
Durabilité de coulis géothermique

Rojo Amandine¹, Lanos Christophe¹, Molez Laurent²

¹ LGCGM, Equipe Matériaux Thermo-Rhéologie, Université de Rennes 1, mail : amandine.rojo@univ-rennes1.fr, christophe.lanos@univ-rennes1.fr

² LGCGM, Equipe Matériaux Thermo-Rhéologie, INSA de Rennes, mail : laurent.molez@insa-rennes.fr

RÉSUMÉ. Les énergies renouvelables comme la géothermie sont en perpétuel développement, dans le monde socio-économique actuel. Les coulis utilisés lors de la cimentation doivent assurer à la fois la pérennité de la sonde et la protection de l'environnement tout en optimisant les transferts d'énergie. Ce travail a pour but d'étudier l'évolution des propriétés de coulis géothermique pour sonde verticale de très basse énergie en circuit fermé soumis à des dégradations chimiques et thermiques. Les travaux sont réalisés sur un coulis géothermique commercial de formulation fixée mis en forme au laboratoire. Une caractérisation du matériau est effectuée par différentes techniques : conductivité thermique, résonance acoustique, vitesse de propagation des ondes, ... L'effet de la compaction est évalué via la caractérisation d'une carotte de 4 mètres de hauteur. La durabilité des matériaux soumis à des dégradations chimiques est étudiée en condition isotherme sur des périodes allant de l'hydratation à 1 an de conservation. Périodiquement, les propriétés physiques des matériaux sont étudiées. Les résultats obtenus lors des premiers mois d'étude sont présentés.

ABSTRACT. In the present socioeconomic context, the renewable energies as geothermal energy are in perpetual development. Grout used during the cementation have to guarantee, at the same time, the sustainability of geothermal probes and the environmental protection while optimizing the transfers of energy. The purpose of this work is to evaluate the durability of grout destined to closed-loop vertical geothermal probes of very low power exposed to chemical and thermal degradations. The study is achieved on a commercial geothermal grout with selected formulation implemented in the laboratory. The material characterization is carried out by using different techniques: thermal conductivity, acoustic resonance, waves propagation velocity, ... The effect of the compaction is evaluated via the characterization of a 4 meters height column. The durability of materials subjected to chemical degradations is studied under isothermal condition over periods going from the hydration to 1 year. Periodically, the physical properties of materials are studied. The results obtained during the first months of study are presented.

MOTS-CLÉS : Sonde géothermique, coulis géothermique, gel-dégel, durabilité, conductivité thermique.

KEY WORDS: Geothermal probe, geothermal grout, freeze-thaw, durability, thermal conductivity.

1. Introduction

Face à une consommation d'énergie croissante, les énergies renouvelables, alternatives aux énergies fossiles, sont en plein essor. La géothermie consiste à exploiter l'énergie contenue dans le sol et à l'utiliser pour le chauffage par pompe à chaleur ou sous forme d'eau chaude utilisée pour chauffer directement des habitations ou encore sous forme de vapeur pour produire de l'électricité. On distingue différents types de géothermies en fonction des ressources géologiques et de leur application. Pour chaque application, les techniques utilisées sont différentes. Nous nous intéressons dans ces travaux à la géothermie très basse énergie en circuit fermé. Ces sondes géothermiques sont principalement utilisées pour le chauffage de logements individuels. Elles sont utilisées dans les proches sous-sols (30-150 m) ne présentant pas d'aquifère. La chaleur diffuse est exploitée en implantant dans la terre, verticalement ou horizontalement, des capteurs chargés d'un fluide caloporteur. Nous étudions le cas d'échangeurs thermiques verticaux. La géothermie bien que de plus en plus utilisée présente peu de recul vis-à-vis de la durée de vie des sondes, des coulis, enjeu majeur pour l'avenir de la géothermie. En effet, les coulis utilisés lors de la cimentation doivent assurer à la fois la pérennité de la sonde et la protection de l'environnement, en évitant les échanges d'eau entre nappes, tout en optimisant les transferts d'énergie.

La littérature plutôt rare sur le sujet, présente des travaux de formulation, basé sur les propriétés rhéologiques du coulis et sur ses propriétés physiques au cours de l'hydratation. Les principaux coulis étudiés sont à base de ciment, de silice et/ou de calcite, avec possible ajout de bentonite, de graphite. Ces ajouts permettent, entre autre, pour une quantité d'ajout choisie d'améliorer considérablement la conductivité thermique du matériau initiale [BOR 13] [DEL 12] [ERO 14] [LEE 10] [NAU 13] [PAR 11]. La durabilité de tels coulis est étudiée en cycle de gel/dégel. Dans certain cas, l'ensemble du système est étudié en fonctionnement, l'échange de chaleur étant réalisé par circulation d'un fluide d'échange dans un tube en U scellé dans un terrain représentatif de conditions réelles de fonctionnement. Les résultats obtenus sont très dépendant des systèmes expérimentaux développés, des techniques de caractérisation et des matériaux étudiés [BOR 14] [ERO 16] [IND 15]. En parallèle, des modèles numériques sont développés pour améliorer les mesures et calculs des propriétés thermiques et ainsi mieux estimer le dimensionnement de telle sonde [LAM 10] [MAR 08].

