



**INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
CENTRE EAU TERRE ENVIRONNEMENT
(INRS-ETE)**

Développement des tests de réponse thermique automatisés et vérification de la performance d'un forage géothermique d'un diamètre de 4,5 po.

Préparé par :

Jean-Marc Ballard, chargé de projet INRS

Claude Hugo Koubikana Pambou, étudiant au doctorat INRS

Jasmin Raymond, Ph.D, géo, Professeur INRS

Avril 2016

Rapport no R1601

RÉSUMÉ	1
1.0 INTRODUCTION	2
1.1 Équipe de réalisation et partenaires	3
2.0 MÉTHODOLOGIE - ACTIVITÉS PRÉLIMINAIRES	3
2.1 Choix et localisation du site d'essai.....	3
2.2 Caractérisation des conditions géologiques et hydrogéologiques.....	5
3.0 TRAVAUX DE TERRAIN	7
3.1 Réalisation des Forages	7
3.2 Coupe lithostratigraphique et hydrogéologie du site	8
3.3 Aménagement de la boucle géothermique.....	9
3.4 Mesure des températures initiales dans la boucle géothermique	10
3.5 Réalisation des Tests de réponse thermique	10
3.6 Méthodes de contrôle de la puissance thermique des TRT	13
4.0 MÉTHODES D'ANALYSES ET RÉSULTATS DES TRT.....	14
4.1 Profils de température avant les TRT	14
4.2 Méthodes d'analyses des TRT	15
4.3 Calcul de la résistance thermique du forage selon les critères de conception.....	17
4.4 Analyse des résultats et discussions.....	18
4.4.1 TRT 1 : Injection chaleur avec puissance électrique contrôlée et débit constant.....	18
4.4.1.1 Résultats TRT 1 méthode 1, analyse selon la pente.....	20
4.4.1.2 Résultats TRT 1 méthode 2, analyse avec superposition des courbes.....	20
4.4.1.3 Comparaison des résultats de l'essai TRT 1	21
4.4.2 TRT 2 : Injection de chaleur avec puissance thermique contrôlée et deux paliers de débits	22
4.4.2.1 Résultats TRT 2 méthode 1, analyse selon la pente.....	24
4.4.2.2 Résultats TRT 2 méthode 2, analyse avec superposition des courbes.....	25
4.4.2.3 Comparaison des résultats de l'essai TRT 2	25
4.4.3 Comparaison de la résistance thermique inférée avec le TRT 1 à celles des modèles théoriques	26
5.0 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....	28
RÉFÉRENCES	31
6.0 ANNEXES.....	33
ANNEXE 1 - Figures et photos complémentaires	33
ANNEXE 2 – Fichiers électroniques des feuilles de calculs EXCEL	39
ANNEXE 3 - Rapport technique d'Énergie-Stat	40
ANNEXE 4 – Fiches techniques de Forage Géothermique	48

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Exactitude des équipements de mesure de l'INRS et d'ES	11
Tableau 2 : Résumé des paramètres d'analyse de l'essai TRT 1.	19
Tableau 3 : Comparaison des résultats de conductivité thermique de la sous-surface et de la résistance thermique du forage pour les deux méthodes d'analyse	22
Tableau 4 : Résumé des paramètres d'analyse de l'essai TRT 2	23
Tableau 5 : Comparaison des résultats de conductivité thermique de la sous-surface et de la résistance thermique du forage pour les deux méthodes d'analyse.....	26

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation du site dans la ville de Québec.....	4
Figure 2 : Localisation des forages sur le site de l'INRS.....	4
Figure 3 : Localisation des forages sur le site de l'INRS.....	5
Figure 4 : Géologie simplifiée de la région de Québec (extrait du dossier public 7086, CGC).....	6
Figure 5 : Synthèse lithostratigraphique régionale (modifiée de Bédard et al., 2013).....	6
Figure 6: Description lithologique à l'endroit de chacun des forages.....	8
Figure 7 : Schéma d'installation de la boucle géothermique.....	10
Figure 8 : Vue globale des équipements d'essai TRT et logistique INRS-ES.....	12
Figure 9 : Schéma d'installation de l'unité TRT d'ES et équipements de l'INRS.....	12
Figure 10: Profils des températures mesurées dans la boucle géothermique avant le TRT 1.....	14
Figure 11: Profils des températures mesurées dans la boucle géothermique avant le TRT 2.....	15
Figure 12 : Températures mesurées et puissance calculée Q , (TRT 1).....	19
Figure 13 : Températures mesurées en fonction du temps logarithmique, données INRS et ES (TRT 1).....	20
Figure 14 : Températures moyennes (entrée - sortie) pondérées par le facteur p et températures ajustées analytiquement, données de température INRS et de débit ES (TRT 1).....	21
Figure 15 : Températures mesurées et puissance calculée Q (TRT 2).....	24
Figure 16 : Températures mesurées en fonction du temps logarithmique, données INRS et ES (TRT 2).....	24
Figure 17 : Températures moyennes (entrée - sortie) pondérées par le facteur p et températures ajustées analytiquement, données de température INRS et de débit ES (TRT 2).....	25
Figure 18: Comparaison de la résistance thermique du forage ($R_{bh} - (m-K)/W$) inférée avec le TRT 1 et calculée avec la méthode de Remund (1999).	27
Figure 19: Comparaison de la résistance thermique du forage ($R_{bh} - (m-K)/W$) inférée avec le TRT 1 et calculée avec la méthode des multipoles (Claesson et Hellström, 2011).	28
Figure A1 : Équipements de forage.....	33
Figure A2 : Opérations de forage.....	34
Figure A3 : Mise en place de la boucle géothermique en HDPE et du coulis dans le forage.....	35
Figure A4 : Journal de forage avec position des échantillons (logs)	36
Figure A5 : Installations des puits d'observation.....	37
Figure A6 : Mesure de la température dans la boucle géothermique et sonde de pression et de température RBR.....	37
Figure A7 : A: Remorque contenant les équipements de mesurage du test de réponse thermique. . B: Système «Gtrend» de Énergie-Stat. C: Mesure des températures de l'INRS avec le capteur Star Oddy, et D : Débitmètre ABB de l'INRS.....	38

Nomenclatures des symboles des équations :

Symbole	Définition
a_{ss}	Diffusivité thermique de la sous-surface (m^2/s)
c_{ss}	Capacité thermique de la sous-surface ($J/(kg \cdot K)$)
I	Intensité de courant (A)
H	Longueur de la boucle géothermique (m)
m	Pente du graphique d'analyse d'un TRT ($^{\circ}C/s$)
q	Taux d'injection de chaleur par longueur unitaire (W/m)
Q	Taux d'injection de chaleur (W)
Q'	Débit volumique (m^3/s)
r_{bh}	Rayon du puits (m)
R_{bh}	Résistance thermique du forage ($(m \cdot K)/W$)
S	Somme des résidus au carré ($^{\circ}C^2$)
t_c	Critère de temps pour l'équation de la ligne source (s)
t_i	Pas de temps (s)
T_{mod}	Température calculée ($^{\circ}C$)
T_{obs}	Température observée ($^{\circ}C$)
$T_{w, in}$	Température de l'eau à l'entrée ($^{\circ}C$)
$T_{w, out}$	Température de l'eau à la sortie ($^{\circ}C$)
U	Différence de potentiel (V)
$W(u)$	Fonction de puits
$\overline{\Delta T_w}$	Incrément moyen de la température de l'eau ($^{\circ}C$)
λ_{ss}	Conductivité thermique de la sous-surface ($W/(m \cdot K)$)
ρ_{ss}	Densité de la sous-surface (kg/m^3)
$\rho_w c_w$	Capacité thermique volumique de l'eau ($4.2 MJ/m^3 \cdot K$)

RÉSUMÉ

Ce rapport présente les résultats d'un projet de recherche concernant l'amélioration des essais pour évaluer la conductivité thermique de la sous-surface et la résistance thermique des échangeurs de chaleur aménagés dans les forages géothermiques. 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 du 8 septembre au 23 décembre 2015.

Un partenariat avec les compagnies Forage Géothermique et Énergie-Stat (ES) a permis un accès à des équipements novateurs pour la réalisation d'un forage géothermique et pour l'exécution des tests de réponse thermique. L'unité d'essai d'ES a facilité l'exécution des tests de réponse thermique (TRT), notamment par l'automatisation des étapes de terrain et par la transmission des données et du contrôle des paramètres opérationnel à distance. Pour valider cette unité, un système indépendant de mesures en parallèle a été mis en place par l'INRS. La technologie a été vérifiée lors de la réalisation d'essais selon deux protocoles d'injection de la chaleur par contrôle de la puissance électrique (TRT 1) et thermique (TRT 2). L'injection de chaleur et la restitution thermique ont été suivies lors du TRT 1, alors que seulement l'injection de chaleur l'a été durant le TRT2. Pour chaque TRT, les données obtenues ont été analysées avec l'équation de la source de chaleur linéaire et infinie selon deux méthodes, celle de la pente et celle de la superposition des courbes.

Les analyses, réalisées selon la méthode de la pente avec les données séparées de l'INRS et d'ES, indiquent des conductivités thermiques de la sous-surface respectivement égales à 2,03 W/(m-K) et 1,93 W/(m-K) pour le TRT 1, ainsi que 1,71 W/(m-K) et 1,76 W/(m-K) pour le TRT 2. Les résultats obtenus lors de l'essai avec un contrôle de la puissance thermique (TRT 2) montrent moins d'écart et un taux d'injection de chaleur plus stable, permettant une validation positive des mesures automatisée d'ES.

L'analyse des données combinées de l'INRS et d'ES pour le TRT1, selon la méthode de superposition des courbes, indique 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. En comparaison, les résistances thermiques calculées selon les critères de conception pour un forage de 6 po varient entre 0,087 et 0,12 (m-K)/W, avec et sans entretoises séparant les tuyaux de la boucle souterraine. Ces résultats montrent que l'échangeur de chaleur installé dans le forage d'un diamètre réduit de 4,5 po fournit une résistance thermique similaire ou même inférieure à celle d'un forage d'un diamètre de 6 po.

1.0 INTRODUCTION

Les tests de réponse thermique (TRT) sont de plus en plus utilisés pour estimer la conductivité thermique de la sous-surface et la résistance thermique du forage qui sont les propriétés physiques essentielles à la conception des systèmes de pompes à chaleur géothermique. Néanmoins, certains résultats d'études ont dénoté plusieurs sources d'erreurs potentielles au niveau de l'acquisition des données et de l'analyse des TRT qui affectent le coût d'un projet et la performance des installations géothermiques (Witte, 2013; Sanner et al, 2013; Jacques, 2015; Zhang et al, 2015).

À cet effet, l'Institut National de la Recherche Scientifique, Centre Eau Terre Environnement (INRS-ETE) à Québec, en partenariat avec les compagnies Forage Géothermique (FG) de Gatineau et Énergie-Stat (ES) de Montréal ont réalisé un projet de recherche dont les principaux objectifs étaient les suivants :

- Évaluer les performances du système TRT automatisé d'ES, notamment sur l'incertitude des mesures. L'INRS a conséquemment mis en place un système de mesure en parallèle (température et débit) pour permettre de comparer les résultats.
- Identifier les sources d'erreur provenant des équipements de mesure automatisée ou encore lors de l'analyse des données. Un calcul d'erreur a été introduit aux méthodes d'ES pour estimer l'exactitude des résultats.
- Mesurer en conditions réelles la résistance thermique d'un forage de 4,5 po de diamètre sans entretoises afin de comparer ses performances à celle d'un forage de 6,0 po selon des méthodes analytiques et empiriques.

Pour les besoins du projet, un forage géothermique a été aménagé sur le site des Laboratoires pour l'innovation scientifique et technologique de l'environnement de l'INRS situé dans le parc technologique de Québec. Le forage a une profondeur de 153,8 m (505 pieds) et un diamètre de 11,3 cm (4,5 po). Les travaux de forage et l'installation de la boucle géothermique ont été réalisés par la compagnie Forage Géothermique. Les essais TRT ont été réalisés par l'entreprise ES. Les équipements et les méthodes de travail de deux compagnies ont été évalués sur le terrain afin de vérifier leurs effets sur l'exactitude des résultats et la performance des systèmes géothermiques. Le but est de réduire l'incertitude face aux intrants nécessaires au dimensionnement des forages géothermiques pour mieux contrôler les coûts d'installation des systèmes.

1.1 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, assistant de recherche à l'INRS-ETE et de Claude Hugo Koubikana Pambou, étudiant au doctorat en science de la Terre à l'INRS-ETE. Les partenaires du projet sont, Patrice Kwemo et Fernando López d'ES ainsi que Karl et Yvon Lamarche de FG. Le projet a été réalisé à l'aide d'une subvention du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada dans le cadre du programme de Subventions d'engagement partenarial ainsi qu'avec la participation des entreprises partenaires.

2.0 MÉTHODOLOGIE - ACTIVITÉS PRÉLIMINAIRES

2.1 Choix et localisation du site d'essai

Le site d'essai est localisé sur le terrain des laboratoires lourds de l'INRS, situé au 2605 de la rue du Parc Technologique (Carillon) dans le parc technologique de la ville de Québec à Sainte-Foy. Le site a été choisi pour sa facilité d'accès, notamment pour les équipements de forage (Figure A1, Annexe 1), mais aussi afin de permettre un accès à long terme aux installations géothermiques.

Le forage géothermique et deux autres forages servant de puits d'observation sont 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, mais il présente une faible pente vers le pourtour ouest afin d'en faciliter le drainage. Les cartes et photos ci-dessous montrent l'emplacement du site et le paysage environnant (Figures 1 à 3).



Figure 1 : Localisation du site dans la ville de Québec.



Figure 2 : Localisation des forages sur le site de l'INRS.



Figure 3 : Localisation des forages sur le site de l'INRS.

2.2 Caractérisation des conditions géologiques et hydrogéologiques

La caractérisation des conditions géologiques et hydrogéologiques a été réalisée à partir d'une revue documentaire des archives disponibles pour la région administrative de Québec et ses environs. La géologie du site d'essai appartient aux roches des Basses-Terres de la plateforme du Saint-Laurent (Figures 4 et 5) et plus particulièrement à la Formation de Les Fonds du Groupe de Sainte-Rosalie qui repose sur les Shales de l'Utica. En surface, on retrouve des empilements sédimentaires quaternaires de différentes granulométries, surtout des dépôts glaciaires et marins de la mer de Champlain, sur une dizaine de mètres de profondeur. Ces dépôts peu perméables et compacts sont principalement constitués par des tills relativement fins avec une présence de cailloux et de blocs, surtout en fin de séquence vers 6 à 10 m de profondeur. Le roc sous-jacent est composé d'une succession hétérogène de plus de 200 m d'épaisseur composée de schistes et d'ardoises, souvent en association avec les carbonates (dolomie ou calcaire) et de roches gréseuses. Ces formations géologiques sont d'âge ordovicien moyen et supérieur (Comeau, 2006; Séjourné et al., 2012). Le roc schisteux est relativement tendre et peu perméable en raison de la granulométrie fine et du faible niveau de fracturation. Selon Duchaine et al. (2012), cité par Lemieux et al. (2014), la porosité de la matrice est assez faible et complémentée par la fracturation qui décroît avec la profondeur. Les valeurs de porosité sont comprises entre 0,16 et 6,00 % avec une moyenne de 3,25 %.

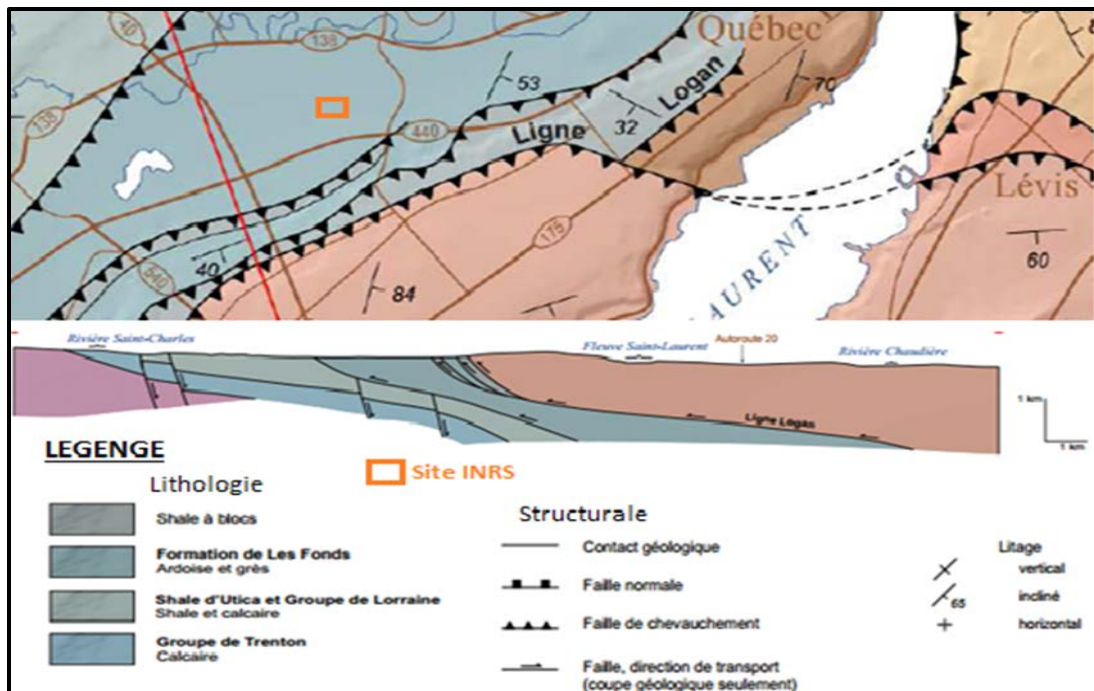


Figure 4 : Géologie simplifiée de la région de Québec (extrait du dossier public 7086, CGC).

