Évaluation de la performance d'un forage géothermique de conception améliorée

Jean-Marc Ballard
Claude Hugo Koubikana Pambou
Jasmin Raymond

Rapport de recherche 1396

Centre - Eau Terre Environnement

INRS
UNIVERSITÉ DE RECHERCHE
A RESEARCH UNIVERSITY

Résumé du projet

Ce rapport présente les résultats d'un projet de recherche pour évaluer la performance d'un échangeur de chaleur géothermique à conception améliorée. Les tuyaux de l'échangeur de chaleur ont été mis en place dans un forage conventionnel de 15,2 cm (6 pouces) de diamètre et une profondeur de 164.59 m (540 pi). Les tuyaux ont une configuration en double U et ils sont fabriqués en polyéthylène haute densité (PEHD) enrichie de nanoparticules de carbone pour augmenter la conductivité thermique. Il n'y a pas d'entretoises pour séparer les tuyaux. De plus, les tuyaux sont installés dans le puits qui a été laissé ouvert, sans matériaux de remplissage, pour bénéficier des mouvements de convection naturelle qui se produisent dans l'eau lors de l'injection de chaleur. Le projet a été réalisé sur le site des Laboratoires pour l'innovation scientifique et technologique de l'environnement de l'INRS à Québec. L'ensemble des travaux de terrain ainsi que l'analyse des données se sont déroulés de septembre 2017 à mars 2018.

Une collaboration avec les compagnies Forage Géothermique et Forage Beaumont & Fils a permis d'installer le nouveau puits géothermique et un autre puits d'observation. Des tests de réponse thermique (TRT) ont été réalisés par l'INRS avec la collaboration et les équipements d'Énergie-Stat. Les données des TRT ont été analysées avec l'équation de la ligne source infinie, couplée au principe de superposition temporelle considérant les variations du taux d'injection de chaleur. La résistance thermique de forage inférée à l'échangeur de chaleur avec un double U a été comparée à celle d'un puits installé avec un seul tuyau en U sur le même site en 2015 (Ballard et al., 2016).

L'analyse du TRT réalisée sur l'échangeur de chaleur 2-U indique une conductivité thermique de la sous-surface de 1,72 W/(m-K) et une résistance thermique de forage égale à 0,060 (m-K)/W. En comparaison, l'échangeur de chaleur 1-U installé en 2015 dans le forage d'un diamètre réduit de 4,5 po, sans entretoise et rempli avec un mélange de coulis de bentonite et de sable de silice montre une conductivité thermique de la sous-surface de 1,75 W/(m-K) et une résistance thermique de forage égale à 0,088 (m-K)/W. La résistance thermique calculée selon les critères de conception avec la méthode des multipoles pour un forage de 6 po, avec doubles tubes en U ayant un espacement des tuyaux de 95 mm et des matériaux de remplissage d'une conductivité thermique de 1,2 W/(m-K), serait de 0.057 (m-K)/W. Dans ce calcul, il faut utiliser une conductivité thermique de l'eau plus élevée que la valeur réelle de façon à obtenir une résistance thermique semblable à celle inférée sur le terrain, ce qui démontre que la performance de l'échangeur de chaleur est améliorée par les mouvements de convection dans la colonne d'eau du puits.

Équipe de réalisation et partenaires

Le projet a été dirigé par Jasmin Raymond, Professeur au Centre Eau Terre Environnement de l'INRS avec la contribution à l'organisation et à la réalisation des travaux de Jean-Marc Ballard, chargé de projet et assistant de recherche à l'INRS-ETE et de Claude Hugo Koubikana Pambou, doctorant en hydrogéologie et énergie géothermique à l'INRS-ETE. Les partenaires du projet sont Patrice Kwemo d'Énergie-Stat, Karl et Yvon Lamarche de Forage Géothermique, ainsi que Forage Beaumont & Fils et Versaprofiles qui ont contribués au projet. Ceux-ci ont aidé à la réalisation du forage et ont fourni le tuyau en double U enrichi de nanoparticules ayant une meilleure conductivité thermique. Le projet a été financé à l'aide d'une subvention du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) dans le cadre du programme de Subventions d'engagement partenarial ainsi qu'avec les contributions en nature des entreprises partenaires.

Introduction

L'objectif de ce projet était de mettre en place un échangeur de chaleur géothermique de conception améliorée et d'en vérifier la performance thermique de façon in situ. La performance est améliorée avec l'utilisation d'une double boucle U dans un forage de 164,5 m (540 pieds) de longueur. Les tuyaux de l'échangeur sont constitués de PEHD enrichi de nanoparticules de carbone, dont la conductivité thermique (0,7 W/mK) est augmentée par rapport aux matériaux normalement utilisés (0,4 W/mK). De plus, contrairement aux installations standards qui utilisent un coulis à base de bentonite pour remplir l'espace annulaire du forage, celui-ci a été laissé ouvert et rempli d'eau souterraine afin de profiter des mouvements de convection naturelle entrainés par l'injection de chaleur dans la colonne d'eau.

Le forage géothermique a été aménagé sur le site des Laboratoires pour l'innovation scientifique et technologique de l'environnement (LISTE) de l'INRS situé dans le parc technologique de Québec. Le forage a un diamètre de 15,2 cm (6 po) et les tuyaux de la boucle ne sont pas séparés par des entretoises. Les travaux de forage et l'installation du tuyau géothermique ont été réalisés par la compagnie Forage Beaumont & Fils sous la supervision de Forage Géothermique. Les tests de réponse thermique (TRT) ont été effectués conjointement par l'INRS et l'entreprise Énergie-Stat.