Nous étudions l'évolution des propriétés de coulis géothermique soumis à des dégradations chimiques et thermiques. Les essais sont réalisés sur des matériaux subissant des altérations accélérées dans un contexte géotechnique réaliste. Nous nous intéressons, d'une part, aux possibles effets de compaction lors de la mise en œuvre de la cimentation du forage par l'étude d'une colonne cylindrique de 4 mètres de hauteur. D'autre part, la durabilité de ces matériaux soumis à des dégradations chimiques en condition isotherme est étudiée sur des périodes allant de l'hydratation à 1 année de conservation. A chaque échéance, les propriétés physiques des matériaux sont étudiées. Le travail est mené sur un coulis géothermique commercial mis en œuvre au laboratoire selon les prescriptions du fournisseur. Une caractérisation initiale du matériau hydraté (28 jours) est effectuée. Les résultats obtenus lors des premiers mois d'étude sont présentés dans cet article. Ces travaux sont réalisés dans le cadre du projet DURACIM, en collaboration avec l'ADEME, le BRGM et Antéa, qui a pour objectifs d'étudier le vieillissement des coulis et sondes géothermiques verticales en fonctionnement, et à terme de développer une méthodologie prédictive pour évaluer la durabilité des coulis dans le temps.

2. Matériaux et méthodes

2.1. Préparation des échantillons

Le matériau étudié dans ces travaux est un coulis géothermique commercial (Thermocem Plus– Heidelberg). La matière première est caractérisée par diffraction des rayons X et fluorescence X (Figure 1). Le diffractogramme met en avant la présence de graphite qui masque le reste de l'analyse. L'analyse élémentaire souligne la présence de ciment et/ou de laitier, d'argiles, probablement de la bentonite, ainsi que de forte teneur en élément S. Le coulis est préparé au laboratoire en suivant les recommandations fournisseurs. Nous travaillons donc à formulation fixée (rapport massique eau / liant de 0,8). Le mélange eau/coulis est malaxé jusqu'à obtenir la rhéologie voulue. La viscosité et la masse volumique sont mesurées à l'aide du cône de viscosité de Marsh (temps d'écoulement supérieure à 60 s). Le coulis est alors mis en forme par moulage. Afin d'effectuer la caractérisation initiale et l'étude de durabilité, des blocs de 210 x 350 x 250 mm³ sont coulés. Les blocs sont conservés en milieu humide jusqu'à durcissement total du produit estimé à 28 jours. Des carottes sont prélevées dans chacun de ces blocs en distinguant la partie haute et la partie basse de ces blocs. Chaque bloc permet d'extraire 2 carottes de diamètre 100 mm et 4 carottes de diamètre 50 mm. Une éprouvette cylindriques de 4 mètres de hauteur et de 35 mm de diamètre a également été coulée afin d'étudier les possibles effets de compaction. Cette colonne est conservée à l'air libre sans traitement particulier.

Une caractérisation initiale du matériau hydraté est effectuée par différentes techniques : conductivité

thermique, résonance acoustique, vitesse de propagation des ondes, comportement mécanique, perméabilité, ... La durabilité des produits hydratés est étudiée sur des périodes allant de l'hydratation (28 jours) à un 1 an. Les matériaux hydratés sont conservés en condition isotherme dans différentes solutions. Des boîtes calorifugées ont été confectionnées au laboratoire pour assurer la conservation des échantillons. Le fond de ces boîtes est constitué d'un échangeur thermique qui assure la régulation en température par circulation d'un liquide caloporteur thermostaté. Trois milieux de conservation sont retenus : eau, eau gypseuse et acide sulfurique. A chaque échéance, les matériaux sont retirés des milieux de conservation et conservés sous vide jusqu'à leur caractérisation.