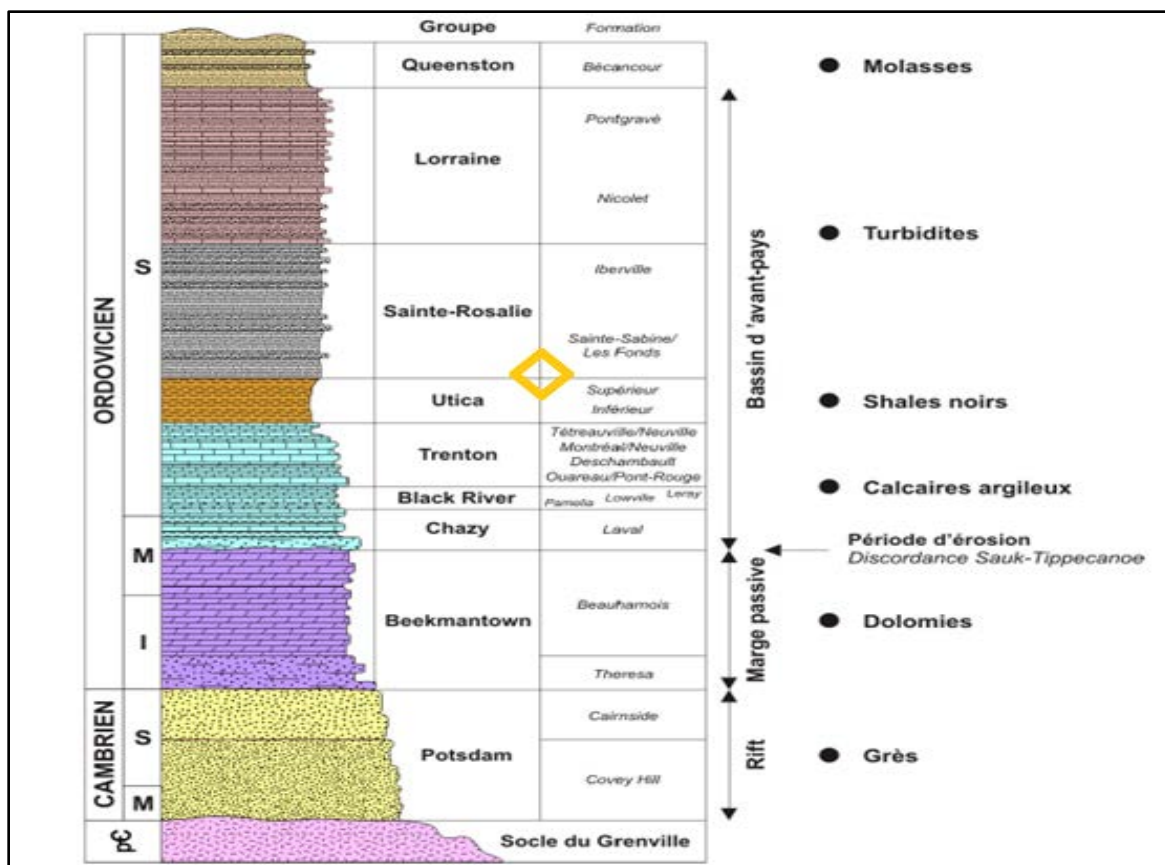


Figure 5 : Synthèse lithostratigraphique régionale (modifiée de Bédard et al., 2013).

3.0 TRAVAUX DE TERRAIN

Les travaux sur le terrain ont été réalisés en trois étapes :

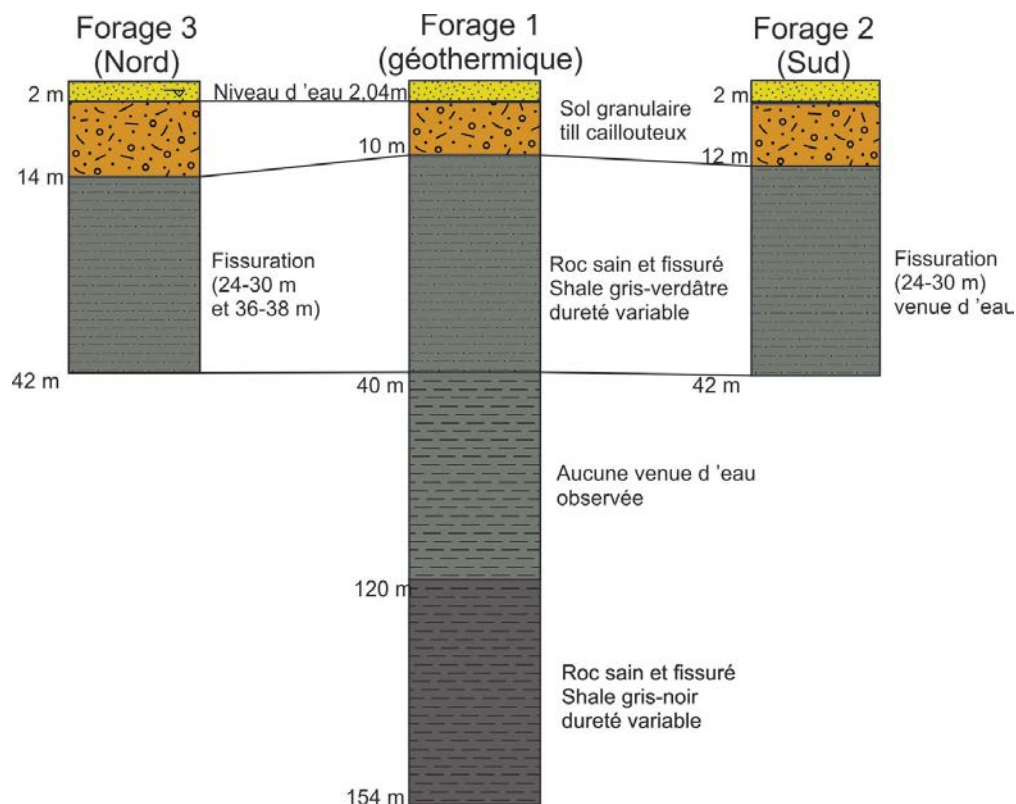
- Forage et installation du puits géothermique du 8 au 15 septembre 2015, en collaboration avec Forage géothermique.
- Mesures de température pour la caractérisation du profil thermique dans le forage géothermique et suivi du retour à l'équilibre en condition non perturbée par l'équipe de l'INRS du 10 au 19 septembre 2015 (avant le TRT1) et du 14 au 22 octobre (après le TRT 1).
- Essais TRT en collaboration avec ES, du 29 septembre 2015 au 09 octobre 2015 pour le TRT1 et du 22 au 25 octobre 2015 pour le TRT2.

3.1 Réalisation des Forages

Au total, trois forages ont été aménagés dont le forage principal qui a été équipé d'une boucle géothermique d'une profondeur de 153,8 m (505 pi) (Figure A2, Annexe 1). Deux autres forages d'une profondeur de 42 m (138 pi) chacun ont aussi été installés pour servir éventuellement de puits d'observation, en particulier pour des essais d'hydraulique et de géophysique.

Les forages ont été réalisés à l'aide d'une foreuse de marque Comacchio Geo 909 GT, dont le diamètre nominal de forage dans le roc est de 4,5 po. Cette foreuse spécialisée pour des travaux en géothermie est munie d'un système de perforation à double rotation et utilise des tubages vissés qui sont récupérables à la fin de l'installation. Le tubage a un diamètre extérieur de 6 pouces. Il a été enfoncé sur toute la partie granulaire du terrain et superficiellement ancré dans le roc (environ de 10 à 14 mètres de profondeur). Pour le socle rocheux, la foreuse utilise un système de percussion et de rotation avec un marteau pneumatique (fond de trou) muni de taillants en carbure. Le marteau fond de trou nécessite un apport important d'air comprimé, ainsi qu'une petite quantité d'eau pour le dégagement des déblais de forage vers la surface. L'air est fourni par un compresseur Sullair d'un débit de capacité nominale de 900 pieds cube par minute (p^3/min), à une pression de 600 livre par pouce carré (lbf/in^2). L'eau est aussi utilisée pour réduire la surchauffe et l'usure des taillants. Grâce à son système à double rotation et tubages vissés, la foreuse Comacchio est efficace dans la plupart des contextes géologiques, autant pour les matériaux granulaires que pour les différents types de roc. Les performances d'avancement sont d'environ 30 mètres/heure (100 pieds/heure) pour le roc tendre (schiste, calcaire) comme pour les conditions rencontrées sur le site de l'INRS. La foreuse Comacchio possède aussi un système de

traction sur chenilles qui convient à tous les types de terrain, en plus d'être équipée avec un système de chargement mécanisé des tubages et des tiges de forages. Ces systèmes améliorent la vitesse d'exécution par la réduction des opérations manuelles, ce qui réduit aussi les risques d'accident. Durant les opérations de forage, des échantillons ont été prélevés à partir du système d'éjection des débris et les profondeurs sont décrites au journal du forage (Figure A3, Annexe 1). La Figure 6 présente une coupe stratigraphique schématisée à l'endroit de chacun des forages; indiquant, entre autres, l'épaisseur des dépôts meubles ainsi que la position des principales zones d'hétérogénéités et d'écoulement souterrain dans le sous-sol.



3.2 Coupe lithostratigraphique et hydrogéologie du site

Les principales observations faites durant la réalisation de trois forages sont en concordance avec les informations géologiques régionales et locales compilées dans la documentation existante. L'épaisseur des dépôts meubles est relativement faible soit environ 10m avec un niveau statique de la nappe phréatique à 2m de la surface. La lithologie du roc est à dominance de schiste présentant des hétérogénéités de dureté et de composition avec des conditions d'écoulement de l'eau souterraine qui sont

généralement assez peu perméables. Des écoulements souterrains ont été observés et serait lié à des zones de fissuration peu profondes du roc (20-25m et 38-45m). Le niveau statique mesuré est de 2,04m; mais les venues d'eau observées sont faibles.

3.3 Aménagement de la boucle géothermique

À la fin du forage principal (forage 1), une boucle géothermique en HDPE sans entretoises (servant à espacer les deux tubes de la boucle en U) a été descendue jusqu'au fond du forage à 153,8 m (505 pi) et les tuyaux de la boucle ont été coupés à environ 1,5 m au-dessus de la surface pour permettre le raccordement de l'unité d'essai TRT (Figure A3, annexe 1). Le retrait du tubage de forage après l'installation permet à la boucle géothermique et au coulis d'être en contact direct avec la partie granulaire du sous-sol (mort terrain). Habituellement, une gaine d'acier permanente est laissée en place dans la partie granulaire lorsque les forages sont réalisés avec les foreuses utilisées pour les puits d'alimentation en eau. Pour la partie aménagée dans les dépôts non consolidés, comme pour la partie dans le roc, un coulis sable/bentonite a été mis en place pour que le contact thermique soit optimal tout le long de la boucle géothermique. Le coulis a été installé en partant du fond vers le haut pour s'assurer que toute la longueur de la boucle est enrobée. Le mélange de coulis utilisé est composé de la bentonite en poudre de marque Barotherm mélangée avec le sable selon les spécifications prescrites par le fabricant afin de respecter les caractéristiques optimales de conductivité thermique. Les proportions du mélange sont d'un sac de Barotherm Gold (22,7 kg) pour cinq sacs de sable de silice (22,7 kg) et 19 gallons d'eau (voir fiches techniques en annexe 4). Ce dosage du coulis avec le sable permet d'obtenir une conductivité thermique d'environ 1,7 W/(m-K) (1 Btu/(ft-hr-°F)). La boucle installée est un tuyau de polyéthylène de haute densité (PEHD) est de marque Versaprofiles, modèle SDR-11 de 3,16 cm (1,25) po de diamètre (voir fiches techniques en annexe 4). La Figure 7 présente un schéma de l'installation de la boucle de PEHD dans le forage.

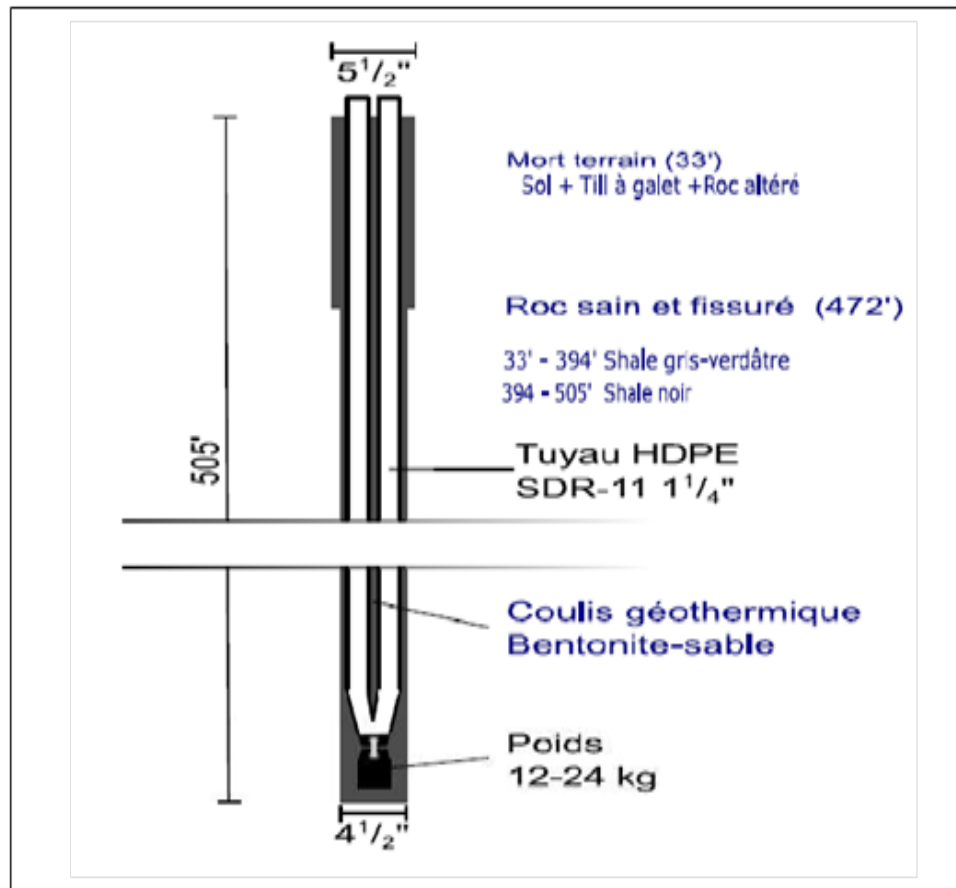


Figure 7 : Schéma d'installation de la boucle géothermique.

3.4 Mesure des températures initiales dans la boucle géothermique

Avant le début de chaque essai TRT, la température de l'eau dans la boucle géothermique a été mesurée pour s'assurer que les conditions thermiques sont stables et en équilibre avec la sous-surface. Une sonde RBR de température et de pression a été utilisée pour le profilage de précision sur toute la longueur de la boucle, soit 153,80m (Figure A3; Annexe 1). Les profils de températures mesurées avant chaque TRT sont présentés à la section 4.1 d'analyse des résultats.

3.5 Réalisation des Tests de réponse thermique

Les tests de réponse thermique (TRT) comprennent trois (3) étapes durant lesquelles la collecte des données (température, débit et taux d'injection de chaleur) est réalisée : (1) une étape de circulation d'eau seulement, (2) suivie d'une période d'injection de chaleur et (3) d'une phase de restitution thermique où la circulation d'eau est maintenue, mais l'injection de chaleur est arrêtée. Pour le projet, deux TRT ont été réalisées afin de mesurer et de comparer les propriétés thermophysiques du puits géothermique. Un

premier essai TRT 1 a été effectué du 29 septembre au 9 octobre 2015 avec un débit de circulation constant et une injection de chaleur contrôlée par la puissance électrique. Un deuxième essai TRT 2 a été complété du 22 au 25 octobre 2015 avec 2 paliers de débits de circulation et une injection de chaleur contrôlée par la puissance thermique. L'objectif dans la réalisation de deux types d'essais contrôlés par des paramètres électriques et thermiques est de valider les méthodes de mesurage et d'évaluer l'erreur sur les résultats (voir rapport ES, annexe 3) suivant le principe que "plus le système délivre une quantité de chaleur uniforme durant le TRT, plus le ratio bruit/signal est petit et donc plus l'incertitude diminue".

Les équipements utilisés pour les essais d'injection de chaleur ont été fournis par le partenaire ES. 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 des différents paramètres (puissance de chauffage, débit, température et pression). Parallèlement aux mesures effectuées avec le système d'ES, l'INRS a installé des capteurs de température directement à l'entrée et à la sortie du forage (Figure 8), ainsi qu'un débitmètre sur la ligne de circulation. L'exactitude de différentes composantes de mesure des systèmes ES et INRS est présentée au Tableau 1. La Figure 9 montre le schéma d'installation et les composantes du système d'essai TRT avec la boucle de circulation d'eau.

En positionnant les capteurs de température directement à la sortie de la boucle géothermique, l'objectif visé par l'INRS est d'éliminer les variations de température causées par des facteurs extérieurs et surtout les échanges thermiques avec l'ensemble du système d'injection de chaleur. Les équipements, dont l'unité d'ES, ont été installés dans une remorque (fournie par l'INRS) afin de les protéger des intempéries et de réduire l'effet des variations de la température extérieure (Figure 8). Le système d'ES, de même que toutes les composantes de mesure ont été isolés avec des panneaux de laines souples afin de minimiser les échanges de chaleur externes.

Tableau 1 : Exactitude des équipements de mesure de l'INRS et d'ES

Équipements INRS	
Sonde température pression RBR	±0,002°C
Sondes température Star-Oddi	+/-0,025°C
Débitmètre ABB FP315	0,4 % de la lecture
Équipements Énergie-Stat	
Sondes température (x 4)	0,15 °C
Sonde pression (x 2)	0,3%
Débitmètre	0,5 % de la lecture



Figure 8 : Vue globale des équipements d'essai TRT et logistique INRS-ES.