Photo 1

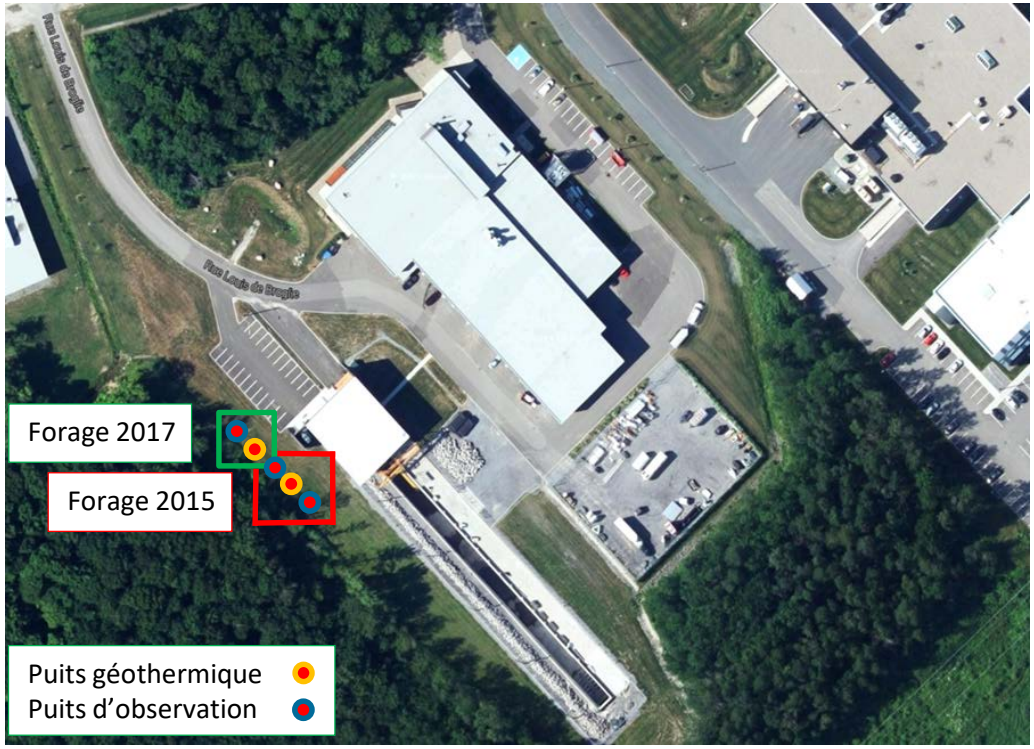


Photo 2

Carte de localisation

Le site d'essai est localisé sur le terrain des laboratoires lourds (LISTE) de l'INRS, situé au 2605 du boulevard du Parc Technologique (Carillon) dans le Parc technologique de la ville de Québec (Photo 1). Le site a été choisi afin de permettre un accès à long terme aux installations géothermiques. Les nouvelles installations de 2017 viennent s'ajouter à celles d'un puits géothermique et deux puits d'observation installés en 2015 (Photo 2). Les cinq forages sont alignés nord-est/sud-ouest et situés à environ 15 m à l'ouest des installations du laboratoire de l'hydraulique environnemental (Bâtiment LHE). Les coordonnées géographiques sont : N 46° 47'44,58''; O 71° 18'09,97'' et l'élévation du terrain est d'environ 11 m par rapport au niveau moyen de la mer. Le terrain est relativement plat et présente une faible pente vers l'extérieur pour favoriser le drainage de l'eau de pluie.

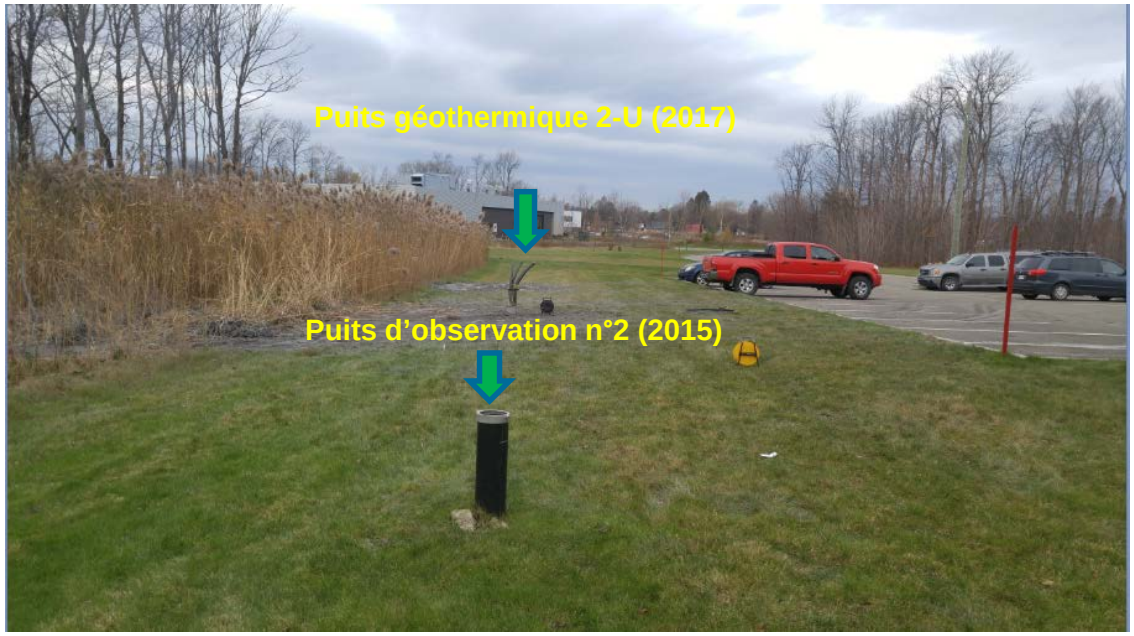


Photo 3

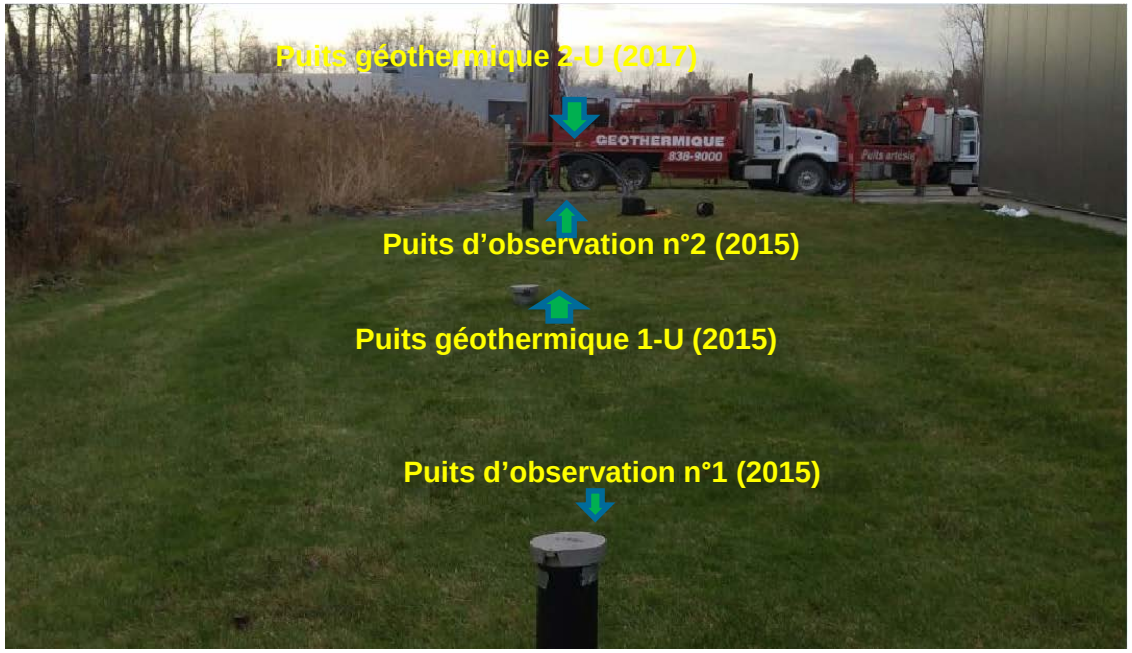


Photo 4

Le site

Le nouveau puits géothermique installé en 2017 est visible sur la photo 3 avec en avant plan, le puits d'observation no 2 installé en 2015.

La photo 4 montre la position des cinq forages réalisés en 2015 et 2017. La foreuse est positionnée à l'emplacement actuel du puits d'observation no 3.

Photo 5

Photo 6

Forage et aménagement des puits

Les forages du puits géothermique et du puits d'observation ont été réalisés avec une foreuse à marteau fond de trou et une plateforme de forage hydraulique SCHRAMM montée sur un camion 10 roues équipé d'un compresseur Caterpillar (1050CFM/350Psi; Photo 5). Le diamètre du forage est de 25 cm (9 3/4 pouces) dans le mort terrain et de 15,2 cm (6 pouces) dans le roc. Les deux forages sont des puits ouverts au roc avec un tubage en acier de 203 cm (8 pouces) installé respectivement à 9,75 m (32 pieds) et 8,53 m (28 pieds) dans le socle rocheux. Les travaux de forage et d'installation des puits ont été réalisés le 8 novembre 2017.

Le puits géothermique est équipé d'une double boucle verticale GeoperformX fabriquée et fournie par la compagnie Versaprofiles (Photo 6). Les tuyaux GeoperformX sont faits de PEHD enrichis aux nanoparticules de carbone. L'échangeur est constitué de deux boucles fermées, donc 4 tuyaux d'un diamètre nominal de 3,7 cm (10 pouces) et ayant un ratio de surface versus dimension de 11 (SDR). En réalité le diamètre externe est de 4.2 cm (1.66 pouce) et le diamètre interne est de 3.4 cm (1.34 pouce). Le fluide colporteur circulant dans les tuyaux est de l'eau qui provient du réseau d'aqueduc de la ville de Québec. Un test de pression hydraulique d'une heure à 3.10 bars (45 PSI) a été réalisé afin de vérifier l'étanchéité des tuyaux. La double boucle est installée dans le puits ouvert directement dans l'eau souterraine sans l'utilisation habituelle d'un coulis à base de bentonite pour le remplissage de l'espace annulaire. L'échange thermique entre la paroi du puits et les tubages de l'échangeur de chaleur se fait donc par conduction, mais aussi par convection naturelle dans l'eau de l'espace annulaire sur toute la hauteur du puits.