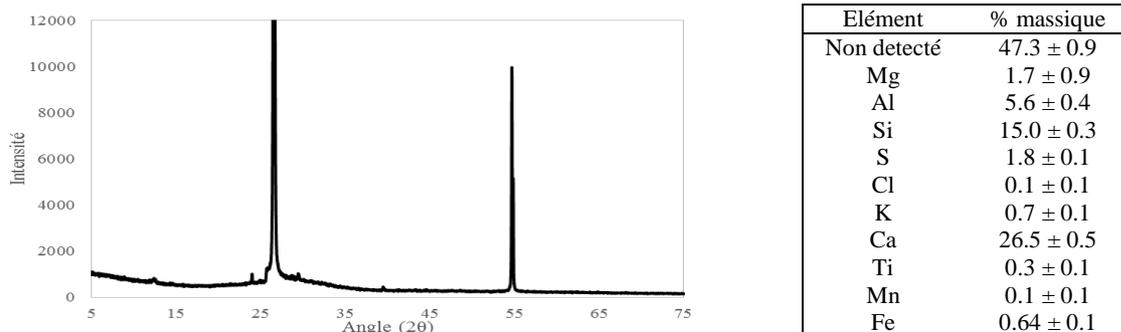


Figure 1. Diffractogramme et analyse élémentaire du coulis géothermique.

La colonne de 4 mètre est découpée en cylindres de 110mm de hauteur intercalés de cylindres de 20mm de hauteur. Les premiers sont destinés aux mesures de résonance acoustique, de vitesse des ondes et de conductivité thermique. Des mesures de porosité et de masse volumique sont réalisées sur les échantillons de 20mm de hauteur.

2.2. Techniques de caractérisation

2.2.1. Conductivité thermique

La conductivité thermique est mesurée par la technique du fil chaud. Cet essai consiste à placer un fil chauffant entre les surfaces de deux échantillons du matériau à caractériser. L'équilibre thermique du matériau est perturbé par l'impulsion d'une quantité de chaleur délivrée par effet joule. Le suivi de l'évolution de la température à proximité du fil permet d'estimer la conductivité thermique par régression linéaire $\Delta T = f(\ln(t))$.

Les mesures sont faites avec un CT-mètre équipé d'une sonde fil constitué d'un élément chauffant de 5cm de longueur. Pour l'ensemble des essais, les conditions expérimentales sont identiques. La durée de mesure est de 120 secondes avec un pas de 1 seconde et la puissance effective est de 3,284 W.

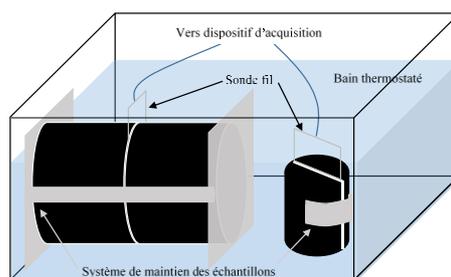


Figure 2. Dispositif de mesure de conductivité thermique en milieu immergé.

Pour limiter les problèmes de saturation/désaturation des échantillons, le système est maintenu immergé dans un bain thermostaté à 18°C pendant la durée des essais et au minimum six heures avant les mesures. Deux systèmes de mesures ont été développés l'un adapté pour des échantillons de 100 mm de diamètre (Figure 2), l'autre pour des échantillons de diamètre inférieur à 50 mm. Le premier permet de placer la sonde entre deux échantillons identiques dans une configuration horizontale, permettant de conserver le système immergé. Les échantillons de plus faible diamètre nécessite d'être coupé dans le plan longitudinal. La sonde est positionnée dans le plan de coupe. Afin de satisfaire les hypothèses du modèle de la sonde fil, une visualisation infrarouge permet de s'assurer que les dimensions des échantillons sont suffisantes.

Indépendamment de la taille des échantillons, la surface des échantillons à caractériser est systématiquement polie pour assurer un meilleur contact échantillons/sonde. La mesure de conductivité thermique est répétée au minimum 3 fois par échantillon.

2.2.2. Vitesse des ondes

La vitesse du son est mesurée par la détermination du temps de vol d'une impulsion acoustique à travers le matériau. La vitesse du son dans les matériaux est une fonction directe de leurs propriétés élastiques et de leur compacité : plus la porosité du matériau est faible, plus la propagation des ondes est rapide.

Les mesures de la vitesse de propagation des ondes sont réalisées à l'aide d'un appareil de test ultrasonique (Pundit Lab+). Des essais sont réalisés avec des transducteurs à ondes de cisaillement de 250 kHz et des transducteurs à ondes de compression de 54 kHz. Pour le matériau hydraté initial, les deux techniques sont utilisées, afin d'estimer le module de Young et le coefficient de Poisson du matériau. Seule l'évolution de la vitesse des ondes de compression est étudiée pour les éprouvettes subissant les altérations physiques et chimiques.

Les mesures sont réalisées sur des échantillons saturés en eau dont la surface est simplement essuyée, aucun couplant n'est utilisé. Chaque mesure est répétée 5 fois par échantillon.