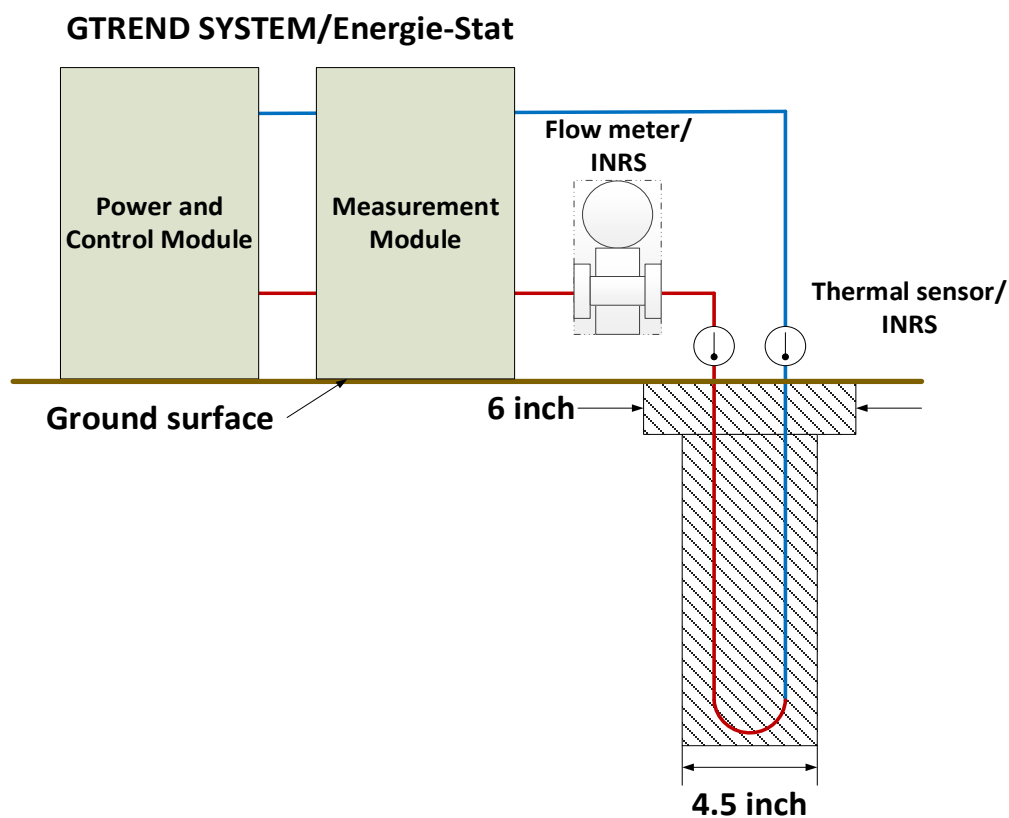


Figure 9 : Schéma d'installation de l'unité TRT d'ES et équipements de l'INRS.

La phase d'injection de chaleur a été précédée par environ deux heures de circulation nécessaire à la purge de l'air dans le système de circulation de la boucle et du TRT.

Durant cette période, les capteurs enregistrent la température non perturbée de l'eau de la boucle pour vérifier que cette dernière est stable avant le début de l'essai. Le test débute avec l'injection de chaleur contrôlée à distance par la pompe et l'élément chauffant de l'appareil. Par la suite, l'injection de chaleur est stoppée et la circulation du fluide est maintenue afin d'enregistrer l'évolution de la température vers le retour aux conditions initiales durant la restitution thermique. À la fin du test, l'unité a été désinstallée et démobilisée par ES. Le rapport technique d'ES est présenté en format PDF à l'annexe 3.

3.6 Méthodes de contrôle de la puissance thermique des TRT

Le système Gtrend d'ES permet de contrôler la quantité de chaleur lors des essais TRT, de deux façons différentes. La première méthode, utilisée pour le TRT 1, consiste à maintenir la puissance électrique de l'élément chauffant le plus constant possible. La quantité de chaleur injectée est une fonction de la différence de potentiel et de l'intensité de courant électrique (équation 1). Toutefois, ce type de contrôle est sensible aux variations de courant, ce qui affecte directement la puissance de chauffage. La deuxième méthode, qui est une innovation apportée par ES sur son système d'essai, permet un contrôle de la puissance thermique par l'autorégulation de la variation d'enthalpie du fluide circulant dans la boucle souterraine qui est calculée par la différence de température d'entrée et de sortie (Équation 2). L'avantage de ce type de contrôle est de réduire substantiellement les variations du taux d'injection de chaleur et donc de la température de l'eau par l'établissement d'une boucle de rétroaction instantanée sur l'ajustement de la puissance de chauffage. Aux fins d'analyse des TRT, les taux d'injection de chaleur ont été calculés avec l'équation 2 seulement.

$Q(t)(W) = U(t)(V) * I(t)(A)$	Eq. 1
-------------------------------	-------

$Q(t) = Q'(t) \left(T_{w,in}(t) - T_{w,out}(t) \right) \rho_{ss} c_{ss}$	Eq. 2
---	-------

Avec :

- Q – Taux d'injection de chaleur (W)
- U – Différence de potentiel (V)
- I – Intensité de courant (A)
- Q' – Débit (m³/s)
- $T_{w,in}$ – Température de l'eau à l'entrée (°C)
- $T_{w,out}$ – Température de l'eau à la sortie (°C)
- $\rho_w c_w$ – Capacité thermique volumique de l'eau (4.2 MJ/m³K)

4.0 MÉTHODES D'ANALYSES ET RÉSULTATS DES TRT

4.1 Profils de température avant les TRT

Pour le TRT 1, quatre profils de température ont été mesurés du 10 au 18 septembre 2015 (Figure 10), soit 19 jours entre la fin de l'installation de la boucle dans le puits et le début de l'essai TRT. Le 1^{er} profil, mesuré le 10 septembre, montre qu'après les travaux de forage, la température de la sous-surface est fortement perturbée. Le dernier profil du 18 septembre permet d'observer une température plus homogène, avec un minimum de 7,5 °C à environ 60 m puis une augmentation progressive à un peu plus de 8 °C jusqu'à la fin de la boucle à 153,8 m de profondeur. Les fichiers de données XLSX sont présentés en annexe 2 (Fichier 'Profils température TRT 1.xlsx').

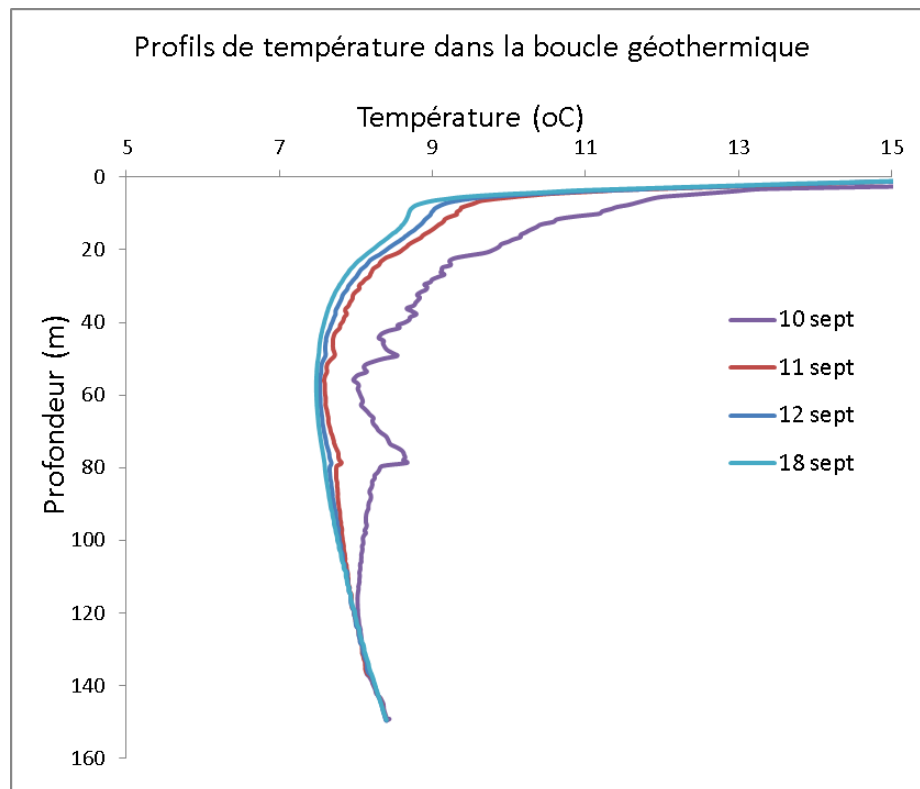


Figure 10: Profils des températures mesurées dans la boucle géothermique avant le TRT 1.

Pour le TRT 2, trois profils de température ont été réalisés les 14, 19 et 22 octobre 2015 (Figure 11) afin de s'assurer que la température était de retour à l'équilibre en se basant sur les valeurs initiales d'avant les travaux du premier TRT comme référence (le 18 septembre). Le 3^e profil du 22 octobre, soit juste avant le TRT 2, montre qu'après plus de deux semaines de la fin du TRT 1, la température dans le forage, était encore environ

0,45°C plus élevée qu'avant le TRT 1; avec une moyenne de 8,30 °C (de 15 m à 150 m). La température de la sous-surface n'était donc pas encore totalement de retour à l'équilibre lors du début du TRT 2 et pour l'analyse du deuxième essai, la température moyenne considérée a été de 8,30 °C. Comme pour le TRT 1, les données brutes et graphiques sont présentées en format EXCEL en annexe 2 (Fichier 'Profils température TRT 2.xlsx').

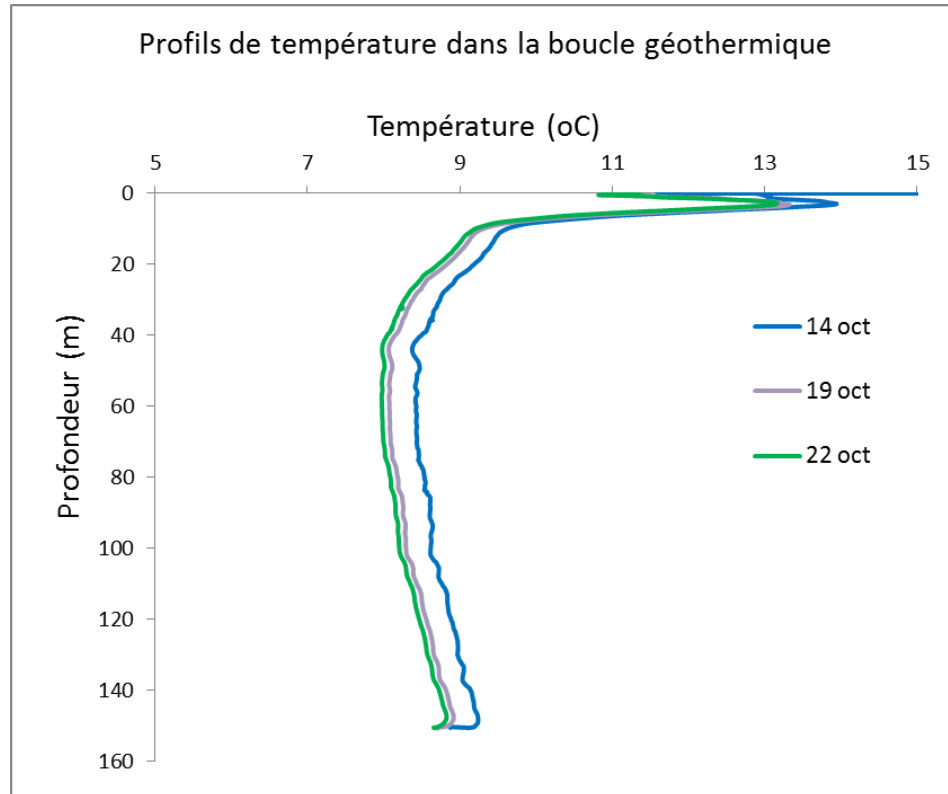


Figure 11: Profils des températures mesurées dans la boucle géothermique avant le TRT 2.

4.2 Méthodes d'analyses des TRT

L'analyse des données enregistrées lors des essais TRT permet d'évaluer la conductivité thermique de la sous-surface (λ_{ss}) et la résistance thermique du forage (R_{bh}). Pour les deux essais, TRT 1 et 2, les données sont analysées selon 2 approches différentes. La première méthode est basée sur la régression linéaire graphique des données représentant la température moyenne (entrée-sortie) en fonction du temps à l'échelle logarithmique. C'est la méthode la plus courante dans l'industrie. La pente qui sert à calculer la conductivité thermique de la sous-surface est déduite en excluant les 20

premières heures pour réduire les effets d'emménagement de chaleur dans le forage (Équation 3). Afin de simplifier l'analyse, la température moyenne calculée à l'aide de la moyenne pondérée par le facteur p « $T_{p-average}$ » a été utilisée. Cette moyenne représente mieux la distribution de température qui est asymétrique le long du puits (Marcotte et Pasquier, 2008). Pour chaque TRT, deux valeurs de conductivité thermique sont calculées et comparées à partir des données de température qui sont mesurées indépendamment par les systèmes de l'INRS et d'ES.

$\lambda_{ss} = \frac{q}{4\pi m}; \text{ pour } t_c \geq \frac{5r_{bh}^2 \rho_{ss} c_{ss}}{\lambda_{ss}}$	Eq. (3)
---	----------------

Avec :

- λ_{ss} – Conductivité thermique de la sous-surface (W/(m-K))
- q – Taux d'injection de chaleur par longueur unitaire (W/m)
- m – Pente du graphique de la température moyenne (entrée-sortie) vs $\ln(t)$ (°C/s)
- t_c – Critère de temps selon l'équation de la ligne source (s)
- r_{bh} – Rayon du puits (m)
- ρ_{ss} – Densité de la sous-surface (kg/m³)
- c_{ss} – Capacité thermique de la sous-surface (J/(kg-K))

L'estimation de l'erreur sur le calcul de la conductivité thermique a été effectuée avec la méthode de Witte (2013) selon l'équation 4.

$\frac{\delta \lambda_{TRT}}{\lambda_{TRT}} = \sqrt{\left(\frac{\delta Q}{Q}\right)^2 + \left(\frac{\delta H}{H}\right)^2 + \left(\frac{\delta m}{m}\right)^2}$	Eq. (4)
---	----------------

Avec :

- H – Longueur de la boucle géothermique (m)

L'erreur absolue associée à l'évaluation de la conductivité thermique $\delta \lambda_{TRT}$ est la racine de la somme des erreurs au carré de chacun des paramètres de l'équation 3. Le calcul comprend également l'erreur associée au taux d'injection de chaleur Q qui dépend de l'exactitude des mesures de débit de circulation du fluide dans la boucle souterraine et de la température d'entrée et de sortie (Tableau 1).

La deuxième méthode d'analyse des TRT utilise le principe de superposition graphique des données de température en fonction du temps (Raymond et al. 2011). Le but consiste à ajuster la conductivité thermique de la sous-surface et la résistance thermique du forage dans l'équation de la ligne source infinie qui décrit la distribution de la chaleur autour du forage géothermique (équation 5). 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 entre la réponse thermique calculée à partir de l'équation 5 et obtenue à partir des mesures du TRT (voir équation 6). Comme dans le cas de la méthode de la pente, la moyenne pondérée par le facteur p « $T_{p-average}$ » a été utilisée. Un des avantages de la méthode de superposition est que durant la période de restitution de chaleur, la résistance thermique du puits devient négligeable, ce qui permet d'estimer de façon quasi indépendante la conductivité thermique de la sous-surface et de réduire l'incertitude sur les paramètres du TRT (Raymond et al., 2011).

$\overline{\Delta T_w}(t) = q_i R_{bh} \sum_{i=1}^n (q_i - q_{i-1}) \frac{W(u)}{4\pi\lambda_{ss}}$	$\mu = \frac{r_{bh}^2}{4a_{ss}(t_i - t_{i-1})}$	Eq. (5)
--	---	---------

Avec :

- $\overline{\Delta T_w}$ – 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 estimer 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)

$S = \sum (\Delta T_{obs} - \Delta T_{mod})^2$	Eq. (6)
--	---------

Avec :

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

4.3 Calcul de la résistance thermique du forage selon les critères de conception

La résistance thermique inférée lors des TRT peut être comparée avec des valeurs estimées de façon théorique selon les critères de conception afin d'évaluer la performance du forage de 4,5 po utilisé dans le cadre de ce projet. Deux méthodes ont été utilisées à cet effet. La première est celle de Remund (1999), qui permet d'estimer de façon empirique la résistance thermique du forage à partir des caractéristiques de l'échangeur de chaleur, soit les dimensions des tuyaux et du forage, la conductivité thermique du coulis ainsi que l'espacement des tuyaux pour trois cas types. Cette première méthode suppose un forage 2D et est préconisée par l'American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Elle est utilisée par plusieurs

logiciels d'origine américaine pour le dimensionnement des systèmes géothermiques résidentiels. La deuxième méthode de Claesson et Hellström (2011) est analytique et permet de calculer, avec une solution exacte, la résistance thermique par un algorithme basé sur la méthode des multipôles. Cette deuxième méthode suppose toujours un forage 2D et est utilisée plus couramment en Europe, notamment en Suède où elle a été développée. La conductivité thermique de la sous-surface à la paroi du forage et la distance exacte qui sépare les tuyaux sont considérées dans le calcul en plus des paramètres mentionnés pour la méthode de Remund (1999). La méthode des multipôles est utilisée dans de nombreux logiciels de dimensionnement pour les systèmes géothermiques commerciaux comme Earth Energy Designer et GHLEpro.