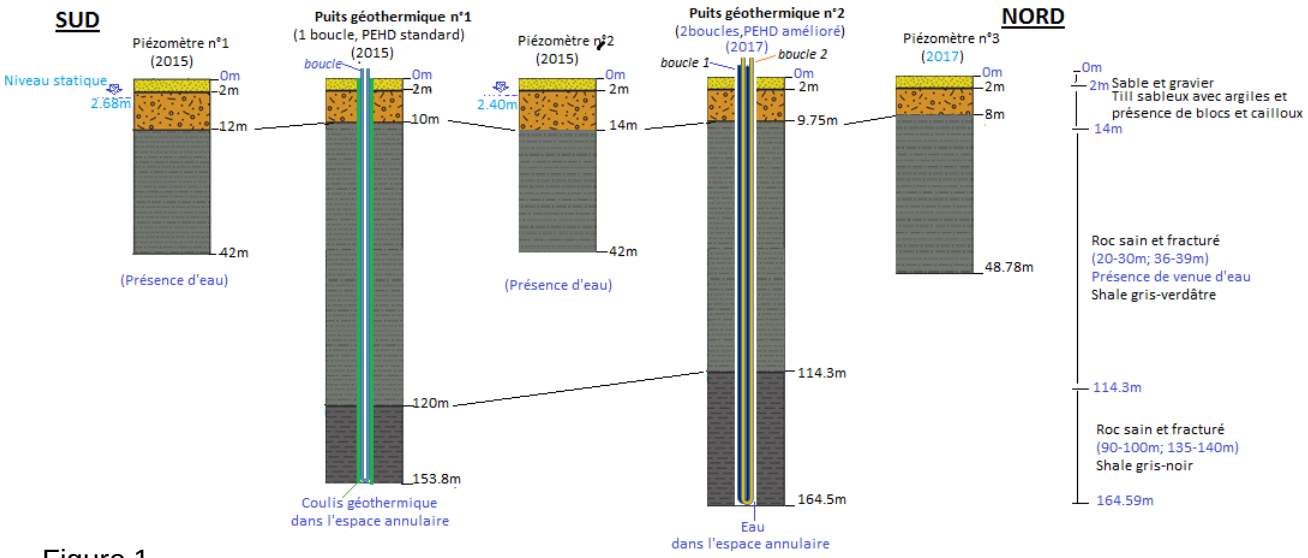


Figure 1

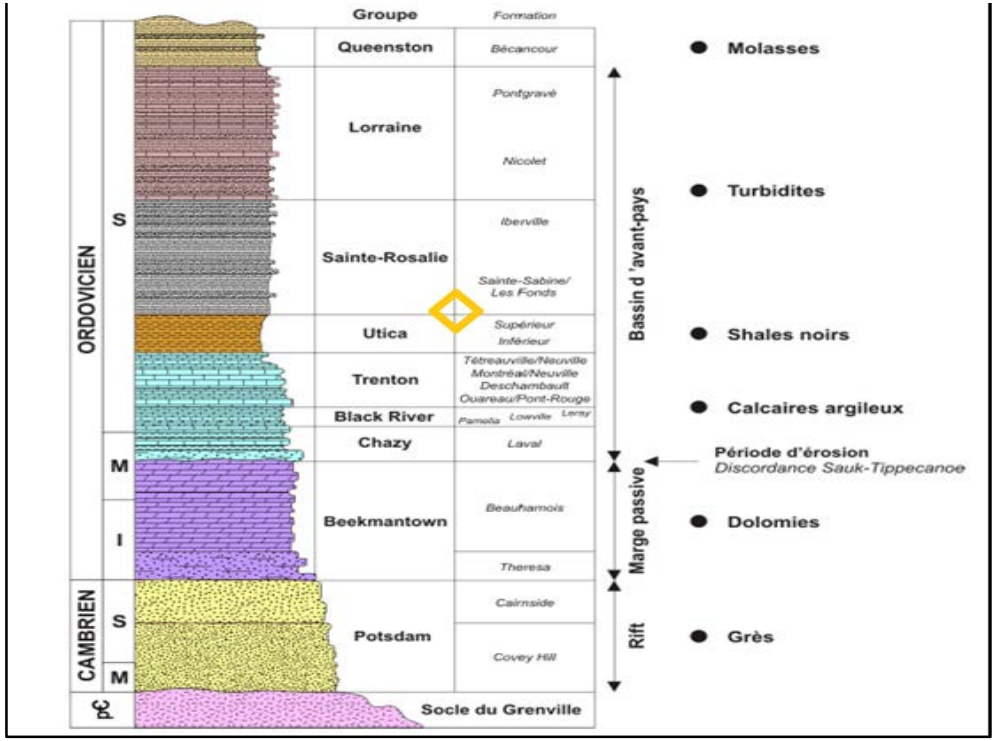
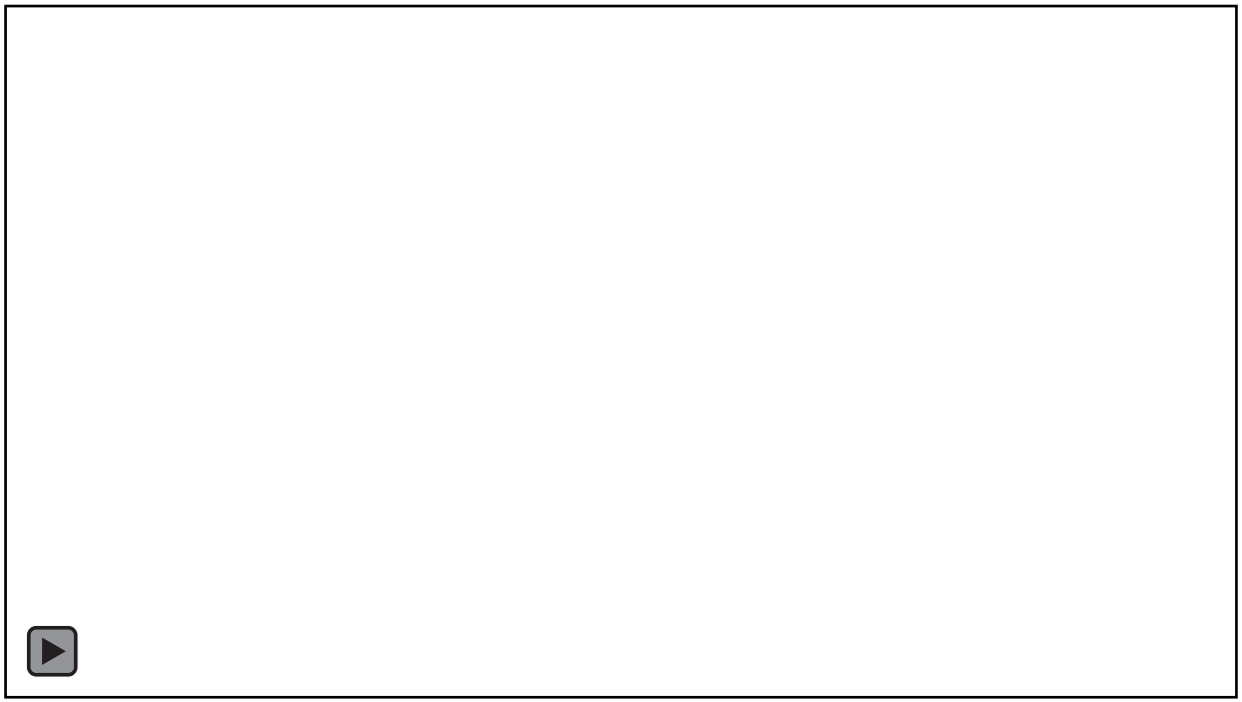