Le module de Young et le coefficient de Poisson sont calculés à partir de l'inversion des équations donnant la vitesse de l'onde de compression V_p et la vitesse de l'onde de cisaillement V_s :

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad [1]$$

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad [2]$$

2.2.3. Fréquence de résonance acoustique

La détermination de la fréquence de résonance fondamentale du matériau est basée sur la mise en vibration de l'éprouvette par excitation harmonique. Seule une mesure de vibration longitudinale est réalisée dans ces travaux.

Les mesures sont réalisées à l'aide d'un ERUDITE MKIV. Il se compose d'un générateur à fréquence variable et de deux transducteurs, l'un émetteur et l'autre récepteur. Deux types de mesures sont réalisés. (i) un balayage fréquentiel automatique par pas de 5 Hz, qui permet de déterminer la fréquence de résonance sur une plage de fréquence donnée. (ii) un balayage fréquentiel manuelle qui permet d'étudier la distribution spectrale et l'aire du pic de résonance. L'intensité de l'onde émise est fixée par l'utilisateur, elle est de 0,05 V dans notre étude.

Les mesures sont, dans la mesure du possible, réalisées sur des échantillons d'éclatement 2 au minimum, comme le préconise la norme française NF P 18-414 [NFP 93]. L'échantillon à caractériser est suspendu en son centre, afin de limiter les perturbations du signal de résonance (Figure 3). Les transducteurs sont positionnés de part et d'autre de l'échantillon pour une mesure de vibration longitudinal. Le contact transducteur-échantillon est assuré par l'utilisation de pastilles métalliques apposées et maintenues avec de la graisse à vide.

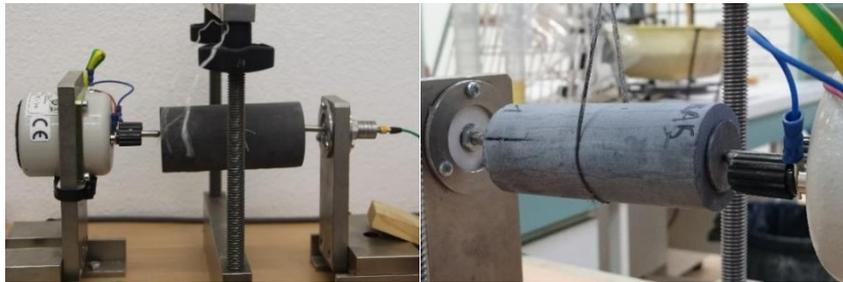


Figure 3. Dispositif expérimental utilisé pour la mesure de fréquence de résonance longitudinale.

Les mesures sont réalisées sur des échantillons saturés en eau dont la surface est simplement essuyée. Chaque mesure est au minimum répétée 3 fois par échantillon.

Les mesures de fréquence de résonance permettent de déterminer certaines propriétés élastiques du matériau comme le module d'élasticité dynamique, E , équation [3].

$$E = 4 f_r^2 l^2 \rho \cdot 10^{-12} \quad [3]$$

Avec f_r la fréquence de résonance en Hz,
 l la longueur de l'échantillon en mm,
 ρ la masse volumique de l'échantillon saturé en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

2.2.4. Essais mécaniques

Les essais mécaniques sont réalisés sur une presse Instron. Les essais de compression sont réalisés à vitesse de déplacement imposée ($2,5 \text{ mm.min}^{-1}$). Des séries de 3 cycles de charges/décharges sont réalisés, entre les contraintes suivantes 0,25 à 1,25 MPa, 0,25 à 2,5 MPa et 0,25 à 3,75 MPa.

Un essai de fluage est réalisé sous une contrainte de 2,5 MPa, ($\approx 50 \% R_c$). La vitesse de précharge est la même que celle des essais de compression $2,5 \text{ mm.min}^{-1}$. La durée de l'essai est de 100 minutes.