4.4 Analyse des résultats et discussions

4.4.1 TRT 1 : Injection chaleur avec puissance électrique contrôlée et débit constant

Le test d'injection de chaleur a débuté le 05 octobre 2015 pour une durée totale de 160 heures, dont 2 heures de circulation avant l'essai; soit 81 heures en mode d'injection de chaleur et 77 heures de mesure de la restitution thermique. Les conditions du test sont résumées au tableau 2 avec les paliers de taux d'injection de chaleur choisis pour la résolution analytique avec la méthode de superposition des courbes. Les feuilles de calcul EXCEL pour le TRT 1 sont présentées en annexe 2 (Fichiers : Compilation TRT1 INRS et ES_Slope.xlsx et trt1_INRS-ES_data_Curves.xlsx).

La Figure 12 présente les températures d'entrée et de sortie de l'eau mesurées dans la boucle durant l'essai TRT 1 ainsi que la puissance totale calculée (données ES) à partir de l'équation 2. L'essai TRT 1 a été réalisé avec une puissance électrique contrôlée et un débit constant (18,9 l/min ou 5,0 gpm, débit d'ES) produisant une puissance thermique moyenne calculée de 9692 W (données de température INRS et débit ES) et de 10215 W (données de température d'ES et débit d'ES). La différence de puissance calculée provient de l'écart des températures mesurées à la sortie du forage et qui montrent en moyenne 0,4 °C de plus pour les données de l'INRS comparées à celles d'ES. Cette différence pourrait être attribuable à la position des capteurs de température des deux systèmes, ceux de l'INRS étaient situés directement à l'entrée et à la sortie de la boucle, alors que ceux d'ES se trouvaient dans un module placé après l'injection de chaleur du système TRT (Figures 8 et 9). Il est donc possible qu'il y ait eu des pertes de chaleur à l'endroit de différentes composantes du système situées à l'extérieur du forage. Par ailleurs, il est aussi possible que la différence soit imputable au fonctionnement des capteurs de température de sortie d'un des deux systèmes. Pour cette raison et jusqu'à ce que des vérifications sur les systèmes puissent être effectuées, les mesures de température du système de l'INRS sont considérées comme valeurs de références pour

l'analyse des résultats. Pour la même raison, les données provenant du débitmètre d'ES ont été considérées de meilleure qualité et sont utilisées dans les différents calculs.

Tableau 2 : Résumé des paramètres d'analyse de l'essai TRT 1.

Essai température INRS et débit Énergie Stat		
Début essai:	29-09-15	
Durée essai:	158,5 heures	
T _{0 ini}	7,894 °C	
r _{bh}	0,05695 m	
L _{bh}	153,8 m	
facteur pondération	-0,9999	
Taux injection chaleur moyen	9693 W	
Taux d'injection de chaleur par palier		
Temps (h)	Puissance (W)	Puissance (W/m)
0	0	0
24	9902	64
33	9597	62
42	9699	63
50	9877	64
59	9331	61
81	9439	61
115	145	1
157	79	1

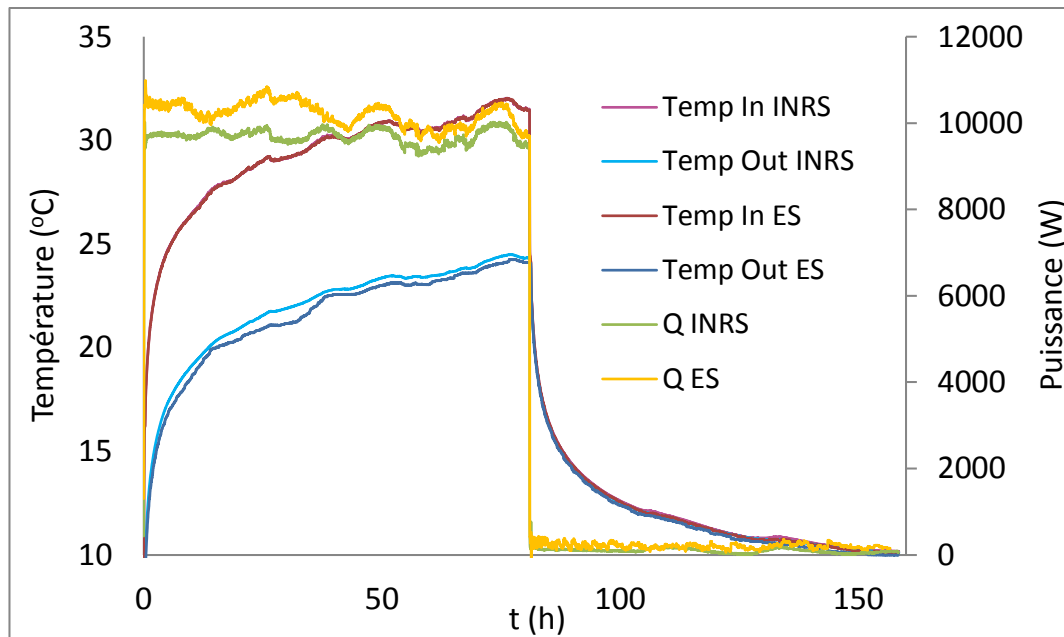


Figure 12 : Températures mesurées et puissance calculée Q, (TRT 1).

4.4.1.1 Résultats TRT 1 méthode 1, analyse selon la pente

Les données de température en mode d'injection de chaleur de 25 à 81 heures ont servi à l'analyse. Pour la méthode de la pente (Figure 13), seul le paramètre de la conductivité thermique de la sous-surface a été présenté. L'estimation de la résistance thermique du forage étant moins précise avec la méthode de la pente, ce paramètre est présenté seulement avec la méthode 2 de superposition des courbes à la section suivante. Les résultats du TRT 1 sont comparés au Tableau 3.

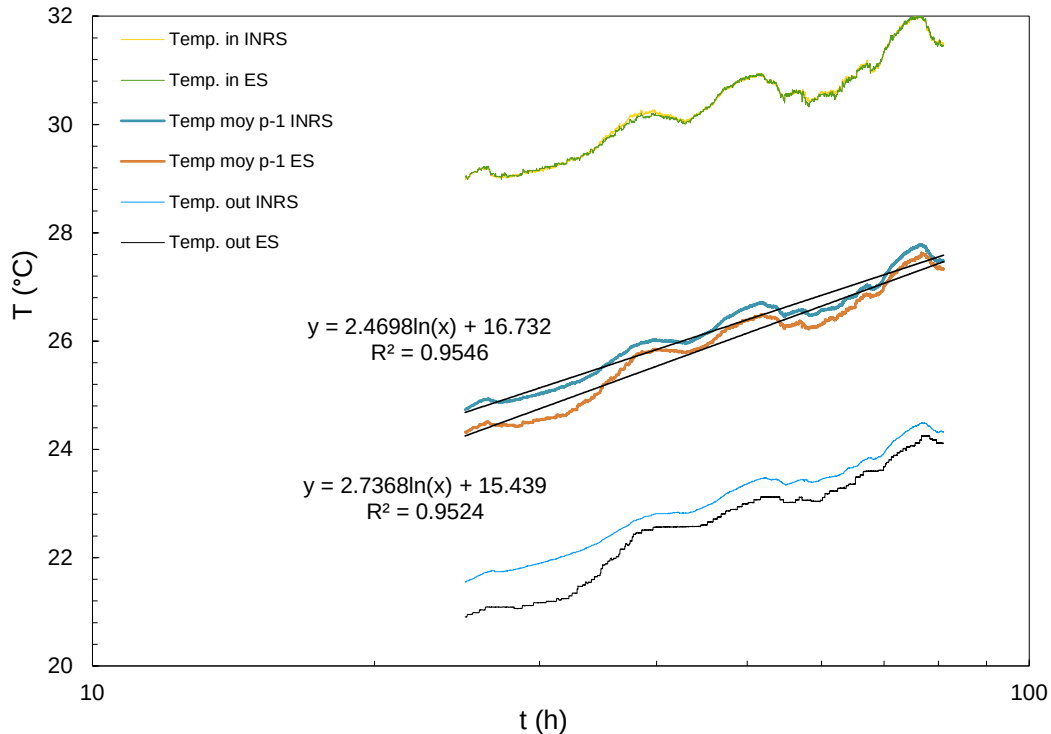


Figure 13 : Températures mesurées en fonction du temps logarithmique, données INRS et ES (TRT 1).

4.4.1.2 Résultats TRT 1 méthode 2, analyse avec superposition des courbes

Pour la méthode 2, les données combinées des températures (INRS) et de débit (ES) ont servi à l'analyse des résultats. La Figure 14 montre les données de température pour la période du test en mode injection de chaleur de 25 à 81 heures et celles durant la restitution thermique pour la période de 81 à 158 heures. L'optimisation de la solution pour les deux périodes a été réalisée avec le solveur d'équation intégré dans EXCEL afin de minimiser la somme des résidus au carré (équation 6). Les résultats sont présentés au Tableau 3.

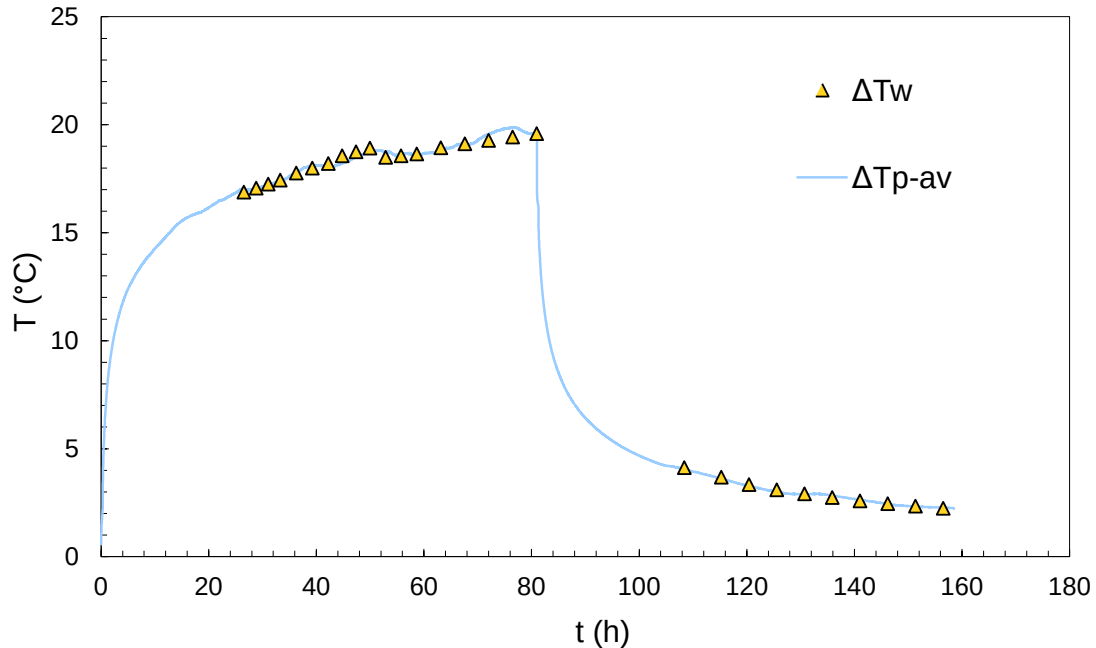


Figure 14 : Températures moyennes (entrée - sortie) pondérées par le facteur p et températures ajustées analytiquement, données de température INRS et de débit ES (TRT 1).

4.4.1.3 Comparaison des résultats de l'essai TRT 1

Les résultats obtenus avec les méthodes de la pente selon les données de température de l'INRS et d'ES prises séparément lors du TRT 1 indiquent des valeurs de conductivité thermique de la sous-surface qui sont respectivement de 2,03 et 1,93 W/(m-K), pour une différence de 5,3 % (Tableau 3). Selon la méthode de superposition des courbes, la valeur de conductivité thermique de la sous-surface est de 1,75 W/(m-K) et la résistance thermique du forage de 0,088 (m-K)/W. Cette dernière méthode permet une estimation plus exacte de la conductivité thermique, en particulier due au fait que la superposition des courbes se fait sur deux régimes différents d'injection et de restitution thermiques.

Tableau 3 : Comparaison des résultats de conductivité thermique de la sous-surface et de la résistance thermique du forage pour les deux méthodes d'analyse

Données essais TRT 1			
Méthode 1 – Pente			
	INRS	ES	Différence %
λ_{ss} (W/(m-K))	2,03 ± 0,033	1,93 ± 0,01	5,2
Méthode 2 – Superposition des courbes			
	INRS		
λ_{ss} (W/(m-K))	1,75		
R_{bh} ((m-K)/W)	0,088		

4.4.2 TRT 2 : Injection de chaleur avec puissance thermique contrôlée et deux paliers de débits

Le TRT 2 a débuté le 22 octobre pour une durée totale de 53 heures en mode injection de chaleur, dont 30 heures pour le premier palier de débit et 23 heures pour le deuxième palier de débit. Le test n'a pas permis de mesurer les températures lors de la restitution thermique et par conséquent, bien que les résultats soient présentés dans les sections qui suivent, ceux du TRT 2 sont considérés comme ayant plus d'incertitude que ceux du TRT 1. Les conditions du test sont résumées au Tableau 4 avec les paliers de taux d'injection de chaleur choisis pour la résolution analytique de la méthode de superposition des courbes. Les feuilles de calcul EXCEL pour le TRT 1 sont présentées en annexe 2 (Fichiers : Compilation TRT2_INRS et ES.xlsx et trt2_INRS-ES_data_Curves.xlsx).

La Figure 15 présente les températures d'entrée et de sortie de l'eau dans la boucle souterraine (INRS et ES) ainsi que la puissance totale calculée pour les deux paliers de l'essai. Pour le TRT 2, l'analyse de la réponse thermique du sol a été évaluée seulement en utilisant la méthode de la pente, puisque les températures durant la restitution thermique n'ont pas été mesurées. Les conditions du test sont résumées au Tableau 4 avec les paliers de taux d'injection de chaleur et les résultats du TRT 2 sont comparés au Tableau 5. La Figure 15 montre que les courbes de puissance calculées avec les données de l'INRS et d'ES sont différentes avec un profil de variations importantes pour les

données de l'INRS et totalement stable pour ES. Cette différence de valeur est due à la température de sortie des deux systèmes, qui comme dans le cas du TRT 1, ne montre pas exactement les mêmes valeurs, celle de l'INRS étant environ 0,5°C systématiquement plus élevées. Cette différence de résultats devra être investiguée lors de travaux ultérieurs. Cependant, il semble néanmoins y avoir eu moins de variation du taux d'injection de chaleur pour le TRT 2 que pour le TRT 1, suite à l'application du contrôle thermique du taux d'injection de chaleur.

Tableau 4 : Résumé des paramètres d'analyse de l'essai TRT 2

Début essai:	22-10-15	
Durée essai:	52,8 heures	
$T_{0\text{ ini}}$	8,3 °C	
r_{bh}	0,05695 m	
L_{bh}	153,8 m	
facteur pondération	-0,9999	
Durée essai période d'injection 1		
Durée essai:	30 h	
Débit:	6,3 GPM	
Taux injection de chaleur moyen:	8277 W	
Durée essai période d'injection 2		
Durée essai:	23 h	
Débit:	4 GPM	
Taux injection de chaleur moyen:	8625 W	
Taux d'injection de chaleur en puissance constante		
Temps (h)	Puissance (W)	Puissance (W/m)
0	0	0
5	8445	55
9	8163	53
15	8085	53
20	8199	53
29	8038	52
30	5670	37
39	8499	55
53	8629	56

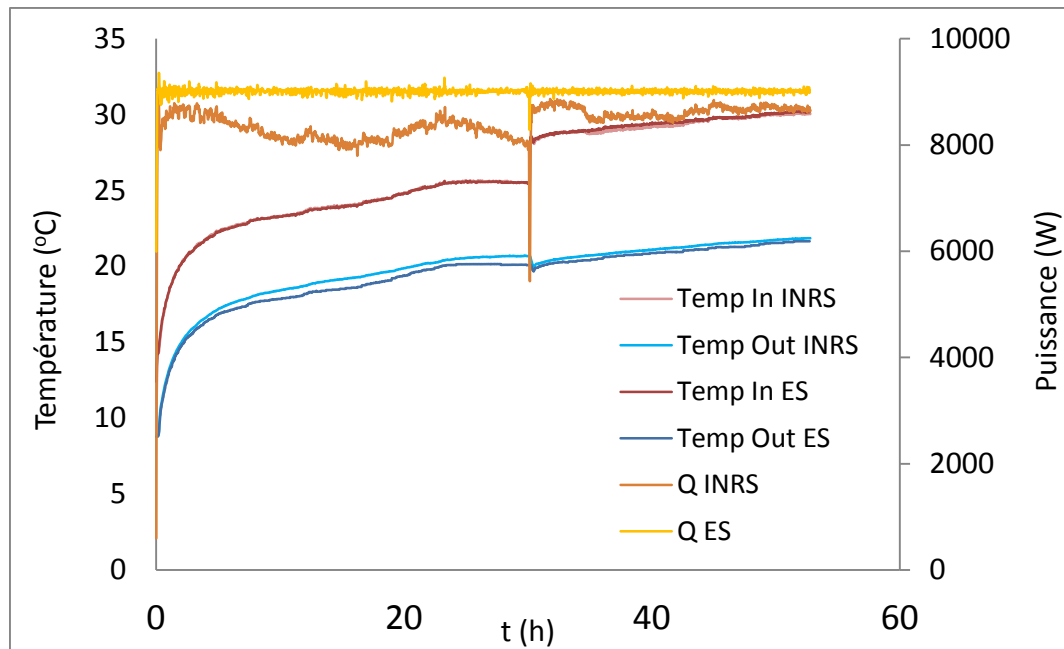


Figure 15 : Températures mesurées et puissance calculée Q (TRT 2).

4.4.2.1 Résultats TRT 2 méthode 1, analyse selon la pente

Pour le TRT 2, les trente premières heures ont servi à l'analyse des données pour estimer la conductivité thermique de la sous-surface pour les données de température de l'INRS et d'ES (Figure 15). Les résultats de conductivité thermique de la sous-surface sont présentés au Tableau 5.

