cycles de gel / dégel ou non (Figure 3). La conductivité thermique reste supérieure à $1,5 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ dans les conditions de gel / dégel, et de l'ordre de $2 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ dans les conditions isothermes. La perméabilité hydrique est mesurée initialement, puis après différentes échéances. La mesure est effectuée en cellule triaxiale sous gradient de pression en régime permanent (confinement 800 kPa et gradient hydraulique de 10 m). Les résultats indiquent dans tous les cas que la perméabilité reste inférieure à 10^{-9} m.s^{-1} . Il n'y a pas d'évolution claire, des phénomènes de colmatage et de décolmatage ayant certainement lieu dus à la précipitation et à la dissolution d'espèces chimiques dans la porosité durant les différentes phases de conservation / altération.



Figure 2. Gauche : Etat des éprouvettes après chaque cycle d'exposition gel-dégel (haut : eau, milieu eau gypseuse, bas : eau acide). Droite : Illustration de la conservation des carottes immergées dans les bacs placés dans les boîtes thermo-régulées lors d'un essai en condition isotherme.

Les modèles géochimiques ont été « alimentés » à partir des données expérimentales (minéralogie, porosité, diffusion, coefficient de diffusion...). Les modèles sont en accord avec les faibles évolutions constatées expérimentalement. Des profils élémentaires réalisés au MEB sur des échantillons hydratés pendant 1 an semblent globalement en accord avec les prédictions du modèle. Par ailleurs, le modèle montre un accord entre les compositions des solutions des bains de conservation acquises au bout d'un mois et au bout d'un an d'hydratation, ce qui conforte l'approche. Du point de vue des résultats des modèles géochimiques, on constate que la seule modélisation géochimique appliquée à l'évolution de la conductivité thermique (λ) prédit une

augmentation à l'interface avec la solution. Mais elle prédit également, au bout de 30 ans, une disparition totale du liant hydraulique, dans une zone dont l'extension dépend du scénario envisagé (1 cm à 4 cm).

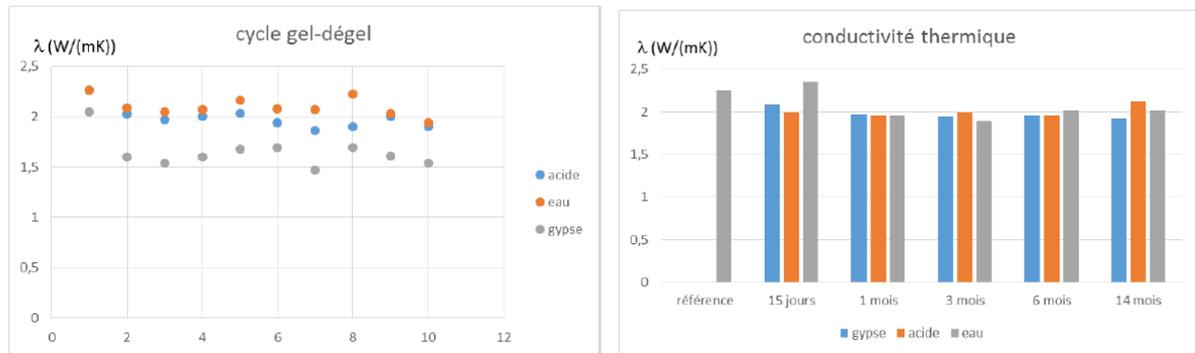


Figure 3. Evolution de la conductivité thermique - gauche : après chaque cycle gel-dégel pour les trois milieux de conservation - Droite : à chaque échéance pour les trois milieux de conservation.

4. Conclusions et perspectives

L'étude a montré que les dispositifs expérimentaux étaient adaptés à l'étude de la durabilité des sondes géothermiques verticales. Les dispositifs couplés et découplés permettent d'étudier les phénomènes d'altération des coulis géothermiques avec une bonne reproductibilité des mesures. Le matériau étudié s'est révélé être de très bonne qualité et aucune altération de ses performances (dans l'optique d'une application géothermique) n'a pu être observée. Une variabilité intrinsèque au matériau a pu masquer les évolutions de propriétés étudiées. Les modèles géochimiques indiquent toutefois une disparition totale du liant hydraulique en 30 ans.

En termes de perspectives, les travaux suivants sont envisagés :

- Poursuivre les expérimentations réalisées sur le coulis Thermocem sur des périodes plus longues et/ou un plus grand nombre de cycles gel-dégel, afin d'identifier les limites de durabilité de ce matériau ;
- Appliquer les protocoles établis lors du présent projet de recherche à différents types de coulis (géothermiques ou non), de compositions et provenances diverses ;
- Faire évoluer les protocoles en vue d'une normalisation : identifier les principaux paramètres qui influence la durabilité d'un coulis, réduire éventuellement les protocoles en conséquence et proposer un mode opératoire standard applicable en « routine ».

5. Remerciements

Duracim a été financé dans le cadre de la convention ADEME-BRGM-Université Rennes 1 n°1405C0037.

6. Bibliographie

- [BLA 10] Blanc, P., Bourbon, X., Lassin, A., Gaucher, E.C. (2010b). Chemical model for cement-based materials: Thermodynamic data assessment for phases other than C-S-H. *Cement and Concrete Research* 40:1360-1374.
- [TAN 07] Tang, A-M., Cui, Y-J. et Le, T-T. (2007). A study on the thermal conductivity of compacted bentonites. *Applied Clay Science*, Vol. 41, pp. 181-189.
- [PAR 11] Park, M., et al. (2011). Applicability of cement-based grout for ground heat exchanger considering heating-cooling cycles. *SCIENCE CHINA - Technological Sciences*, Vol. 54, 7, pp. 1661-1667.
- [ALL 00] Allan, M. L. (2000). Materials characterization of superplasticized cement±sand grout. *Cement and Concrete Research*. Vol. 30, pp. 937-942.
- [LEE 10] Lee, C., et al. (2010). Characteristics of thermally enhanced bentonite grouts for geothermal heat exchanger in South Korea. *SCIENCE CHINA Technological Sciences*, Vol. 53, 1, pp. 123-128.
- [JOB 09] Jobmann, M. et Buntebarth, G. (2009). Influence of graphite and quartz addition on the thermo-physical properties of bentonite for sealing heat-generating radioactive waste. *Applied Clay Science*, Vol. 44, pp. 206-210.
- [DEL 12] Delaleux, F., et al. (2012). Enhancement of geothermal borehole heat exchangers performances by improvement of bentonite grouts conductivity. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 33-34, pp. 92-99.
- [PER 09] Perry, R.L. et Smith, M.D. (2009). Borehole grouting: field studies and thermal performance testing. *ASHRAE Transactions*, Vol. 105.