3. Résultats

3.1.1. Caractérisation du matériau initial

Les résultats des mesures réalisés sur le produit hydraté de référence sont présentés dans le Tableau 1. Ces mesures soulignent l'homogénéité des échantillons entre le haut et le bas des blocs coulés et la reproductibilité des mesures entre les échantillons de diamètre 100 mm et 50 mm. Le produit hydraté a une faible masse volumique apparente (à l'état saturé) : 1580 kg.m^{-3} . La vitesse de propagation des ondes de compression et des ondes de cisaillement sont de 2340 m.s^{-1} et de 1660 m.s^{-1} respectivement. Le coefficient de Poisson ainsi obtenu est de $0,31 \pm 0,04$. Les modules élastiques alors calculés sont de l'ordre de 5000 MPa. Ces résultats sont à mettre en parallèle de ceux obtenus par les mesures de résonance acoustique. Les deux techniques nous donnent un ordre de grandeur identique pour le module élastique. On note néanmoins que les résultats obtenus par la mesure de fréquence de résonance sont plus élevés que ceux obtenus par la mesure de vitesse de propagation des ondes. La conductivité thermique du matériau est de $3,3 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$ avec un écart type qui reste inférieur à 10% de la mesure sur des mesures de répétabilité. Cette valeur est relativement élevée comparée aux données de la littérature mais est conforme à la norme en vigueur [NFX 11]. Cette valeur est obtenue dans des conditions immergée alors que les données bibliographiques font référence à des mesures réalisées dans des conditions de saturation qui sont loin d'être maîtrisées.

Tableau 1. Caractérisation du produit hydraté à 28 jours

| Position dans le bloc | Diamètre (mm) | Masse volumique (kg.m^{-3}) | Module élastique (MPa) | | Conductivité thermique ($\text{W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$) |
|-----------------------------------|-------------------|--|-------------------------------------|----------------------------------|---|
| | | | Résonance acoustique (Elancement 2) | Vitesse des ondes (Elancement 1) | |
| Carottes de diamètre 100mm | | | | | |
| Haut | $112,87 \pm 0,40$ | 1565 ± 15 | 5611 ± 100 | 4870 ± 196 | $3,29 \pm 0,21$ |
| Bas | $113,17 \pm 0,14$ | 1586 ± 5 | 5644 ± 100 | 5376 ± 621 | $3,43 \pm 0,40$ |
| Moyenne | $113,02 \pm 0,33$ | 1575 ± 15 | 5628 ± 100 | 5123 ± 476 | $3,36 \pm 0,31$ |
| Carottes de diamètre 50mm | | | | | |
| Haut | $50,82 \pm 0,14$ | 1570 ± 20 | 5490 ± 530 | | |
| Bas | $50,86 \pm 0,09$ | 1590 ± 9 | 5880 ± 620 | | |
| Moyenne | $50,84 \pm 0,12$ | 1580 ± 18 | 5685 ± 590 | | |

3.1.2. Durabilité

L'évolution temporelle des propriétés physique du matériau hydraté est présentée sur la Figure 4 pour les différentes solutions de conservation au cours des trois premiers mois. Les échantillons ne présentent pas d'altération visible de l'état de surface. Seul un dépôt blanc est visible sur les échantillons conservés en solution d'eau gypseuse. La masse volumique, Figure 4a, décroît dans le temps quel que soit le milieu de conservation. Le milieu de conservation va altérer les propriétés du matériau plus ou moins rapidement. Vis-à-vis de la masse volumique, excepté pour l'échéance à 15 jours, l'eau gypseuse semble la plus pénalisante pour le matériau et l'eau la moins pénalisante. La conductivité thermique, Figure 4b, semble peu affectée par le milieu de conservation des échantillons. Une tendance de décroissance avec le temps de conservation apparaît. Cependant, la conductivité thermique reste élevée et supérieure à $2,5 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$. Les modules élastiques mesurés par fréquence de résonance et par vitesse des ondes sont représentés sur les Figure 4c et 4d respectivement. Les résultats obtenus par fréquence de résonance restent plus élevés que ceux obtenus par vitesse des ondes. Les mesures par fréquence de résonance montrent que les échantillons conservés dans l'eau voient leur module élastique augmenter avec le temps. Pour les autres milieux de conservation, le module diminue légèrement après la mise en cure, cependant il semble peu affecté par le temps de cure. Les mesures par vitesse des ondes montrent que le module élastique est plus faible

que celui du matériau de référence après 15 jours de cure, pour tous les milieux de conservation. Ce module croît avec le temps de cure, sa valeur semble peu affectée par le milieu de conservation. Ces essais doivent être complétés, notamment avec des essais mécaniques pour mieux comprendre et interpréter les phénomènes.