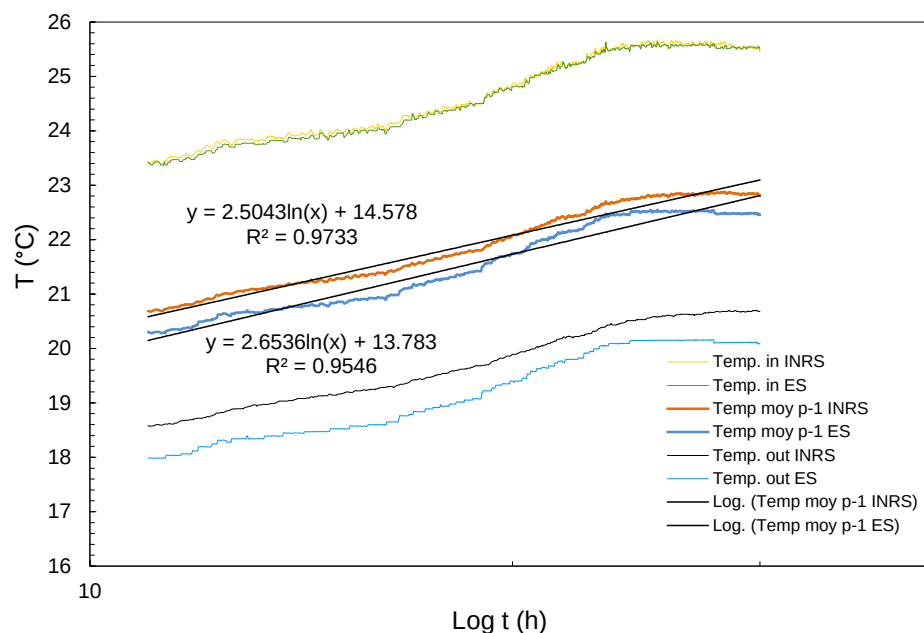


Figure 16 : Températures mesurées en fonction du temps logarithmique, données INRS et ES (TRT 2).

4.4.2.2 Résultats TRT 2 méthode 2, analyse avec superposition des courbes

Le TRT 2 a été réalisé avec 2 paliers de débits, sans la restitution thermique qui n'a pu être enregistrée. La Figure 16 montre les données de température pour la période de 53 h d'injection de chaleur avec la première période de 0 à 30 h et la deuxième période de 30 à 53 h. Comme pour le TRT 1, et pour les mêmes raisons, l'analyse des résultats a été effectuée avec les mesures de température de l'INRS et le débit d'ES. Les résultats pour le premier palier (période de 10 à 30 heures) sont présentés au Tableau 5.

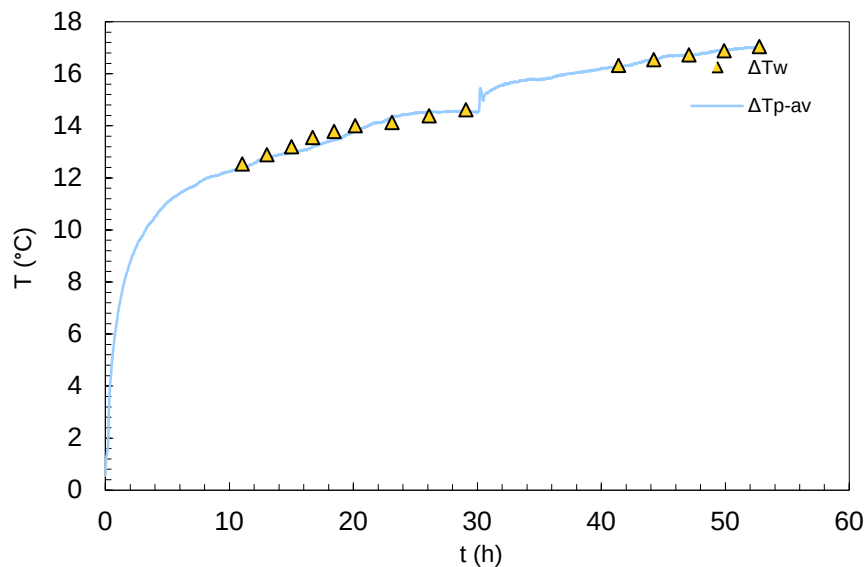


Figure 17 : Températures moyennes (entrée - sortie) pondérées par le facteur p et températures ajustées analytiquement, données de température INRS et de débit ES (TRT 2).

4.4.2.3 Comparaison des résultats de l'essai TRT 2

Les résultats de l'analyse avec la méthode de la pente selon des données séparées d'ES et de l'INRS sont sensiblement les mêmes avec des valeurs de conductivité thermique montrant seulement 2,6 % de différence (Tableau 5). La méthode de superposition donne un résultat intermédiaire pour la conductivité thermique du sous-sol égale à 1,75 W/mK.

L'absence de données de température pour la restitution thermique complique l'évaluation de la résistance thermique du forage qui présente toutefois des valeurs de 0,096 et 0,097 (m-K)/W pour les deux paliers de débit. Pour cette raison, les résultats d'analyse par superposition des courbes du TRT 2 sont considérés plus incertains que ceux du TRT 1.

Tableau 5 : Comparaison des résultats de conductivité thermique de la sous-surface et de la résistance thermique du forage pour les deux méthodes d'analyse.

Données essais TRT 2			
Méthode 1 – Pente			
	INRS	ES	Différence %
λ_{ss} (W/(m-K))	1,71 ± 0,03	1,76 ± 0,1	2,6
Méthode 2 – Superposition des courbes			
	INRS		
λ_{ss} (W/(m-K))	1,75*		
Rbh1 ((m-K)/W)	0,096		
Rbh2 ((m-K)/W)	0,097		
*Valeur imposée et provenant du TRT 1, méthode 2			

4.4.3 Comparaison de la résistance thermique inférée avec le TRT 1 à celles des modèles théoriques

Les résistances thermiques en forage ont été estimées avec les méthodes analytiques de Remund (1999) et de Claesson et Hellström (2011) (Figures 18 et 19). Pour chacune de ces deux méthodes, 4 scénarios de conception ont été considérés, soit des forages de 4,5 et 6,0 po de diamètre avec et sans entretoises de séparation des tuyaux de HDPE d'un diamètre de 1,25 po, installés en boucle simple (Fichier : Calculs_theoriques_Rb.xlsx, annexe 2). Les résultats analytiques sont comparés aux résultats du TRT 1 obtenus avec la méthode de superposition des courbes, montrés par les lignes pointillées rouges sur les graphiques. Les boîtes carrées de la Figure 18 indiquent la variation de R_{bh} pour un changement de ± 10 % de la conductivité thermique du coulis selon la méthode de Remund (1999). Une variation équivalente de la conductivité thermique du coulis et de l'espacement des tuyaux a été considérée pour définir les boîtes de tolérance avec la méthode des multipôles (Figure 19).

La valeur de R_{bh} du TRT 1, calculée par la méthode de la superposition des courbes, est inférieure aux valeurs théoriques des deux méthodes de Remund et de Claesson et Hellström pour des forages de 4,5 et 6,0 po de diamètre sans entretoises, égale si on

considère l'ajout d'entretoises pour un forage de 6,0 po et légèrement supérieure pour un forage géothermique de 4,5 po avec entretoises.

Dans tous les cas, la résistance thermique inférée avec le TRT 1 est équivalente aux valeurs calculées pour un forage de 6,0 po avec entretoises. Jusqu'à un certain point, la diminution de volume associée au forage d'un diamètre de 4,5 po amène une réduction de la résistance thermique comparable à celle induite par l'espacement des tuyaux par les entretoises dans un forage d'un diamètre de 6po. Les résultats obtenus sont donc cohérents avec l'hypothèse de la diminution de la résistance thermique des forages proportionnellement à la réduction du diamètre du forage.

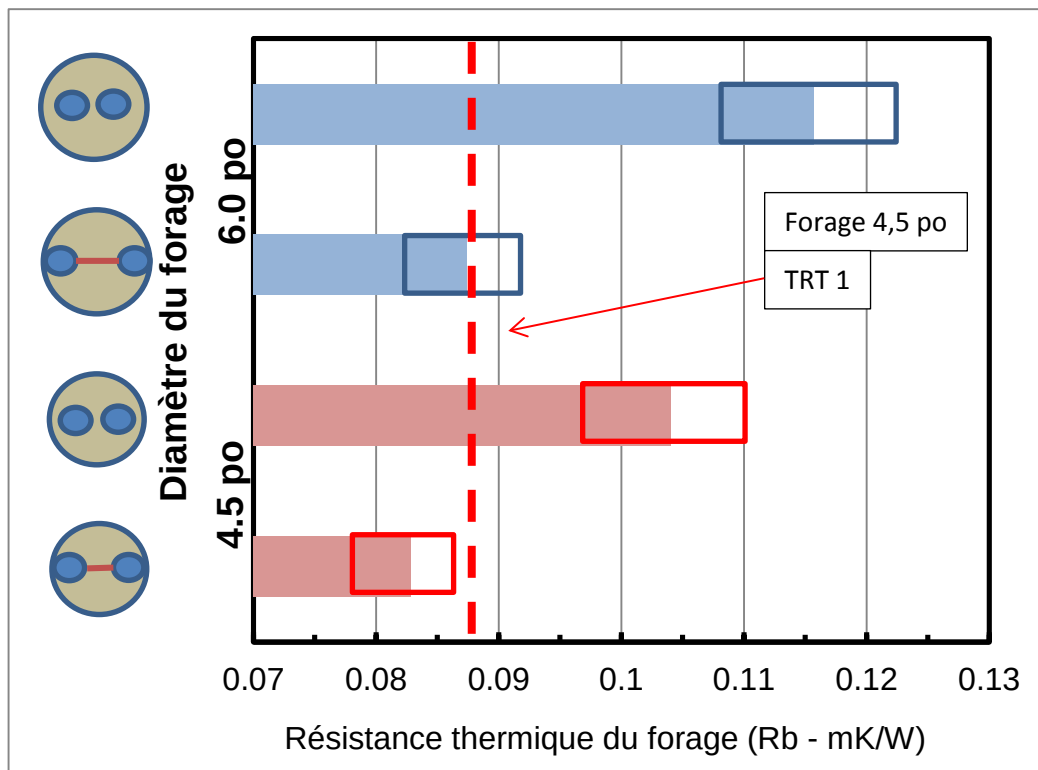


Figure 18: Comparaison de la résistance thermique du forage ($R_{bh} - (m-K)/W$) inférée avec le TRT 1 et calculée avec la **méthode de Remund** (1999).

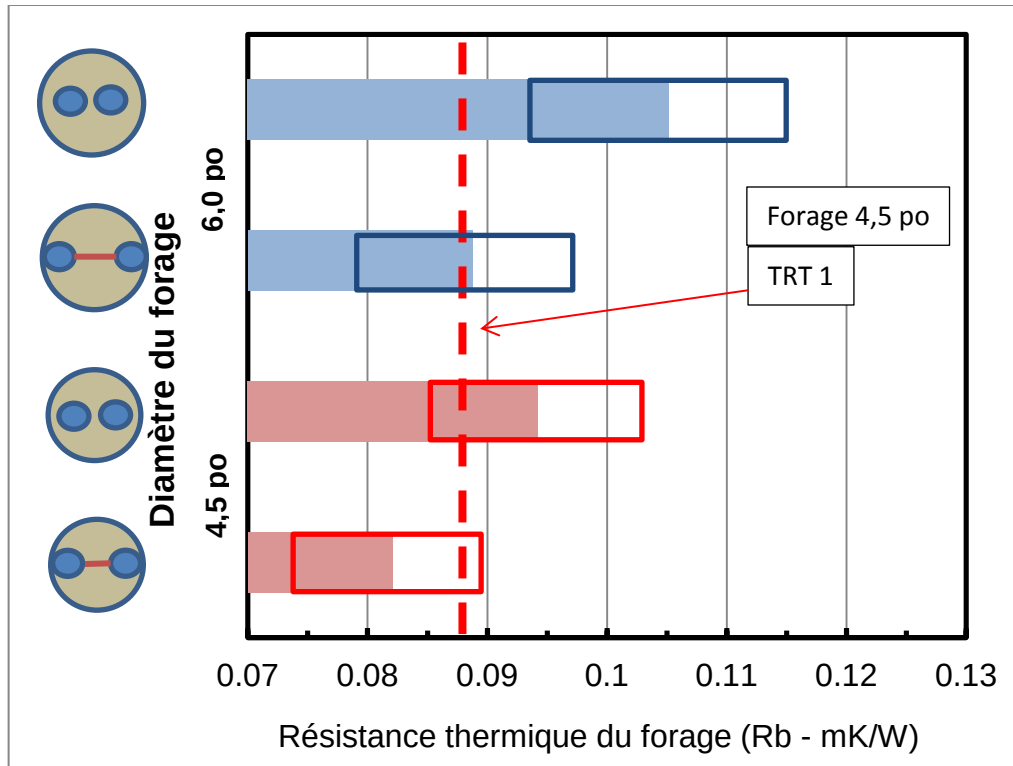


Figure 19: Comparaison de la résistance thermique du forage (R_{bh} – (m-K)/W) inférée avec le TRT 1 et calculée avec la **méthode des multipôles** (Claesson et Hellström, 2011).

5.0 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Ce rapport a présenté les résultats d'un projet recherche portant sur le développement des tests de réponse thermique (TRT) automatisés et l'évaluation de la performance des échangeurs de chaleur géothermique. Le projet a été réalisé aux Laboratoires pour l'innovation scientifique et technologique de l'environnement de l'INRS à Québec. Les travaux se sont déroulés à l'automne 2015 en partenariat avec les entreprises Forage Géothermique (FG) et Énergie-Stat (ES). L'entreprise FG a effectué le forage d'un diamètre de 11,3cm (4,5 po) et la mise en place d'une boucle géothermique verticale simple d'une profondeur de 153,8 m (505 pi) et ES a fournie l'unité d'injection de chaleur nécessaire à l'exécution des TRT. L'INRS a installé en parallèle un système de mesure des températures et du débit afin de comparer les résultats.

Les essais ont servi à vérifier deux protocoles d'injection de la chaleur de l'unité d'ES, soit par contrôle de la puissance électrique (TRT 1) et de la puissance thermique (TRT 2). Pour le TRT 1, des mesures ont été effectuées durant les phases d'injection de chaleur et de restitution thermique, alors que seulement l'injection de chaleur a été suivie durant le TRT2. Au terme des essais, les données de température obtenues par l'INRS et

ES, pour les deux TRT, ont montré des résultats comparables, à l'exception des mesures à la sortie de la boucle géothermique, où une température plus élevée d'environ $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ a systématiquement été observé pour les données de l'INRS. Les travaux n'ont cependant pas permis de définir si cette différence provenait de pertes de chaleur du système de circulation ou encore d'une différence de mesure d'un des capteurs de l'INRS ou d'ES. Dans le doute, l'analyse des TRT a privilégié les données les plus fiables, soit les températures provenant de l'INRS et de débit provenant du système d'ES. Enfin, dans le but d'améliorer les résultats, les analyses ont été effectuées à partir de la température moyenne du fluide qui considère la distribution asymétrique de la température le long du forage.

Pour chaque TRT, les données obtenues ont été analysées avec l'équation de la source de chaleur linéaire et infinie pour les méthodes de la pente et de la superposition des courbes. Pour la méthode de la pente, l'analyse des données du TRT-1 conduit à des résultats comparables avec une différence de 5,2 %, entre ceux de l'INRS et d'ES, alors que cette différence est de 2,6 % pour le TRT-2. La diminution de l'écart entre les conductivités thermiques estimées avec les données de l'INRS et d'ES suggère un effet bénéfique du contrôle de la puissance thermique injectée dans le forage. Cependant, les valeurs de conductivité thermique estimées à partir des données d'ES étant systématiquement plus basses, la position des capteurs de température pourrait être un élément à vérifier lors de futurs projets. De plus, le contrôle de la puissance thermique devrait être expérimenté davantage afin d'évaluer l'effet sur la précision de l'estimation des propriétés thermiques de la sous surface et du forage géothermique. De façon générale, l'erreur calculée pour les résultats de l'INRS est d'environ 3 fois moindre que pour ceux d'ES, principalement due à l'exactitude des capteurs de température d'ES qui est supérieure à ceux de l'INRS (tableau 1).

Pour la méthode de superposition des courbes, les résultats du TRT1, calculés à partir des données combinées de température de l'INRS et de débit d'ES, indiquent une conductivité thermique de la sous-surface de $1,75\text{ W/(m-K)}$ et une résistance thermique du forage égale à $0,088\text{ (m-K)/W}$. La méthode de superposition des courbes permet une estimation fiable des paramètres lorsqu'il y a un suivi de la restitution thermique. Ainsi, pour le TRT 2, comme l'essai a débuté avant le retour à la température initiale et que la restitution thermique n'a pas été suivie, les calculs ont été effectués en imposant directement la valeur de la conductivité thermique du TRT 1 au solveur. Les valeurs de résistance thermique calculées du TRT 2 pour les deux paliers d'injection de chaleur avec respectivement $0,096$ et $0,097\text{ (m-K)/W}$.

Au final, la résistance thermique inférée pour le TRT 1 à partir de la méthode de superposition des courbes, est inférieure ou dans la marge d'erreur des valeurs calculées pour un forage de 6,0 po avec les méthodes analytiques de Remund (1999) et de Claesson et Hellström (2011). L'aménagement d'échangeurs de chaleur dans un forage de diamètre réduit de 4,5 po semble donc offrir des performances équivalentes, sinon meilleures dans certains cas, qu'une installation similaire dans un forage de plus gros diamètre. Par ailleurs, la réduction du diamètre foré de 6,0 à 4,5 po et conséquemment de presque la moitié du volume de coulis utilisé, permet une réduction importante du coût d'installation. En plus, l'utilisation de tubages vissés et récupérables par FG, permet d'éliminer l'installation de tubages soudés traditionnellement laissés en place par les technologies de forages courantes, ce qui peut aussi se traduire par des économies importantes.