Figure 2

Lithostratigraphie, hydrogéologie et fracturation du roc

L'analyse des échantillons prélevés lors des forages montre une lithologie composée d'un mort terrain (8 à 10 m environ) au-dessus d'une roche consolidée schisteuse. La couleur du roc et le taux de progression du forage ont permis de distinguer deux types de roc : le gris verdâtre moins compact dans les 115 premiers mètres passe au gris noir plus dur dans la partie profonde, soit de 115 m à 164,59 m (Figure 1). La lithologie est pratiquement identique à celle décrite dans les travaux de Ballard et al. (2016) qui situe la zone des travaux dans des formations constituées des mudstones et silstones du Groupe de Sainte-Rosalie (Globensky, 1987). La Figure 2 présente une coupe de la synthèse lithostratigraphique régionale (modifiée de Bédard et al., 2013).

Aucune venue d'eau n'a été observée durant le forage ni durant l'installation de la boucle géothermique. Après le remplissage de l'espace annulaire par l'eau potable du robinet, le 18 novembre 2017, le niveau de l'eau s'est progressivement stabilisé à 2,45 m sous la surface du sol le 24 novembre 2017.



Vidéo 1

Forage et aménagement des puits

Le Vidéo 1 présente un segment de la mise en place de la double boucle PEHD GeoperformX de Versprofiles dans le forage. La boucle en double U n’est pas standard au niveau de l’industrie géothermique canadienne. Le choix du forage de 15,2 cm (6 pouces) de diamètre a été préféré par l'équipe de forage afin de laisser un espace suffisant pour installer les tuyaux 2-U de façon sécuritaire. L’installation de la boucle dans le forage s’est faite manuellement parce qu'aucun équipement mécanisé n'était disponible en raison du diamètre surdimensionné de la bobine de tuyaux.

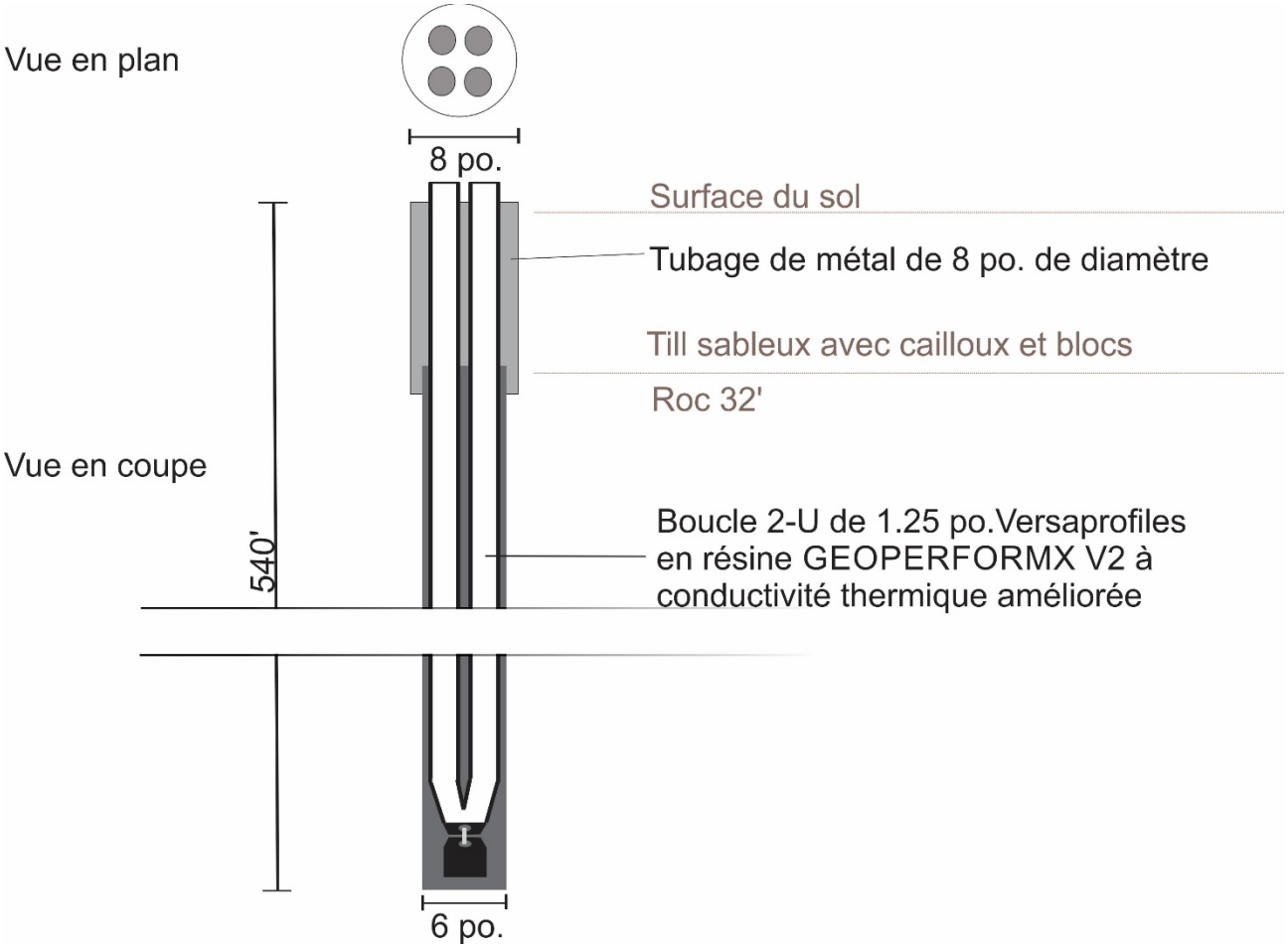


Figure 3

Installation de l’échangeur de chaleur géothermique

La Figure 3 présente le schéma d’installation de la double boucle en U de l’échangeur de chaleur géothermique dans le forage de 15,2 cm (6 pouces) de diamètre et d’une profondeur de 164,59 m (540 pieds).