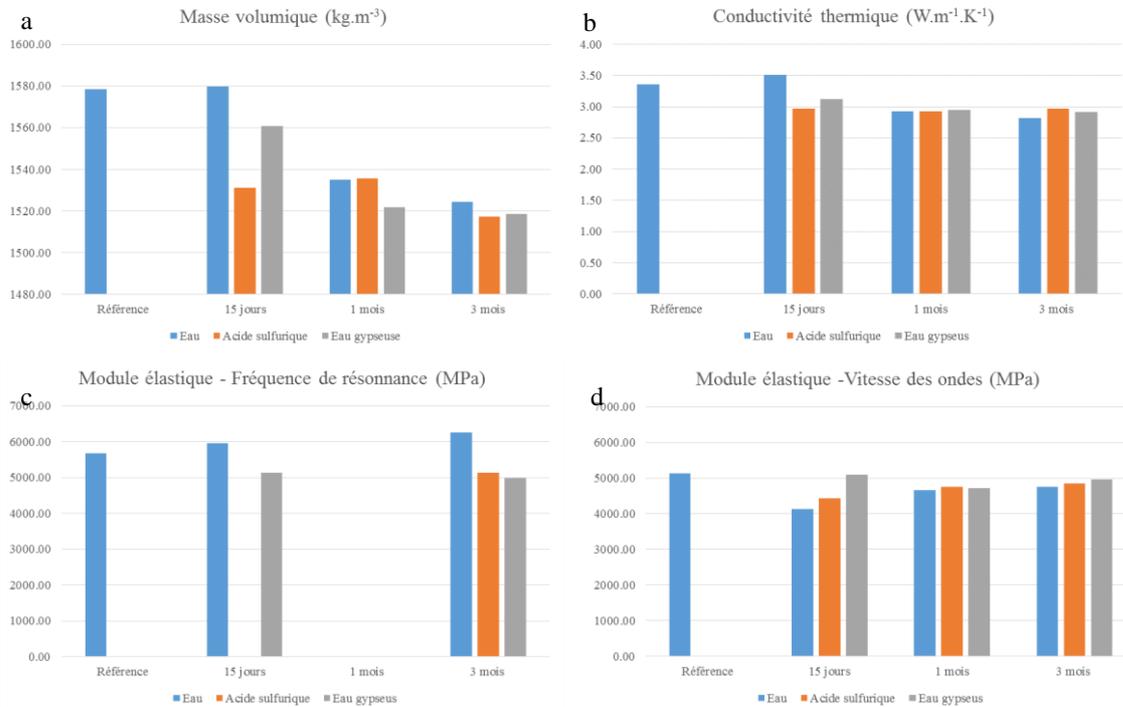


Figure 4. Suivi de **a.** la masse volumique, **b.** la conductivité thermique, **c.** le module élastique déterminé par mesures de fréquence de résonance et **d.** le module élastique déterminé par mesures de vitesse des ondes pour les différents milieux de conservation au cours des trois premiers mois d'essais.

3.1.3. Effet de compaction

Sur la colonne de 4 mètres, des mesures de masse volumiques et de porosité sont réalisées par pesée hydrostatique, les résultats obtenus sont présentés Figure 5. Malgré les aléas de mesures, on remarque que la masse volumique décroît avec la hauteur de colonne, et qu'à l'inverse la porosité tend à croître légèrement. On observe donc une évolution sensible de la matrice sur une hauteur de seulement 4 mètres. Nous sommes en présence d'un effet de compaction et/ou de migration d'espèces chimiques.

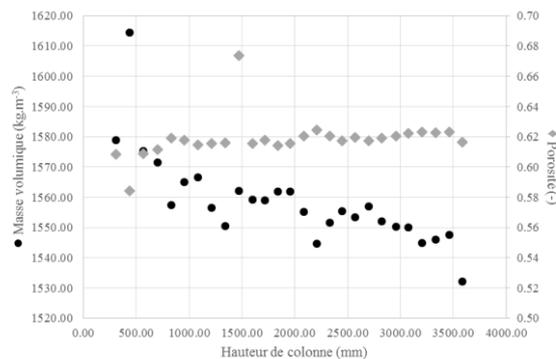


Figure 5. Masse volumique (●) et porosité (◆) mesurées suivant la hauteur de colonne. 0 est la référence au sol.

Les variations de la vitesse des ondes, de la fréquence de résonance, des modules élastiques et de la conductivité thermique en fonction de la hauteur sont illustrées sur la Figure 6. La vitesse des ondes reste quasi-constante dans le matériau. Nous sommes en présence d'un milieu très poreux. La vitesse des ondes est donc moins impactée par la variation de compacité du fait d'une forte présence d'eau. Sur le module, on conserve cette tendance, avec une possible diminution du module en haut de la colonne qui est liée à la diminution de la masse

volumique.

La fréquence de résonance du matériau est dépendante de la longueur de l'échantillon, afin de pouvoir comparer ces mesures on calcule le produit de la fréquence de résonance par la hauteur. Ce produit décroît avec la hauteur de colonne. Le module obtenu par résonance présente la même dépendance avec la hauteur. Cette décroissance s'accroît après 2,5 m.