En conclusion, les technologies ayant servies à la réalisation de ce projet, avec la contribution des partenaires Forage Géothermique et Énergie-Stat, suggèrent qu'il est possible de réduire les coûts d'installation des systèmes géothermiques, mais aussi d'améliorer le dimensionnement des échangeur de chaleur par l'acquisition de meilleures données. L'utilisation de ces technologies aurait tout avantage à être plus répandu au sein l'industrie. Il est donc suggéré d'inclure dans les futurs projets de recherche un volet d'analyse économique afin d'évaluer les retombées de ces technologies.

RÉFÉRENCES

- Bédard K., Comeau F.-A., et Malo M., 2013. «Modélisation géologique 3D du bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent», Rapport final IINRS CO2-2013-v1.5, disponible sur l'Internet : <http://espace.inrs.ca/1643/1/R001439.pdf>
- Castonguay S. et Nadeau L., 2012. « Géologie simplifiée de la région de Québec », Commission géologique du Canada, Québec, dossier public 7086, disponible sur l'Internet : http://wmsmir.cits.rncan.gc.ca/index.html/pub/geott/ess_pubs/290/290089/of_7086.pdf
- Claesson J. et Hellström G., 2011. «Multipole method to calculate borehole thermal resistances in a borehole heat exchanger ». HVACR Res. 17, 859–911.
- Comeau F.-A., 2006. « Structure et stratigraphie de la zone parautochtone des Appalaches taconiennes dans la région de Québec». Mémoire de Maîtrise en sciences de la Terre, Université Laval, disponible sur internet : <http://theses.ulaval.ca/archimede/fichiers/24122/ch01.html>
- Duchaine, Y., Tourigny, Y., Beaudoin, G., & Dupuis, C. (2012). Potentiel en gaz naturel dans le Shale d'Utica, Québec (Rapport préparé pour le ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs dans le cadre de l'évaluation environnementale stratégique sur le gaz de schiste). Québec, Québec: Université Laval, Disponible sur internet : http://www.bape.gouv.qc.ca/sections/mandats/gaz_de_schiste-enjeux/documents/PR3.5.1.pdf
- Jacques L., 2015. «Influence des erreurs de modèle et de mesure sur les résultats d'interprétation d'un essai de réponse thermique», Mémoire de Maîtrise, École Polytechnique de Montréal, disponible sur l'Internet : <https://publications.polymtl.ca/1696/>
- Lemieux J.-M., Nowamooz A., Molson J., et Therrien R., 2014. «Modélisation numérique de la migration du méthane dans les Basses-Terres du Saint-Laurent». Présentation à St-Hyacinthe, Études E3-10, disponible sur l'Internet : <http://rqes-gries.ca/fr/archives-et-documents/rapports-memoires-et-cartes/266-ees->

modelisation-numerique-de-la-migration-du-methane-dans-les-basses-terres-du-saint-laurent-.html

- Marcotte D., et Pasquier P., 2008. «On the estimation of thermal resistance in borehole thermal conductivity test», *Renewable Energy* 33, 2407–2415.
- 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
- Remund C.P., 1999. «Borehole thermal resistance: Laboratory and field studies », *ASHRAE Trans.* 105, 439–445.
- Sanner, B., Hellström, G., Spitler, J.D., Gehlin, S., 2013. « More than 15 years of mobile Thermal Response Test – a summary of experiences and prospects», Présentation au EGC 2013.
- Séjourné S., Lefebvre R., et Malet X., 2012. « Synthèse hydrogéologique du Shale d'Utica et des unités sus-jacentes (Lorraine, Queenston et dépôts meubles) », Rapport de Recherche I292 (INRS/CGC-MDDEP), disponible sur l'Internet : <http://geogratias.gc.ca/api/fr/nrcan-rncan/ess-sst/dddebdfc-8198-5c9c-b076-f94849f6817a.html>
- Witte H.J.L., 2013. «Error Analysis of Thermal Response Tests», *Applied Energy*, 109, 302-311.
- Zhanga C., Songb W., Suna S., Pengc D., 2015. «Parameter estimation of in-situ thermal response test with unstable heat rate», DOI: 10.1016/j.energy.2015.05.074. disponible sur l'internet: <http://www.freepaperdownload.us/1751/Article5192732.htm>

6.0 ANNEXES

ANNEXE 1 - Figures et photos complémentaires



Figure A1 : Équipements de forage.



Figure A2 : Opérations de forage.



Figure A3 : Mise en place de la boucle géothermique en HDPE et du coulis dans le forage.

Figure A4 : Journal de forage avec position des échantillons (logs)

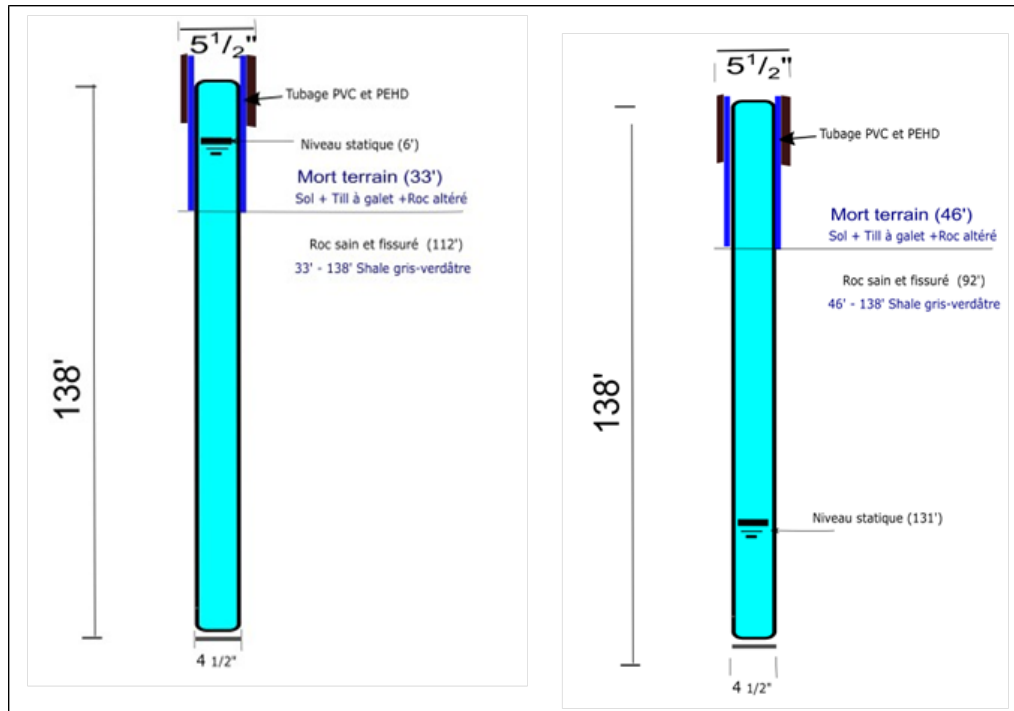


Figure A5 : Installations des puits d'observation.



Figure A6 : Mesure de la température dans la boucle géothermique et sonde de pression et de température RBR.

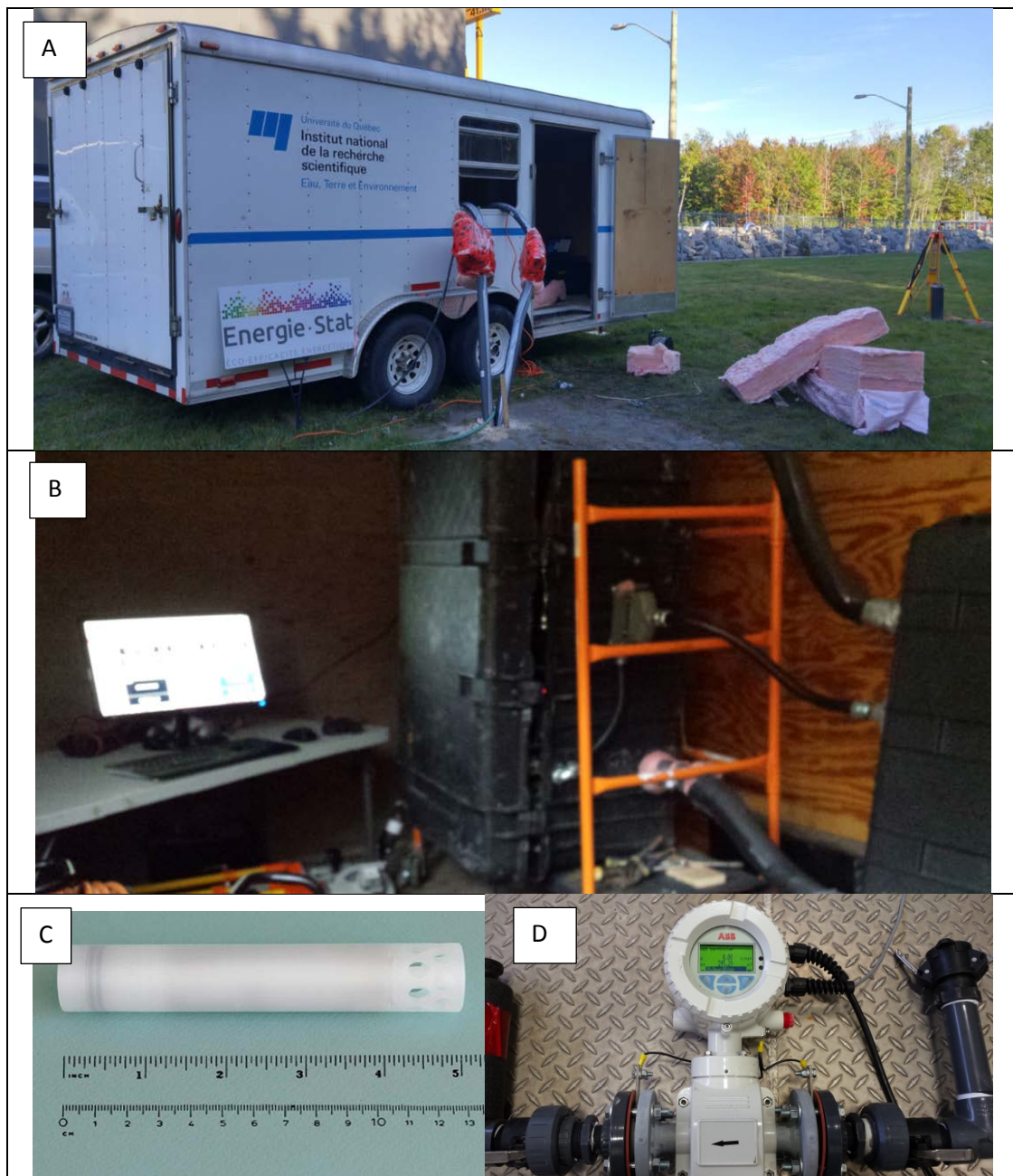


Figure A7 : A: Remorque contenant les équipements de mesurage du test de réponse thermique. . B: Système «Gtrend» de Énergie-Stat. C: Mesure des températures de l'INRS avec le capteur Star Oddy, et D : Débitmètre ABB de l'INRS.

ANNEXE 2 – Fichiers électroniques des feuilles de calculs EXCEL

TRT1 Comparaison temperature INRS et ES_Slope

TRT2 Comparaison temperature INRS et ES_Slope

trt1_INRS-ES_data_Curves

trt2_INRS-ESdataCurves

Calculs_theoriques_Rb

ANNEXE 3 - Rapport technique d'Énergie-Stat



GTrend TRT System Experiment In Collaboration with INRS

Prepared by: Patrice Kwemo
President of Énergie-Stat

Fernando López
Director of Thermal Technologies

CONTENT

- **OBJECTIVES**
- **MEASSUREMENT PARAMETERS**
 - 1st Gtrend TRT Measurement (controlled by electric power)
 - 2nd Gtrend TRT Measurement (controlled by thermal power)
- **SIGNAL QUALITY ANALYSIS**
- **DETERMINATION OF THERMAL PROPERTIES**
 - Observation of Temperature
 - Ground Thermal Conductivity, Thermal Diffusivity and Borehole Thermal Resistance
- **COMPARATIVE ANALYSIS**
- **CONCLUSIONS**

OBJECTIVES

Objective 1: validate the reliability (for commercial and scientific applications) of the Gtrend System to determine ground thermal properties through the thermal response test;

Objective 2: analyse the difference on the results and on the operational parameters of the TRT when the heat injection process is controlled by electrical and thermal power - included in the Gtrend System;

Objective 3: analyse the impact on the TRT results when computing the observed response temperature using the T_{aveg} (average function) and $T_{\text{aveg-p}}$ (polynomial function) models;

Objective 4: test and validate the applicability of the Gtrend mobile experience with INRS experts.

MEASSUREMENT PARAMETERS

1st TRT Measurement:

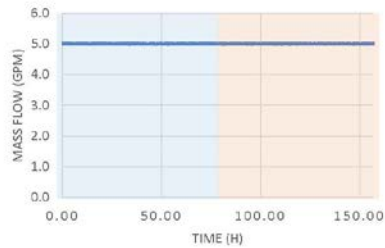
- Date: October 5, 2015
- Duration: 157 h
 - Duration of heat injection: 80 h
 - Duration of heat rejection: 77 h
- Flow rate: 5 gpm
- Controlled by: electrical power
 - Set point: 8300 W

2nd TRT Measurement:

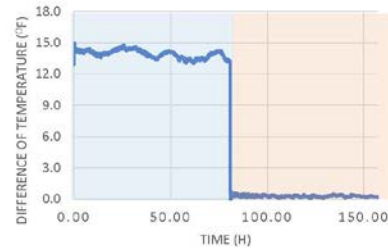
- Date: October 15, 2015
- Duration: 53.5 h
- Flow rate:
 - 6.3 gpm (duration: 27 h)
 - 4.0 gpm (duration: 26.5)
- Controlled by: thermal power
 - Set point: 9000 W

MEASUREMENT PARAMETERS - 1st TRT

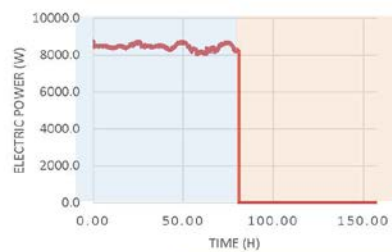
Mass flow fixed at 5 gpm



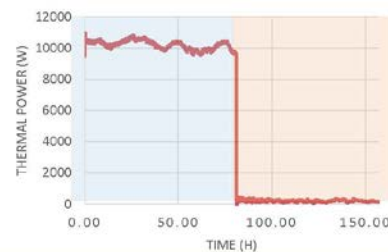
Difference of temperature ($T_{in} - T_{out}$)



Electrical power

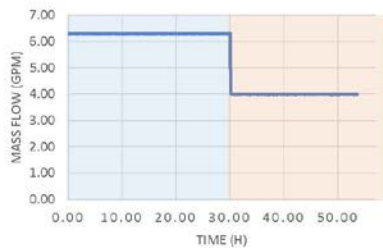


Thermal power ($500 \cdot \dot{m} \cdot (T_{in} - T_{out})$)

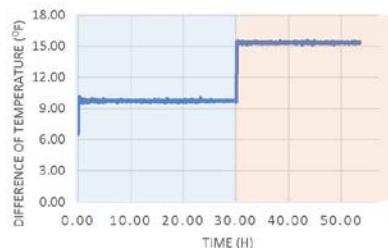


MEASUREMENT PARAMETERS – 2nd TRT

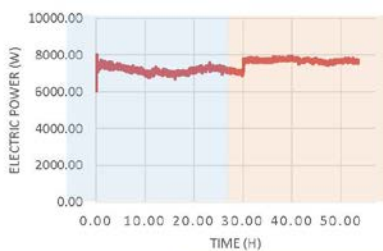
Flow rate: 6.3 and 4.0 gpm



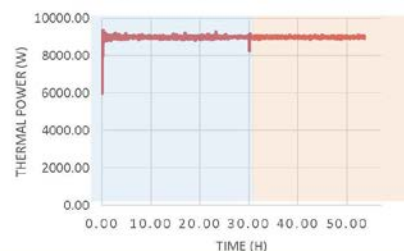
Difference of temperature ($T_{in} - T_{out}$)



Electrical power



Thermal power ($500 \cdot \dot{m} \cdot (T_{in} - T_{out})$)

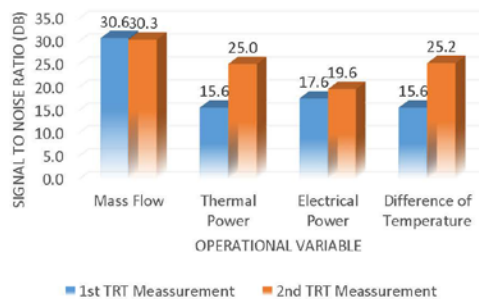


SIGNAL QUALITY ANALYSIS

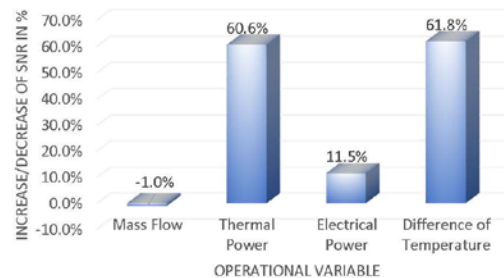
The accuracy and precision of the results greatly depend on the ability of the TRT system to maintain stable the amount of heat delivered to the borehole.

The SNR is the variable adopted to measure the signal quality of the TRT experiment when controlled by electrical and thermal power.

Comparison of the SNR when TRT measurement controlled by electrical and thermal power.



Increase of the SNR of the operational variables when controlled by thermal power.