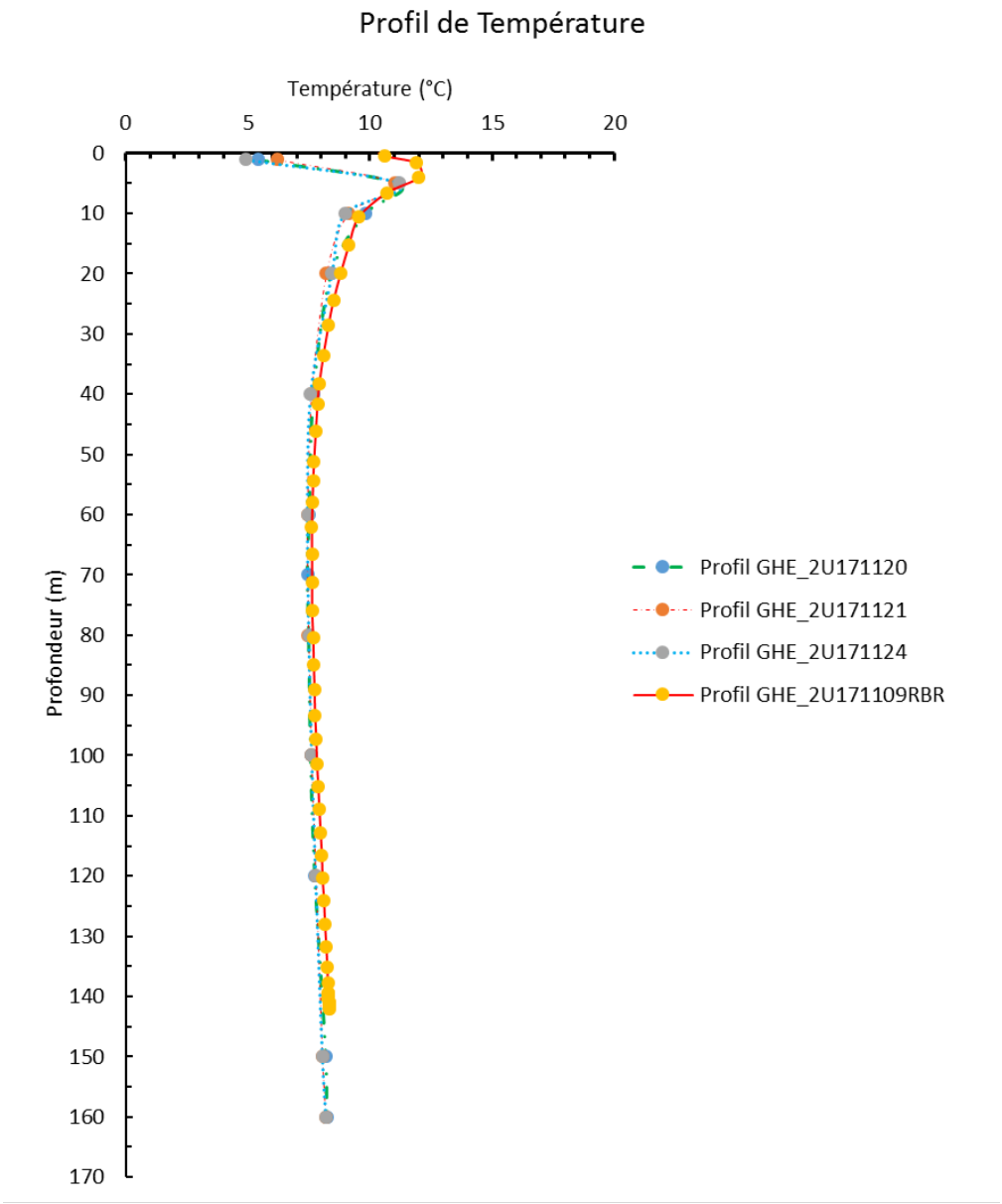


Figure 4

Mesure du profil de température à l'équilibre dans l'échangeur de chaleur

Quatre profils de températures ont été réalisés dans l'échangeur de chaleur géothermique entre le 9 et le 24 novembre 2017 (Figure 4). Ces mesures de température permettent entre autres de vérifier que la boucle retrouve des conditions à l'équilibre avec le socle rocheux qui a été chauffé par l'énergie dégagée lors du forage. Le premier profil a été réalisé le 9 novembre avec une sonde RBR qui donne la température en continu en fonction de la profondeur mesurée par la pression. Les valeurs d'exactitude de la température et de résolution de la pression sont de 0,002 °C et 0.0005 dbar. Trois autres profils ont été réalisés dans les jours suivants avec une sonde de température Star Oddi qui ne possède pas un capteur de pression et qui doit donc être attachée à un câble gradué pour corréler manuellement la température et la profondeur. Les mesures ont été effectuées durant un temps constant de 30 minutes à des points de profondeurs fixes, par incréments de 10 m. L'exactitude des sondes Star Oddi est de 0,025 °C.

L'analyse du dernier profil de température considéré à l'équilibre, soit 15 jours après le forage, montre les résultats suivants :

- Température moyenne sur toute la colonne d'eau entre 0 et 160m : 8.04 °C
- Température moyenne entre 40 m et 160m : 7.74 °C
- Température au fond du puits : 8.19 °C
- Température moyenne entre 10 m et 160 m: 7.8 °C. Cette moyenne a été calculée à partir des mesures de température du 24 novembre 2017 et elle a été utilisée pour l'analyse des TRT comme température initiale.

Photo 7

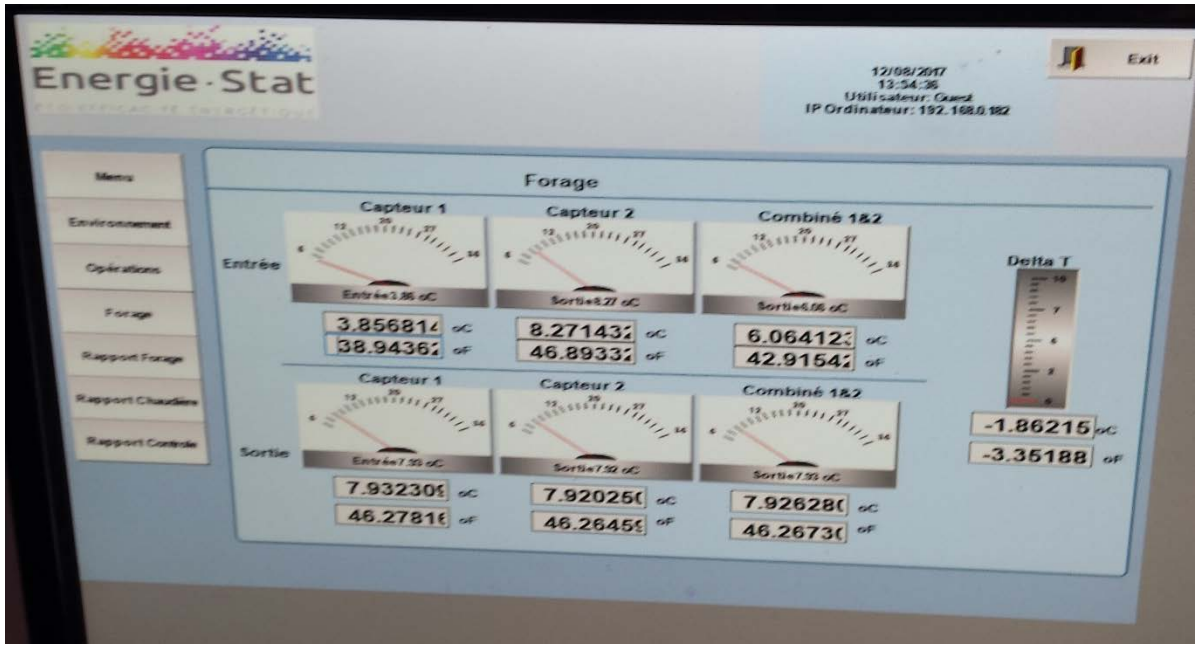


Photo 8

Tests de réponse thermique (TRT)

L'évaluation de la performance de l'échangeur de chaleur passe par la connaissance des propriétés thermiques de la sous-surface et du forage. Ces propriétés peuvent être évaluées par un test de réponse thermique (TRT) qui consiste à faire circuler dans l'échangeur de chaleur un fluide chauffé en surface et à mesurer la perturbation de température dans le temps. Les équipements nécessaires pour la réalisation du TRT comprennent une unité de chauffage électrique, un système de circulation (pompe) et ses contrôles, ainsi que les différents capteurs pour mesurer le débit de circulation du fluide, la température et la pression à l'entrée et la sortie de l'échangeur de chaleur.

La Photo 7 montre la roulotte appartenant à Énergie-Stat qui contient les équipements utilisés pour la réalisation des TRT pour l'évaluation de la performance de l'échangeur de chaleur. Pour la réalisation de l'essai, une attention particulière a été apportée à l'isolation des conduits et des équipements dans le but de minimiser les pertes de chaleur du système qui pourraient induire un biais dans les résultats. Les sondes de température Star Oddi ont été placées à l'extérieur, soit à l'entrée et à la sortie des tuyaux de l'échangeur de chaleur de façon à ne pas nuire la circulation du fluide dans la boucle.