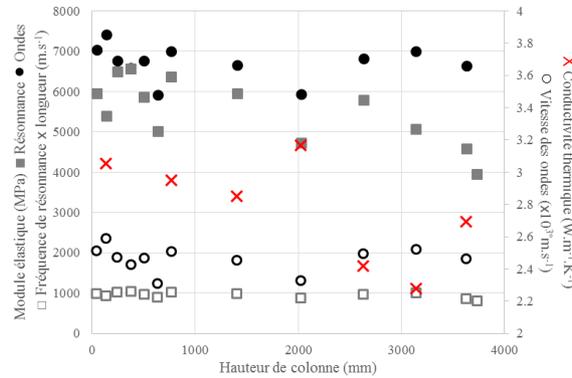


Figure 6. Evolution suivant la hauteur de la colonne des mesures de conductivité thermique (X), de vitesse des ondes (O), de la fréquence de résonance (□), et des modules élastiques obtenus par la technique de fréquence de résonance (■) et de vitesse des ondes (●).

Les modules élastiques mesurés par vitesse des ondes sont systématiquement supérieurs à ceux mesurés par fréquence de résonance, à l'inverse des résultats présentés Figure 4. Il est probable que les altérations subies par le matériau, de natures différentes pour les deux cas étudiés, n'impactent pas le matériau de manière similaire. Les deux techniques de mesure acoustiques sont visiblement fortement sensibles à ces évolutions. On peut également noter que la courbe présente quelques discontinuités qui semblent directement liées à la variation de masse volumique. Sur l'ensemble de la hauteur de la colonne, la conductivité thermique est supérieure à 2,4 W.m⁻¹.K⁻¹. Elle décroît avec la hauteur de colonne ce qui est directement lié à l'évolution de la masse volumique et de la porosité du matériau.

3.1.4. Mise en évidence des effets de compaction par essai mécanique

Des essais de fluage et de compression sont réalisés sur les matériaux hydratés (Figure 7). L'essai de fluage sous contrainte de 2,5 MPa (Figure 7a) a été réalisé sur une éprouvette d'élanement 3, sur une durée de 1h45. La déformation de fluage alors atteinte est $\epsilon_{fl} = 600 \mu\text{m.m}^{-1}$, ce qui correspond à un fluage spécifique de $240 \mu\text{m.m}^{-1}.\text{MPa}^{-1}$. Ce phénomène est certainement dû à la migration l'eau dans le matériau et à une compaction du matériau : des bandes de compaction horizontales sont observées à la fin de l'essai.

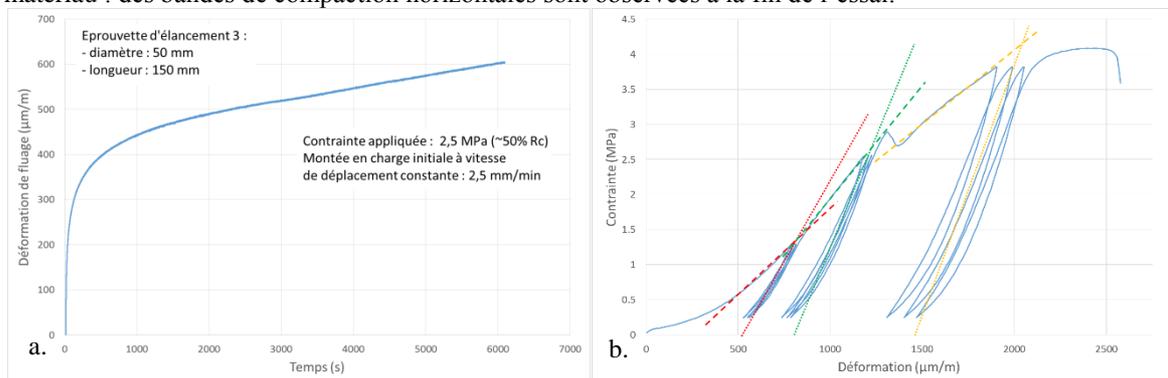


Figure 7. a. Essai de fluage sur éprouvette d'élanement 3, âgée de plus de 28 jours. Essai de compression sur éprouvette d'élanement 1, âgée de plus de 28 jours. 3 séries de 3 cycles.

La figure 7b représente un essai de compression avec réalisation de 3 cycles. La résistance en compression obtenue est de 4 MPa, ce qui est relativement faible comparé aux données fournisseur (6 MPa). La raideur calculée est différente entre le début d'essai et avant les cycles réalisés. Nous observons une évolution de la raideur d'une série de cycle à une autre (augmentation). Cependant, la raideur calculée est identique pour une série donnée. Ce phénomène n'est pas observable pour le troisième cycle présenté car le matériau est déjà fortement endommagé. Un phénomène de compaction du matériau est observé.