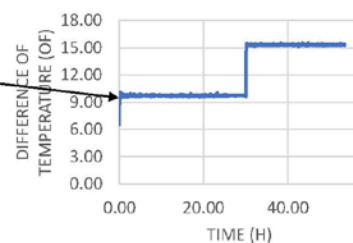
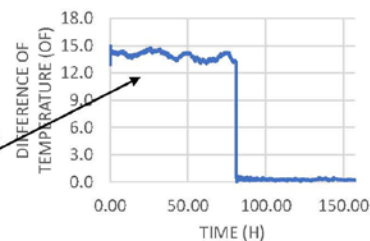
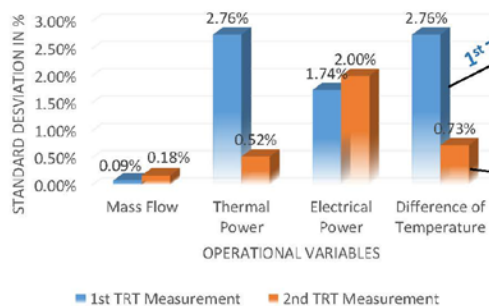


SIGNAL QUALITY ANALYSIS

The accuracy and precision of the results greatly depend on the ability of the TRT system to maintain stable the amount of heat delivered to the borehole.

The SNR is the variable adopted to measure the signal quality of the TRT experiment when controlled by electrical and thermal power.

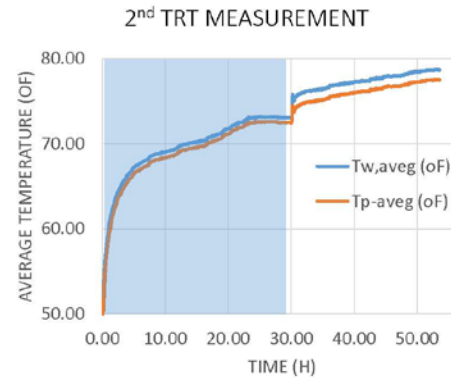
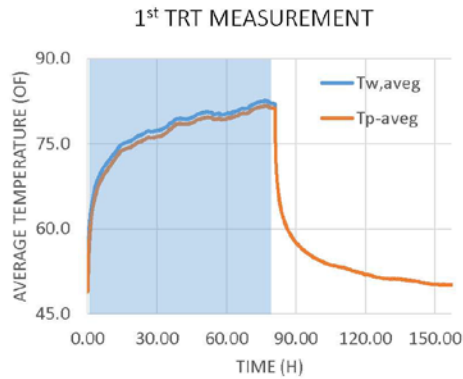
Comparison of the standard deviation (level of noise) of the operational parameters when controlled by electrical and thermal power.



DETERMINATION OF THERMAL PROPERTIES

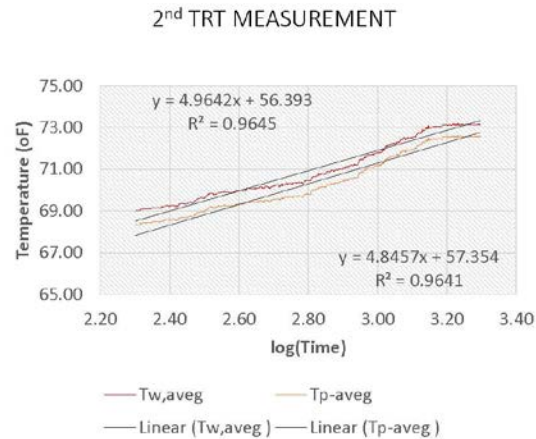
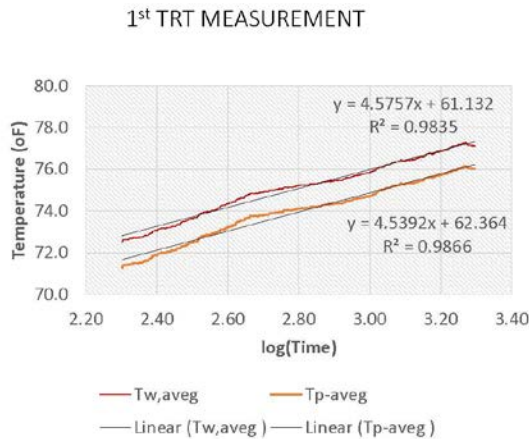
Observed temperature: the observed temperature is computed from four temperature sensors: two located at the inlet and two at the outlet of the borehole. The temperature curves are computed using two models, given by the following equations:

$$T_{w-aveg}(t) = \frac{T_{w,in}(t) + T_{w,out}(t)}{2} \quad T_{p-aveg} = \frac{p * (|T_{w,in} - T_o|^{p+1} - |T_{w,out} - T_o|^{p+1})}{1 + p * (|T_{w,in} - T_o|^p - |T_{w,out} - T_o|^p)}$$



DETERMINATION OF THERMAL PROPERTIES

Thermal conductivity: the line source model was applied to estimate the soil thermal conductivity. This method requires the computation of the late time slope from the observed temperature. The late time slope was obtained after 10 h from the beginning of the heat injection process.



DETERMINATION OF THERMAL PROPERTIES

Thermal diffusivity: the thermal diffusivity of the soil was estimated from the geologic stratigraphy provided by INRS-ETE – Rapport de fin de travaux. Based on the rule of mixtures and for a multicomponent system, the ground thermal diffusivity is determinate from the weighted average of the specific properties of each component of the system. Thus, the following expression is used:

$$\alpha_s = \phi_1 \alpha_1 + \phi_2 \alpha_2 + \dots + \phi_n \alpha_n$$

Thermal Diffusivity					
Estimated from the geologic stratigraphy provided by INRS-ETE - Rapport de fin de travaux					
Based on the rule of mixtures and for a multicomponent system					
Geologic stratigraphy	Depth (ft)	From Rule of Mixture		For each stratigraphy unit	
		Composition %	α (ft ² /day)	α (ft ² /day)	α (ft ² /hr)
Terre (Loam)	6.6	0.013	0.46	0.0059	
Roc	32.8	0.065	0.86	0.0555	
Argile (Clay)	354.3	0.698	0.5	0.3488	
Argile (Clay)	111.6	0.220	0.5	0.1098	
Total	505.3	0.99		0.5201	0.0217

DETERMINATION OF THERMAL PROPERTIES

Borehole thermal resistance: the mathematical model used to estimate the borehole thermal resistance is a modification of the line-source model for a U-type pipe. This method requires the computation of the intercept value or loop temperature at one hour

Results of the ground thermal properties:

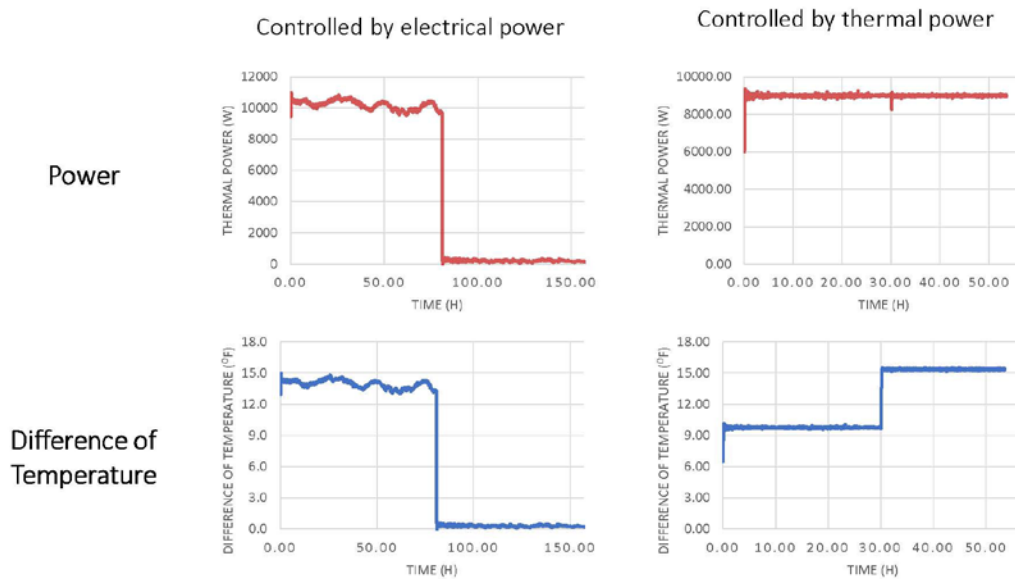
1st TRT MEASUREMENT

Thermal Properties Computation			
	$T_{w,avg}$	$T_{p,avg}$	
Borehole Length, L =	505.27	505.27	ft
Diameter, d =	0.38	0.38	ft
Borehole Radius, rb =	0.19	0.19	ft
Heat Power, P =	10203.68	10203.68	W
Late Time Slope, m =	4.53	4.71	
Undisturbed Ground Temperature, Ts =	45.50	45.50	°F
Temperature @ t = 1hr, T1hr =	73.10	73.10	°F
Soil Heat Capacity, C =			
Soil Thermal Conductivity, ks =	1.2117	1.1635	Btu/hr-ft-F
Soil Thermal Diffusivity, α =	0.0217	0.0217	ft ² /hr
Borehole Thermal Resistance, Rb =	0.379169	0.378282	

2nd TRT MEASUREMENT

Thermal Properties Computation			
	$T_{w,avg}$	$T_{p,avg}$	
Borehole Length, L =	505.27	505.27	ft
Diameter, d =	0.38	0.38	ft
Borehole Radius, rb =	0.19	0.19	ft
Heat Power, P =	9000.20	9000.20	W
Late Time Slope, m =	4.85	4.96	
Undisturbed Ground Temperature, Ts =	63.01	62.02	°F
Temperature @ t = 1hr, T1hr =	73.10	73.10	°F
Soil Heat Capacity, C =			
Soil Thermal Conductivity, ks =	0.9981	0.9743	Btu/hr-ft-F
Soil Thermal Diffusivity, α =	0.0402	0.0402	ft ² /hr
Borehole Thermal Resistance, Rb =	0.090701	0.105266	

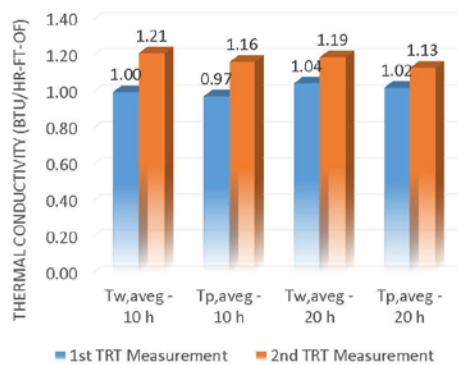
COMPARATIVE ANALYSIS



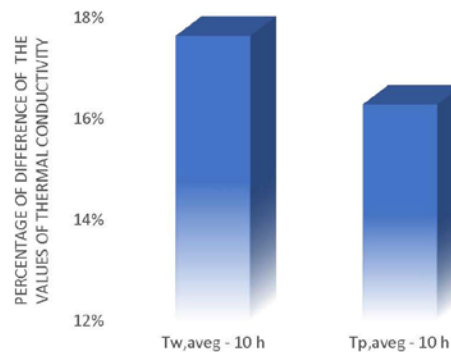
It can be observed than when the heat injection process is controlled by thermal power, more stable curves are obtained. This stability is caused by a reduction of the higher order oscillations produced by the thermal instability and consequently, an improve in the precision of the TRT results.

COMPARATIVE ANALYSIS

Comparative results on the value of the thermal conductivity when controlled by electrical and thermal power



Percentage of difference on the computed thermal conductivity obtained when controlled by electrical and thermal power.



Minor differences on the retrieved thermal conductivity were obtained when computing the observed temperature using the T_{avg} (average function) and T_{avg-p} (polynomial function) functions. However, major differences are found (of up to 18 %) when the heat injection process is controlled by electrical and thermal power.

CONCLUSIONS

Objective 1: validate the reliability (for commercial and scientific applications) of the Gtrend System to determine ground thermal properties through the thermal response test;

The Gtrend system was successively tested. The system was able to keep stability of several operational parameters, reducing the noise level and improving the precision of the results.

Objective 2: analyse the difference on the results and on the operational parameters of the TRT when the heat injection process is controlled by electrical and thermal power - included in the Gtrend System;

The results showed that when the heat injection is controlled by thermal power (feature developed by Energie-Stat) an increase of the SNR is achieved in both: the thermal power and difference of temperature. This fact brings important improvement since the reliability of the results greatly depends on the ability to transfer a fixed rate of heat into the borehole (see derivation of the line source model).

Objective 3: analyse the impact on the TRT results when computing the observed response temperature using the T_{avg} (average function) and T_{avg-p} (polynomial function) models;

No major differences were found in the obtained thermal conductivity when computing the observed temperature using the average or the p-average functions. However, it is recommended to use both regression models as a method of internal validation.

Objective 4: test and validate the applicability of the Gtrend mobile experience with INRS experts.

The Gtrend mobility service was tested. It was possible to perform several tasks, such as controlling the operational variables and monitoring in real time the TRT measurement.

ANNEXE 4 – Fiches techniques de Forage Géothermique



VERSAPIPE® HD80 GEO



Tuyau IPS en polyéthylène haute densité pour applications de géothermie
Fabriqué en PE3408/3608, certifié NSF geo, CSA C.448 et CSA B137.1

PORTÉE

Cette fiche technique a pour but de décrire les propriétés de la matière première utilisée dans la fabrication du tuyau **VERSAPIPE® HD80 GEO** de Versaprofiles. Elle décrit les exigences minimales que s'est fixé Versaprofiles dans la conception et la fabrication d'un tuyau destiné spécifiquement aux diverses applications de géothermie à circuit fermé, telles que les installations verticales, horizontales et lacs.

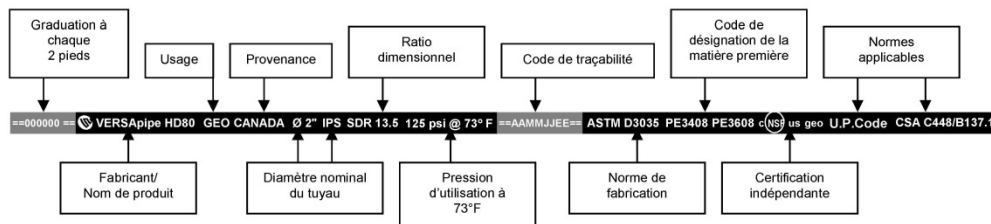
MATIÈRE PREMIÈRE

Tous les tuyaux de géothermie **VERSAPIPE® HD80 GEO** sont fabriqués à partir de polyéthylène haute densité PE3408/3608 rencontrant la classification 345464, ou équivalent, selon ASTM D3350. La matière première est additionnée de noir de carbone qui agit comme protection UV pour pouvoir être entreposée à l'extérieur. De plus, ce matériel offre une bonne protection contre les produits chimiques tels que le glycol et le méthanol.

(Voir les tableaux qui suivent pour de plus amples informations.)

MARQUAGE

Les tuyaux **VERSAPIPE® HD80 GEO** de Versaprofiles sont identifiés d'un marquage permanent et gradué à chaque deux pieds tel que l'image ci-dessous.



MANIPULATION, RACCORDEMENT ET INSTALLATION

Afin d'assurer l'intégrité du système de tuyauterie, il faut éviter d'enrouler ou de traîner les rouleaux de tuyau **VERSAPIPE® HD80 GEO** sur un sol non lisse ou parsemé de rocs ou autres obstacles pouvant occasionner des bris. Les pratiques d'installation et de remplissage du tuyau dans les puits verticaux doivent être en accord avec les normes préparées par l'IGSHPA, le PPI (Plastic Pipe Institute)¹ ainsi que les recommandations d'installation apparaissant dans les normes CSA C448.1 et B 137.1. Les tuyaux **VERSAPIPE® HD80 GEO** sont fusionnés par chaleur selon la norme ASTM F2620 et les recommandations du Plastic Pipe Institut (PPI)². Les raccords doivent être faits du même polyéthylène que le tuyau lui-même. Avant d'être enfoui, le circuit doit être vérifié de façon hydrostatique en y injectant de l'eau à une pression n'excédant pas 150% de la pression nominale relative au rapport dimensionnel. Ce test ne doit jamais être fait avec de l'air ou un gaz comprimé.