La Photo 8 présente l'écran de contrôle du système d'acquisition de données d'Énergie-Stat pour le suivi des paramètres de l'essai TRT. Leur système, nommé «Gtrend» est entièrement automatisé et muni d'une plateforme de gestion à distance permettant de contrôler le déroulement du test et la collecte des données (puissance de chauffage, débit, température et pression).

Caractéristiques techniques des appareils de mesure

Le détail des caractéristiques techniques des équipements utilisés pour les TRT est présenté au Tableau 1. L'estimation des paramètres thermiques présentés dans le cadre de ce rapport utilise les données de température provenant des sondes Star-Oddi de l'INRS et la mesure de débit provenant du débitmètre d'Énergie-Stat.

Équipements INRS	Exactitude	Résolution
Sonde température RBR	± 0.002°C	0.0001°C
Sonde pression RBR		0.0005 dbar
Sonde température Star-Oddi	± 0.025°C	0.001°C
Équipements Énergie-Stat		
Sondes température (x 4)	0.15 °C	
Sonde pression (x 2)	0.3 %	
Débitmètre	0.5 % de la lecture	

Tableau 1

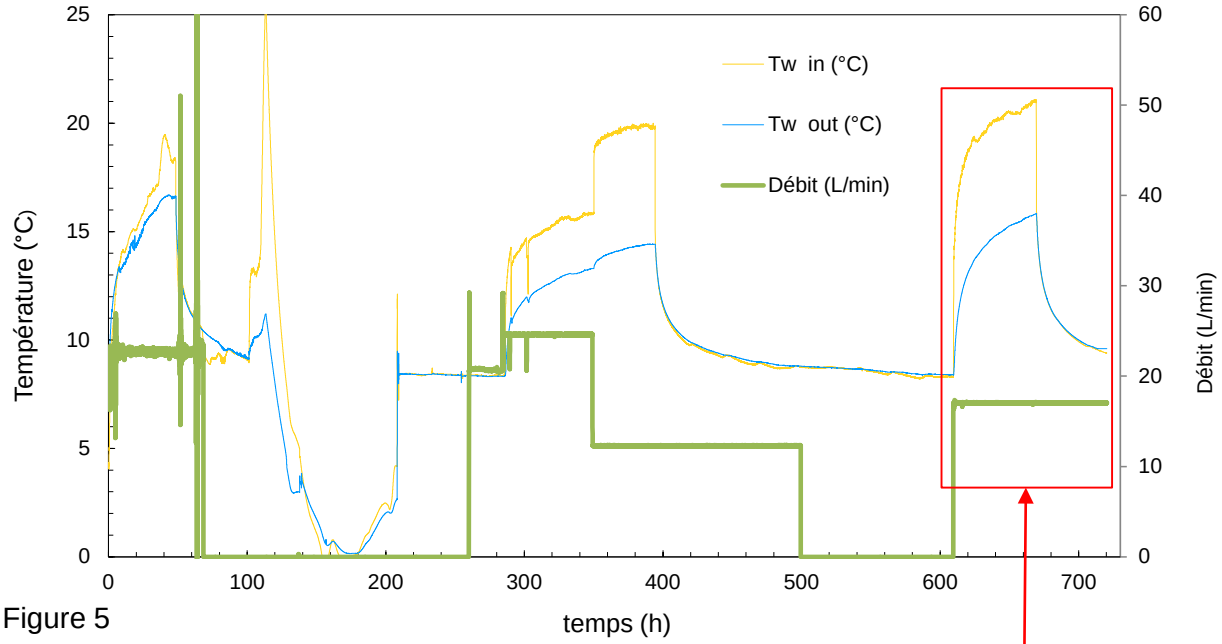


Figure 5

Essai température INRS et débit Énergie Stat			
Début essai:	27-11-17		
Durée essai:	721 heures		
$T_{0\,ini}$	7.80		
r_{bh}	0.075		
L_{bh}	164.50		
P facteur pondération	-0,9999		
Taux d'injection de chaleur par pallier			
Temps (h)	**Débit moy. (L/min.)**	**Puissance (W)**	**Puissance (W/m)**
0	0.0	0.0	0.0
7	22.2	-1771.4	-10.8
48	22.7	1846.9	11.2
286	4.2	-24.6	-0.1
349	24.6	4487.0	27.3
394	12.3	4663.7	28.4
610	6.0	-41.7	-0.3
669	17.0	6328.6	38.5
720	17.0	-64.7	-0.4

Tableau 2

Période du TRT 3

Séquence des tests de réponse thermique

Au total, les TRT ont duré 721 heures et consisté en trois phases d'injection de chaleur distinctes avec des périodes de retour à la température initiale entre chacune des périodes d'injection de chaleur (Figure 5). Durant la première phase d'injection de chaleur, plusieurs incidents, dont le froid et des coupures de courant ont perturbé le déroulement des essais, ce qui affecte la qualité des données. La deuxième phase d'injection de chaleur a été réalisée avec une variation du débit de circulation du fluide et cet effet sera considéré dans des analyses futures. La troisième phase d'injection de chaleur (TRT 3) a par contre été complétée sans interruption, soit 1 palier d'injection de chaleur avec débit et puissance fixe et un suivi en continu de la restitution thermique (voir l'encadré rouge). Les paramètres des trois TRT sont résumés au Tableau 2. Le TRT 3, qui est d'intérêt pour ce rapport, a duré 104 heures avec un débit de circulation constant de 17 Litres/minute, dont 54 heures d'injection de chaleur, à une puissance moyenne de 6328,6 W et 60 heures de suivi de la restitution thermique afin d'enregistrer le retour à la température initiale.

$$\overline{\Delta T_w}(t) = q_i R_{bh} \sum_{i=1}^{n} (q_i - q_{i-1}) \frac{W(u)}{4\pi\lambda_{ss}} \qquad \mu = \frac{r_{bh}^{\ 2}}{4a_{ss}(t_i - t_{i-1})} \qquad \text{Eq. (1)}$$

- $\overline{\Delta T_w}$ – Incrément moyen de la température de l'eau (°C)
- q_i – Taux d'injection chaleur par longueur unitaire pour la période i (W/m)
- $W(u)$ – Fonction de puits utilisée pour évaluer l'intégrale exponentielle
- a_{ss} – Diffusivité thermique de la sous-surface (m²/s)
- R_{bh} – Résistance thermique du forage ((m-K)/W)
- t_i – Temps pour la période i (s)

$$S = \sum (\Delta T_{obs} - \Delta T_{mod})^2 \qquad \text{Eq. (2)}$$

- S – Somme des résidus au carré (°C²)
- ΔT_{obs} – Incrément de température observé (°C)
- ΔT_{mod} –Incrément de température calculé (°C)

Analyse du TRT par superposition des courbes

La conductivité thermique de la sous-surface et la résistance thermique du forage sont estimées en reproduisant les incréments moyens de la température du fluide circulant dans l'échangeur de chaleur avec une solution analytique de transfert de chaleur par conduction. La solution utilisée est la ligne source infinie (Équation 1 ; Carslaw 1945) qui décrit la distribution de la température autour du forage géothermique dans le sol qui l'entoure en fonction de la distance r de la source et du temps t pour une source de chaleur linéique-infinie dans un milieu homogène et isotrope en conditions transitoires. Cette solution est couramment utilisée pour l'analyse des TRT parce qu'elle est facile à mettre en œuvre et qu'elle reproduit bien les températures observées (Gehlin and Hellstrom 2003).