4. Conclusion

Dans cette étude, nous avons caractérisé les propriétés physiques d'un coulis géothermique par des techniques de caractérisation non destructives. Des dispositifs expérimentaux ont été développés et adaptés pour fiabiliser la caractérisation de coulis présentant une compacité et une résistance mécanique faible conduisant à un comportement mécanique spécifique.

L'évolution des propriétés mesurées sous sollicitation chimique indique au cours des premiers mois d'essai une décroissance de masse volumique qui affecte l'évolution des autres propriétés. Ces modifications restent cependant faibles en condition isotherme : la conductivité thermique seule paramètre règlementé aujourd'hui reste bien supérieur à la valeur limite de $2 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

Nous avons également montré sur une colonne de hauteur de 4 mètres, une modification de la matrice et de la porosité du matériau directement liée à la hauteur de la colonne. Cet essai souligne la forte dépendance des paramètres physiques à la porosité. Ces effets déjà sensibles sur 4 mètres peuvent être démultipliés sur des hauteurs beaucoup plus importantes, notamment en couplage avec des sollicitations chimiques et thermiques.

Les premiers résultats de compression et de fluage montrent que nous sommes en présence d'un matériau compactant potentiellement sujet au fluage.

Des essais plus longs sont en cours de réalisation pour confirmer les résultats obtenus. La faisabilité des essais de rupture et de mesures de perméabilité sont aujourd'hui en cours d'étude.

5. Bibliographie

- [BOR 14] BORINAGA-TREVIÑO R., PASCUAL-MUÑOZ P., CALZADA-PÉREZ M. A., CASTRO-FRESNO D., « Frew-thaw durability of cement-based geothermal grouting materials », *Construction and Building Materials*, vol. 55, 2014, p. 390-397.
- [BOR 13] BORINAGA-TREVIÑO R., PASCUAL-MUÑOZ P., CASTRO-FRESNO D., DEL COZ-DÍAZ J.J., « Study of different grouting materials used in vertical geothermal closed-loop heat exchangers », *Applied Thermal Engineering*, vol. 50, 2013, p. 159-167.
- [DEL 12] DELALEUX F., PY X., OLIVES R., DOMINGUEZ A., « Enhancement of geothermal borehole heat exchangers performances by improvement of bentonite grouts conductivity », *Applied Thermal Engineering*, vol. 33-34, 2012, p. 92-99.
- [ERO 14] EROL S., FRANÇOIS B., « Efficiency of various grouting materials for borehole heat exchangers », *Applied Thermal Engineering*, vol. 70, 2014, p. 788-799.
- [ERO 16] EROL S., FRANÇOIS B., « Freeze damage of grouting materials for borehole heat exchanger: Experimental and analytical evaluations », *Geomechanics for Energy and Environment*, vol. 5, 2016, p. 29-41.
- [IND 15] INDACOECHEA-VEGA I., PASCUAL-MUÑOZ P., CASTRO-FRESNO D., CALZADA-PÉREZ M. A., « Experimental characterization and performance evaluation of geothermal grouting materials subjected to heating-cooling cycles », *Construction and Building Materials*, vol. 98, 2015, p. 583-592.
- [LAM 10] LAMARCHE L., KAJL S., BEAUCHAMP B., « A review of methods to evaluate borehole thermal resistance in geothermal heat-pump systems », *Geothermics*, vol. 39, 2010, p. 187-200.
- [LEE 10] LEE C., LEE K., CHOI H., CHOI H.-P., « Characteristics of thermally-enhanced bentonite grouts for geothermal heat exchanger in South Korea », *Science China Technological Sciences*, vol. 53, No. 1, 2010, p. 123-128.
- [MAR 08] MARCOTTE D., PASQUIER P., « On the estimation of the thermal resistance in borehole thermal conductivity test », *Renewable Energy*, vol. 33, 2008, p. 2407-2415.
- [NFP 93] Norme NF P 18-414 « Essai des bétons – Essais non destructifs – Mesure de la fréquence de résonance fondamentale », 1993.
- [NFX 11] Norme NF X 10-970 « Forage d'eau et de géothermie – Sonde géothermique verticale (échangeur vertical en U avec liquide caloporteur en circuit fermé) », 2011.
- [NAU 13] NAULEAU E., Evolution au cours du temps des propriétés physiques et mécaniques des matériaux cimentaires d'un puits géothermique basse énergie, Thèse de doctorat, Université Paris-Est, 2013.
- [PAR 11] PARK M., MIN S., LIM J., CHOI J. M., CHOI H., « Applicability of cement-based grout for grout heat exchanger considering heating-cooling cycles », *Science China Technological Sciences*, vol. 54, No. 7, 2011, p. 1661-1667.