1 : <http://plasticpipe.org/pdf/chapter12.pdf>
2 : <http://plasticpipe.org/pdf/chapter09.pdf>

[FICHE TECHNIQUE]



VERSAPIPE® HD80 GEO

Tuyau en polyéthylène haute densité pour applications de géothermie
Fabriqué en PE3408/3608, certifié NSF geo, CSA C.448 et CSA B137.1

PROPRIÉTÉS DE LA MATIÈRE PREMIÈRE ET CLASSIFICATION SELON ASTM D3350

Propriétés	Code de classification (345464C)	Méthode d'essai ASTM	Valeurs typiques	
			Unités impériales	Unités SI
Densité	3	D 1505	-	0.945 g/cm ³
Indice de fluidité	4	D 1238	-	8 g/10min.
Module de flexion	5	D 790	125,000 psi	861 MPa
Résistance à la traction au seuil d'écoulement	4	D 638	3,300 psi	22.7 MPa
Résistance à la fissuration lente (PENT)	6	F 1473	>100 h	>100 h
Contrainte hydrostatique nominale @ 73°F (23°C)	4	D 2837	1,600 psi	11.0 MPa
Concentration massique en noir de carbone	C	-	-	2.3%
Élongation à la rupture		D 638	> 800%	> 800%
Résistance à l'impact IZOD, entaillé		D 256	> 11.0 pi-lb./po.	> 590 J/m
Température de fragilisation		D 746	<-100°F	<-78°C
Résistance à la fissuration sous contrainte		D 1693 (C Condition)	>1,000 h	>1,000 h
Conductivité thermique			0.28 BTU/(hr pi" F)	0.48 W/(m" K)
Capacité thermique massique			0.55 BTU/(lb" F)	2,300 J/(Kg" K)

DIMENSIONS STANDARDS DE PRODUITS SELON ASTM D3035*

Diamètre nominal, Po	Diamètre intérieur, Po (mm)	Tolérance Po (mm)	SDR 15.5		SDR 13.5		SDR 11		SDR 9	
			Épai. moy. paroi, Po (mm)	Poids au 100pi, LBS (Kgs)	Épai. moy. paroi, Po (mm)	Poids au 100pi, LBS (Kgs)	Épai. moy. paroi, Po (mm)	Poids au 100pi, LBS (Kgs)	Épai. moy. paroi, Po (mm)	Poids au 100pi, LBS (Kgs)
3/4	1.050 (26.70)	± 0.004 (0.10)	0.08 (1.99)	9.85 (4.48)	0.088 (2.24)	10.99 (5.00)	0.11 (2.67)	12.89 (5.86)	0.13 (3.23)	15.23 (6.92)
1	1.315 (33.40)	± 0.005 (0.13)	0.09 (2.39)	14.91 (6.78)	0.107 (2.72)	16.79 (7.63)	0.13 (3.30)	20.02 (9.10)	0.16 (3.96)	23.49 (10.68)
1 1/4	1.680 (42.20)	± 0.005 (0.13)	0.12 (2.97)	23.46 (10.66)	0.133 (3.38)	26.39 (12.00)	0.16 (4.09)	31.36 (14.25)	0.20 (4.95)	36.95 (16.80)
1 1/2	1.900 (48.30)	± 0.006 (0.15)	0.13 (3.38)	30.54 (13.88)	0.151 (3.84)	34.32 (15.30)	0.18 (4.67)	41.03 (18.65)	0.22 (5.69)	48.59 (22.09)
2	2.375 (60.30)	± 0.006 (0.15)	0.16 (4.14)	48.85 (21.30)	0.187 (4.75)	53.16 (24.15)	0.23 (5.82)	63.85 (29.09)	0.28 (7.11)	76.22 (34.65)
3	3.500 (89.90)	± 0.008 (0.20)	0.24 (6.10)	101.46 (46.12)	0.276 (6.99)	115.04 (52.29)	0.34 (8.56)	138.50 (62.85)	0.41 (10.49)	165.48 (75.22)
4	4.500 (114.30)	± 0.009 (0.23)	0.31 (7.82)	167.51 (76.14)	0.353 (8.97)	190.21 (86.46)	0.43 (11.02)	227.39 (103.36)	0.53 (13.46)	273.39 (124.37)
6	6.625 (168.28)	± 0.011 (0.28)	0.45 (11.51)	362.91 (164.96)	0.521 (13.23)	412.84 (187.65)	0.64 (16.21)	492.12 (223.69)	0.78 (19.81)	592.37 (269.26)
8	8.625 (219.08)	± 0.013 (0.33)	0.59 (14.99)	615.47 (279.76)	0.678 (17.22)	689.60 (317.95)	0.83 (21.11)	841.54 (382.52)	1.02 (25.81)	1004.04 (456.38)

*Informez-vous de la disponibilité des ratios et grandeurs affichés auprès de votre gestionnaire de compte. Versaprofiles peut aussi offrir des options qui ne sont pas listées dans ce document.

[FICHE TECHNIQUE]



VERSAPIPE® HD80 GEO

Tuyau en polyéthylène haute densité pour applications de géothermie
Fabriqué en PE3408/3608, certifié NSF geo, CSA C.448 et CSA B137.1

PRESSION D'UTILISATION		RAYON DE COURBURE MINIMUM		FACTEUR COMPENSATION THERMIQUE	
Ratio dimensionnel standard (SDR)	Pression d'utilisation (PSIG @ 73°F (23°C))	Ratio dimensionnel standard (SDR)	Rayon de courbure minimum à long terme à froid	Température maximale du tuyau en continu °F (°C)	Facteur multiplicatif
21	80	9 ou moins	20 X OD	-20 (-29)	2.54
17	100	11, 13, 5	25 X OD	-10 (-23)	2.36
15.5	110	15.5, 17, 21	27 X OD	0 (-18)	2.18
13.5	125	OD = Diamètre extérieur du tuyau.		10 (-12)	2.00
11	160			20 (-7)	1.81
9	200			30 (-1)	1.65
				40 (4)	1.49
				50 (10)	1.32
				60 (16)	1.18
				73.4 (23)	1.00
				80 (27)	0.93
				90 (32)	0.82
				100 (38)	0.73
				110 (43)	0.64
				120 (49)	0.58
				130 (54)	0.50
				140 (60)	0.43

CALCUL DE DILATATION THERMIQUE	CALCUL DU VOLUME DE FLUIDE
$\Delta L = L \alpha \Delta T$ Où ΔL = Variation de longueur du tuyau, pi L = Longueur initiale du tuyau, pi α = 10^{-6} 67 (coefficient de dilaton thermique, in/in/°F) ΔT = Variation de température, °F	$V = \pi r^2 L$ Où V = Volume, pi ³ (m ³) π = 3.1416... r = Rayon intérieur du tuyau (ID/2), pi (m) L = Longueur du tuyau, pi (m) Note : Pour obtenir le poids au pied, $P = V D$ Où P = Poids, lb V = Volume calculé, pi ³ D = Densité du fluide, lb/pi ³

Références :
-Normes ASTM D3035, D3350 et F2620
-Normes CSA B137.1 et C448.1
-Plastic Pipe Institute (PPI), http://plasticpipe.org/publications/pe_handbook.html



Versaprofiles peut changer des informations techniques sans préavis. Veuillez s.v.p. contacter le service à la clientèle afin de recevoir la dernière version mise à jour.

VERSAPIPE® HD80 GEO | Rev.2013092501

130 rue Aubé, Saint-Lazare-de-Bellechasse, QC, GOR 3J0
Tel. 1-877-335-PIPE(7473) | 418-883-2036 | Fax: 418-883-5044
Courriel: info@versaprofiles.com | www.versaprofiles.com

Dessin d'atelier no:6

Desc: Coulis_BAROTHERM GOLD



BAROTHERM® GOLD

Two-Part Thermally Conductive Grout



Description

BAROTHERM® GOLD thermally conductive grout is a bentonite material designed for use in grouting boreholes containing ground source heat loops, and related applications. BAROTHERM GOLD thermally conductive grout when combined with silica sand at various concentrations yields a grout with thermal conductivity values ranging between 0.4 and 1.2 BTU/hr-ft-°F (0.69 – 2.1 watts/m-°C).

Applications/Functions

The use of BAROTHERM GOLD thermally conductive grout promotes:

- A thermally conductive grout medium with low permeability for sealing ground source heat loops

Advantages

- Promotes efficient heat transfer
- Produces a uniform slurry for smooth pumping - No need to add extra water
- Creates a low permeability seal
- Develops a permanent, flexible seal to prevent commingling between aquifers
- No heat of hydration
- No Portland or aluminum cement added
- No gypsum added
- NSF/ANSI Standard 60 Certified

Typical Properties

- Appearance: Beige to tan powder
- Specific gravity: 2.6
- Thermal Conductivity (k) range: 0.4 – 1.2 BTU/hr-ft-°F
0.69 – 2.1 watts/m-°C
- Yield Volume range: 17.6– 41.8 gal/batch
66.7 – 158.2 liters/batch
- Grout Weight range: 10.1 – 15.0 lb/gal
1.21 – 1.80 SG
- Typical Permeability*: 3.0 x 10⁻⁸ cm/sec

Recommended Treatment

The recommended treatment is based on the desired thermal conductivity or k value. Please refer to the treatment tables below.

k (Btu/hr-ft-°F)	Silica Sand (lb/50 lb)	Water (gal/50 lb)	Slurry Volume Yield (gallons)	Density (lb/gal)	Total Solids
0.4	0	15.3	17.6	10.1	28.1%
0.69	100	15.3	22.2	12.5	54.0%
0.76	150	16.3	25.5	13.2	59.5%
0.88	200	17.3	28.8	13.7	63.4%
1.0	250	18.3	32.1	14.1	66.3%
1.0**	300	19.5	35.6	14.4	68.3%
1.1	350	20.0	38.5	14.7	70.6%
1.2	400	21.0	41.8	15.0	72.0%

*Permeability test data can be furnished upon request.

**The level of precision shown reflects the accuracy of the employed standard test method (ASTM D-5334) for measurement of thermal conductivity (k).

Because the conditions of use of this product are beyond the seller's control, the product is sold without warranty either express or implied and upon condition that purchaser make its own test to determine the suitability for purchaser's application. Purchaser assumes all risk of use and handling of this product. This product will be replaced if defective in manufacture or packaging or if damaged. Except for such replacement, seller is not liable for any damages caused by this product or its use. The statements and recommendations made herein are believed to be accurate. No guarantee of their accuracy is made, however.

© Copyright 2011 Halliburton. All Rights Reserved.

Rev. 09/14/2011

Recommended Treatment (continued)	k (watts/m·°C)	Silica Sand (kg/22.7 kg)	Water (liters/22.7kg)	Slurry Volume Yield (liters)	Density (SG)	Total Solids
	0.69	0	57.9	66.7	1.21	28.1%
	1.2	45.4	57.9	84.0	1.50	54.0%
	1.3	68.1	61.7	96.5	1.58	59.5%
	1.5	90.8	65.5	109.0	1.64	63.4%
	1.7	113.5	69.3	121.5	1.69	66.3%
	1.7**	136.2	73.8	134.7	1.73	68.3%
	1.9	158.9	75.7	145.7	1.76	70.6%
	2.1	181.6	79.5	158.2	1.80	72.0%

**The level of precision shown reflects the accuracy of the employed standard test method (ASTM D-5334) for measurement of thermal conductivity (k value).

Recommended Mixing Procedure

- Pre-treat mixing water with Soda Ash (sodium carbonate) to reduce total hardness to less than 100 mg/l and to raise pH to 8.5-9.5.
- Using a mixing device, **do not use a centrifugal pump**, blend one 50-lb (22.7 kg) bag of BAROTHERM® GOLD thermally conductive grout into appropriate volume of water. Rate of addition should be about 10 to 20 seconds per 50-lb (22.7 kg) bag.
- To enhance the thermal conductivity of the resultant grout, dry sand ranging between 50 and 70 mesh and containing greater than 99% silica is recommended.
 - Add sand to grout slurry immediately after mixing at a rate of 5 to 10 seconds per 50 pounds (22.7 kg) and pump. Additional mixing time after the addition of sand is not required and is not recommended.
- Blend, do not over mix. Place through a 1.25 inch (32 mm) minimum I.D. tremie into hole without delay.

Additional Information

- The grouting material and method selected will depend upon the specific subsurface environment including all prevailing geological and hydrological factors and any existing regulatory requirements. The grouting process may not be complete until the grout is static at the desired level.
- The use of bentonite may not be appropriate in environments where the formation water chemistry has a total hardness greater than 500 parts per million and/or a chloride content of greater than 1500 parts per million.
- If questions arise regarding subsurface environments it is always best to consult your local Baroid IDP representative to determine if the Baroid product of choice is appropriate for the given conditions.

Packaging

BAROTHERM GOLD thermally conductive grout is packaged in 50-lb (22.7 kg) multiwall paper bags, containing 0.7 ft³ (0.02 m³). 3000-lb supersacks are available by special order.

Availability

BAROTHERM GOLD thermally conductive grout can be purchased through any Baroid Industrial Drilling Products Retailer. To locate the Baroid IDP retailer nearest you contact the Customer Service Department in Houston or your area IDP Sales Representative.

Baroid Industrial Drilling Products
Product Service Line, Halliburton
3000 N. Sam Houston Pkwy E.
Houston, TX 77032

Customer Service	(800) 735-6075 Toll Free	(281) 871-4612
Technical Service	(877) 379-7412 Toll Free	(281) 871-4613

Dessin d'atelier no:7

Desc: GRANUSIL_Sable/Coulis

FICHE TECHNIQUE



CARACTÉRISTIQUES ET AVANTAGES

ST. CANUT, PQ

Les remblais et agrégats GRANUSIL® sont produits pour une grande variété d'usages mixtes, industriels et pour entrepreneurs, qui demandent un apport en silice d'une grande pureté ou qui requièrent une matière de remplissage chimiquement inerte. Les distributions granulométriques et les formes constantes du grain offrent un placement, une compacité et des propriétés mécaniques de haut niveau. Un contenu à haute densité en silice, combiné avec des ions solubles à faible niveau, des alcalis et des oxydes alcalins, produisent un effet sans réaction dans la plupart des environnements découverts et corrosifs.

Pour des applications d'usure excessive causées par une circulation intense, ces structures monocristallines durables résistent à l'abrasion et fournissent la stabilité requise par les personnes émettant les formules d'émulsions à haute concentration de solides, d'élastomères et de ciment et de systèmes de ciment modifiés. GRANUSIL® est le composant structurel préféré dans les systèmes allant des revêtements de planchers polymérisés aux terrains artificiels pour les sports.

Toutes les classifications GRANUSIL® sont traitées et calibrées selon des programmes stricts de contrôle de la qualité SPC et sous le programme d'assurance qualité QIP d'Unimin. Le résultat donne une pureté chimique et une distribution granulométrique toujours uniforme pour une performance prévisible des produits manufacturés ou préparés sur place.

PROPRIÉTÉS ET ANALYSES GRANULOMÉTRIQUE

Valeurs moyennes. Ces valeurs ne représentent pas une spécification.

Mesh Size		4095	4010	7030	8000
ASTM	Microns				
12	1.70mm	---	---	---	---
16	1.18mm	---	---	---	---
20	850	1.3	---	---	---
30	600	34.9	0.5	---	---
40	425	58.7	14.0	---	0.2
50	300	4.2	36.8	7.0	1.0
% Moyen Typique	70	0.7	28.3	39.2	6.2
Retenu Sur	100	0.2	13.5	30.3	7.4
Chacun des Tamis	140	---	4.6	13.5	14.2
	200	---	1.5	6.5	16.0
	270	---	---	---	10.3
	325	---	---	---	2.0
	PAN	---	0.8	3.5	42.7

Forme du grain	Angulaire - semi-circulaire	Visuel
Dureté (Mohs)	7.0	Échelle Mohs
Contenu d'humidité (%)	<0.1	ASTM C-566
Gravité spécifique (g/cm ³)	2.65	ASTM C-128
Densité en volume, aérée (lb/p ³)	92-95	ASTM C-29
Densité en volume, compacté (lb/p ³)	98-100	ASTM C-29

FICHE TECHNIQUE



ANALYSE CHIMIQUE

Valeurs moyennes. Ces valeurs ne représentent pas une spécification.

		Pourcentage moyen au poids			
		4095	4010	7030	8000
Dioxyde de Silicium	(SiO ₂)	99.61	99.43	99.17	95.98
Oxyde de Fer	(Fe ₂ O ₃)	0.04	0.05	0.06	0.25
Oxyde d'Aluminium	(Al ₂ O ₃)	0.13	0.20	0.27	1.55
Oxyde de Calcium	(CaO)	0.05	0.08	0.21	0.83
Dioxyde de Titane	(TiO ₂)	0.02	0.02	0.03	0.01
Oxyde de Magnésium	(MgO)	0.01	0.02	0.03	0.03
Oxyde de Potassium	(K ₂ O)	0.03	0.05	0.06	0.06
Oxyde de Sodium	(Na ₂ O)	tr	tr	tr	0.01
Perte au Feu	(P.A.F.)	0.11	0.15	0.23	0.21

INFORMATION POUR LES COMMANDES

Point d'expédition: **ST. CANUT, QUÉBEC**
TRANSPORTEUR D'ORIGINE: CHEMIN DE FER QUÉBEC- GATINEAU (QGRY)

Disponibilité: **EN SAC ET EN VRAC**
PAR CAMION ET CHEMIN DE FER

POUR L'INFORMATION SUR LES PRODUITS ET LE SERVICE À LA CLIENTÈLE:

É.U. ET CANADA 450-438-1238 • TÉLÉCOPIEUR 450-438-9235
INTERNATIONAL 203-442-2500 • TÉLÉCOPIEUR 416-626-1855



Silica Sands • Ground Silica • Feldspar • Ball Clay • Kaolin • Nepheline Syenite • High Purity Quartz • Olivine • Microcrystalline Silica • Bentonite Clay

LES NUMÉROS DE GRADE REPRÉSENTENT DES VALEURS OU DES RÉSULTATS RELATIFS. ILS NE SONT PAS UNE SPÉCIFICATION OU UNE GARANTIE DE PERFORMANCE.

AVERTISSEMENT DU DANGER POUR LA SANTÉ: L'inhalation prolongée de la poussière en relation avec les matériaux décrits sur cette feuille de données peuvent provoquer, à long terme, des lésions aux poumons, incluant la silicose, une maladie du poumon progressive, invalidante et parfois fatale. IARC et NTP Ont déterminé qu la silice cristalline peut causer le cancer du poumon chez l'homme. Le risque de lésions dépend de la durée et du niveau de l'exposition. Lorsqu'il s'agit de la silice cristalline appelée quartz, il faut suivre les normes de santé et sécurité de l'OSHA ou toute autre norme applicable. Consulter la fiche signalétique disponible, avant ouverture de l'emballage.

AVIS: Bien que l'information contenue dans la présente soit exacte au meilleur de notre connaissance, Unimin Canada Ltée rejette toute garantie quant à l'exactitude de celle-ci. Les recommandations et les suggestions sont énoncées sans garantie ou interprétation des résultats, puisque les conditions d'utilisation sont hors de notre contrôle. Tous les matériaux sont vendus avec les modalités de vente et les termes courants de Unimin Canada Ltée et à condition que l'acheteur procède à ses propres essais pour déterminer de la pertinence d'un tel produit quant à l'usage qu'en fera l'acheteur. Aucune déclaration contenue dans ce document ne sera interprétée comme une recommandation à enfreindre tout brevet.

Silice / contient de la silice
GRANUSIL® est une marque de commerce enregistrée de Unimin Corporation ou de ses filiales. Tous les droits sont réservés.

ST. CANUT – GRANUSIL II (10/12)