L'analyse du TRT consiste à ajuster les températures calculées par la solution analytique avec les températures observées en ajustant la conductivité thermique de la sous-surface (λ_{ss}) et la résistance thermique du forage (R_{bh}) (Raymond et al. 2011). Les paramètres λ_{ss} et R_{bh} sont optimisés avec un solveur d'équation afin de reproduire les incréments moyens de température du fluide observés durant les TRT. Cette optimisation a été effectuée en minimisant la somme des résidus au carré (Équation 2) pour la réponse thermique calculée (Équation 1) et comparée aux températures observées du TRT. La température moyenne du fluide dans l'échangeur de chaleur est calculée selon les températures d'entrée et de sortie pondérées par le facteur p «$T_{p\text{-}average}$» pour représenter la distribution de température asymétrique le long du forage (Marcotte et Pasquier, 2008).

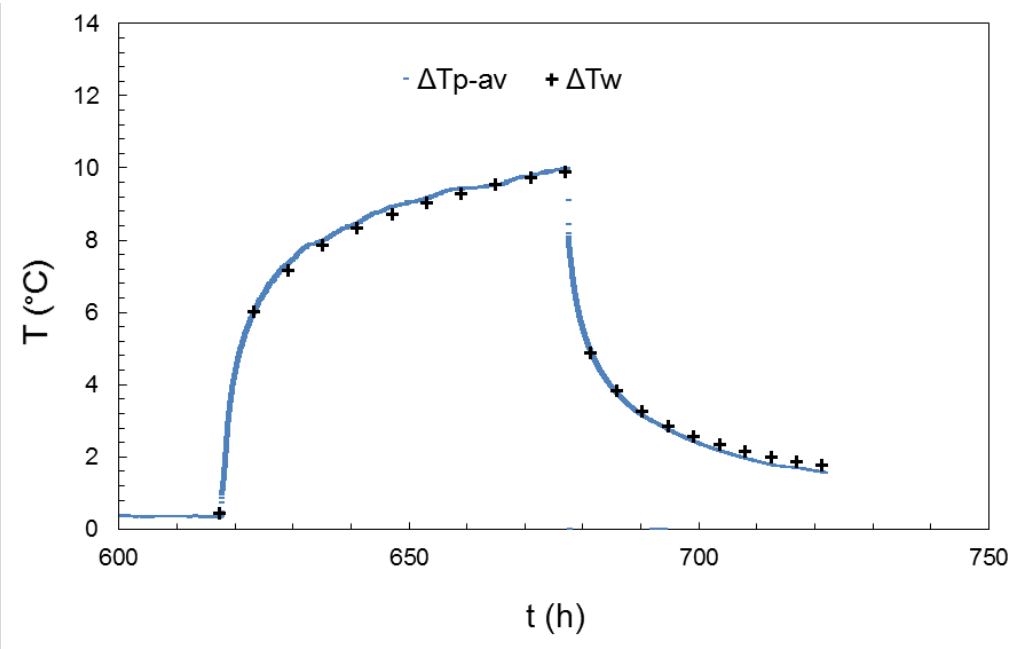


Figure 6

Résultats essais 2018 - TRT 3	
Méthode de superposition des courbes	
λ_{ss} (W/(m-K))	1,72
R_{bh} ((m-K)/W)	0,060

Tableau 3

Analyse du TRT 3

La Figure 6 présente les graphiques superposés des données de l'analyse du TRT 3 avec la moyenne pondérée de l'incrément de température mesuré à l'entrée et la sortie avec «$T_{p\text{-}average}$» (points bleus) et celle calculée par la solution analytique (points +). La superposition des courbes optimisée par solveur indique une conductivité thermique de la sous-surface de 1,72 W/(m-K) et une résistance thermique de forage égale à 0,060 (m-K)/W (Tableau 3).

L'analyse d'un TRT avec restitution thermique permet d'estimer de façon quasi indépendante la conductivité thermique de la sous-surface et la résistance thermique de forage parce que durant la période de restitution thermique, la résistance thermique du puits devient négligeable. La méthode permet ainsi de réduire l'incertitude liée à l'analyse du TRT (Raymond et al., 2011). Les taux d'injection de chaleur des TRT 1 et 2 ainsi que les périodes de restitution thermique précédant le TRT 3 ont été considérés dans l'analyse avec le principe de superposition, bien que seulement les points de température calculée pour le TRT 3 sont superposés aux points de température observés.

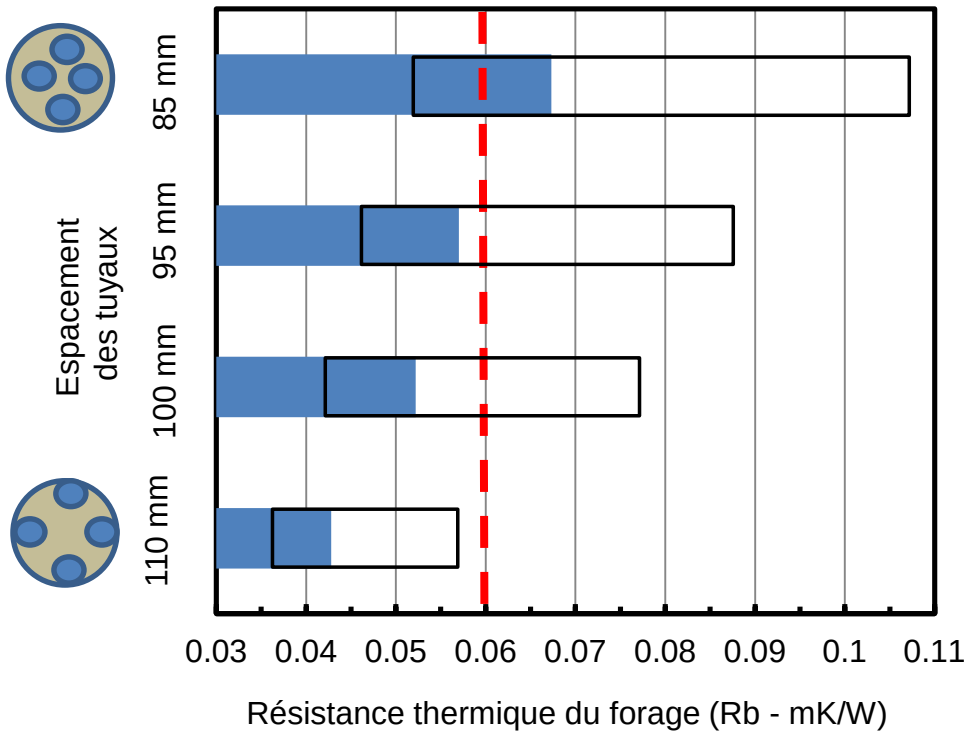


Figure 7

Espacement	min	R_{bh}	max
6 po 110 mm	0.0363	0.0428	0.0583
6 po 100 mm	0.0425	0.0522	0.0785
6 po 95 mm	0.0458	0.0570	0.0883
6 po 85 mm	0.1083	0.0673	0.0530

Tableau 4

Calcul de la résistance thermique théorique du forage

La résistance thermique d'un forage géothermique peut être estimée de façon théorique par, entre autres, la méthode des multipoles (Claesson and Hellström 2011). Cette méthode suppose une tranche de forage 2D et utilise comme intrant au calcul, les critères de conception de l'échangeur de chaleur, dont la distance séparant les tuyaux de la boucle, ainsi que de la conductivité thermique de la sous-surface à la paroi du forage. La Figure 7 montre que les valeurs de résistance thermique théorique du forage varient entre 0,043 et 0,067 (m-K)/W pour quatre scénarios d'espacements des tuyaux de 110 à 85 mm. Les plages de valeurs possibles pour les quatre scénarios varient entre 0,036 et 0,107 (m-K)/W) (Tableau 4). Le rectangle noir correspond à une plage de conductivité thermique du matériel de remplissage variant de 0,6 à 1,8 W/(m-K). La ligne pointillée rouge montre la valeur de la résistance thermique inférée en condition in situ avec le TRT 3 (0.060 mK/W). Cette valeur de R_{bh} correspond le plus logiquement au scénario d'espacement de 95 mm, ce qui permet d'estimer grossièrement une valeur de conductivité thermique effective de l'eau à 1,2 W/(m-K). La boucle ayant été placée dans un puits ouvert, donc dans l'eau souterraine et installée sans entretoise, la conductivité thermique effective de l'eau dans le puits est difficile à évaluer. Normalement l'eau n'est pas un bon conducteur de chaleur avec une valeur de seulement 0,6 W/(mK) si on ne considère pas les effets de convection. On peut tout de même avancer que la convection améliore la performance thermique de l'échangeur de chaleur, mais que des travaux supplémentaires, notamment le développement d'un modèle considérant la convection, seront nécessaires pour obtenir une valeur plus exacte.

Résultats essais 2018	
TRT 3 Méthode de superposition des courbes	
λ_{ss} (W/(m-K))	1,72
R_{bh} ((m-K)/W)	0,060
Méthode des multipôles-Puits 152 mm avec espacement 95 mm	
R_{bh} ((m-K)/W)	0,057
Résultats essais 2015	
TRT Méthode de superposition des courbes	
λ_{ss} (W/(m-K))	1,75
R_{bh} ((m-K)/W)	0,088
Méthode des multipôles-Puits 113.9 mm avec espacement 82 mm	
R_{bh} ((m-K)/W)	0,082

Tableau 5

Évaluation de la performance du nouvel échangeur de chaleur

Le Tableau 5 présente une synthèse des résultats du TRT 3 réalisé en 2017 dans l'installation de boucle en double U, ainsi ceux obtenus en 2015 pour un échangeur de chaleur avec une boucle en U (Ballard et al. 2016). L'échangeur de 2015 est installé dans un forage de 11.38 cm (4.5 po) de diamètre et 152 m (500 pieds) de profondeur, constitué d'une boucle 1-U de PEHD standard et un coulis fait de bentonite et sable rempli l'espace annulaire.

Les résultats des TRT de 2017 et 2015, interprétés avec la même méthode d'analyse, indiquent que la conductivité thermique du sous-sol est similaire pour les deux installations, soit respectivement 1,72 et 1,75 (W/ (m-K)), alors que la résistance thermique du forage de 2017 est de 0.060 (m-K)/W, ce qui est 32% inférieur à celle de l'installation de 2015 (0.088 mK/W). Ces résultats sont cohérents avec les estimations théoriques obtenues par la méthode des multipoles (Claesson et Hellström 2011).

La résistance thermique du forage est liée aux caractéristiques de la boucle, soit le type de matériaux employé pour les tuyaux, la configuration de la boucle, l'espacement des tuyaux, ainsi qu'à la conductivité thermique du matériel qui remplit l'espace annulaire du puits. La nouvelle installation du 2017 utilise des tuyaux en HDPE à meilleure conductivité thermique (Versaprofiles Geoperformx V2), une configuration en double U plus efficace thermiquement qu'une boucle simple ainsi que l'espace annulaire du forage laissé ouvert, soit simplement rempli avec l'eau souterraine. Typiquement, l'eau est un mauvais conducteur thermique, mais les processus de convection dans le puits ouvert améliorent le transfert de chaleur.

Conclusions

Ce rapport présente les résultats d'un projet recherche pour évaluer la performance d'un nouveau type d'échangeur de chaleur géothermique avec une boucle géothermique double U placée dans un puits ouvert aux échanges avec l'eau souterraine. L'installation a été réalisée dans un forage de 15,2 cm (6 pouces) de diamètre à une profondeur de 164,59 m (540 pi). Cette conception de double boucle placée dans un forage ouvert et rempli d'eau souterraine est inspirée notamment du savoir-faire suédois et tire avantage de la convection naturelle de la chaleur dans la colonne d'eau qui remplit le trou de forage. Le projet de l'INRS de 2017 se démarque en plus par l'utilisation de tuyaux de PEHD enrichis de nanoparticules de carbones avec une meilleure conductivité thermique.

L'interprétation de l'essai thermique (TRT 3) indique que le forage géothermique de 2017 a une résistance thermique de 0,060 mK/W, ce qui est près de 32% inférieur à celle de l'installation plus standard réalisée en 2015 sur le même site (0,088 mK/W). Ce type de conception améliorée qui montre une meilleure performance thermique avec une installation simplifiée et moins chère à mettre en œuvre pourrait contribuer à faciliter le déploiement commercial des technologies géothermiques de chauffage et climatisation des bâtiments. En particulier, l'absence de coulis facilite la mise en place de l'échangeur et réduit la quantité de matériel utilisée, alors que la diminution de la résistance thermique permettrait de réduire la longueur de forage requise pour suffire aux besoins énergétiques d'un bâtiment. Des calculs de dimensionnement devront être réalisés pour quantifier la réduction de longueur de forage associée à la configuration proposée. De plus, l'utilisation de l'eau au lieu du coulis de bentonite normalement utilisé pour remplir l'espace annulaire du forage pourra faire l'objet de recherche plus poussé afin de connaître le coefficient de conductivité thermique effectif.

Remerciements

L'équipe du projet tient à remercier les personnes et organisations qui ont permis la réalisation des travaux:

- L'INRS pour avoir permis d'utiliser le site aux Laboratoires pour l'innovation scientifique et technologique de l'environnement à Québec;
- Les entreprises Forage Géothermique et Forage Beaumont et Fils qui ont permis et réalisé l'installation du forage géothermique;
- La collaboration d'Énergie-Stat qui a fourni les équipements pour la réalisation des TRT;
- L'entreprise Versaprofiles qui a fourni le tuyau double en HDPE à conduction thermique améliorée;
- Le CRSNG pour la contribution financière au projet par le biais d'une subvention au programme d'engagement partenarial.

Références

- Ballard J-M, Koubikana PCH et Raymond J (2016). Développement des tests de réponse thermique automatisés et vérification de la performance d'un forage géothermique d'un diamètre de 4,5 po. Rapport interne 1601, INRS-ETE, Québec, Canada, disponible sur l'Internet : http://espace.inrs.ca/4028/
- Globensky Y (1987). Géologie des Basses Terres du Saint-Laurent, Québec. Rapport interne MM 85-02, Ministère des Richesses naturelles du Québec, Québec, Canada.
- Bédard K, Comeau F-A, et Malo M (2013). Modélisation géologique 3D du bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent. Rapport interne CO2-2013-v1.5, INRS-ETE, Québec, Canada, disponible sur l'Internet : http://espace.inrs.ca/1643/1/R001439.pdf.
- Carslaw HS (1945). Introduction to the mathematical theory of the conduction of heat in solids. Dover Publication, New York, 286p.
- Gehlin and Hellstrom (2003). Comparison of four models for thermal response test evaluation. ASHRAE transactions 109, 135-146.
- Raymond J, Therrien R, Gosselin L et Lefebvre R (2011). A Review of Thermal Response Test Analysis Using Pumping Test Concepts. Ground Water 49, 932-945.
- Marcotte D et Pasquier P (2008). On the estimation of thermal resistance in borehole thermal conductivity test. Renewable Energy 33, 2407–2415.
- Claesson J et Hellström G (2011). Multipole method to calculate borehole thermal resistances in a borehole heat exchanger. HVACR Res. 17, 859–911.

INRS
UNIVERSITÉ DE RECHERCHE
A RESEARCH UNIVERSITY

Energie·Stat
ÉCO-EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE

FORAGE
GÉOTHERMIQUE

R. BEAUMONT
et fils

VERSAPROFILES

CRSNG
NSERC