

Évaluation du potentiel géothermique des échangeurs de chaleur hybrides : boucle verticale semi-ouverte avec convection de l'eau souterraine du puits

Xavier Léveillé-Dallaire
Félix-Antoine Comeau
Jasmin Raymond

Rapport de recherche - I426



Institut national
de la recherche
scientifique

Résumé

Un test de réponse thermique a été réalisé dans un puits ouvert pour évaluer le potentiel des échangeurs de chaleur hybrides. Un mouvement de convection a été créé dans l'eau du puits à l'aide d'une pompe extirpant l'eau à 3 m de profondeur pour l'injecter plus profondément à 90 m. Les données ont ensuite été comparées avec les travaux antérieurs réalisés dans le même puits. Une conductivité thermique similaire (-1%) et une réduction de 70 % de la résistance thermique du forage ont été observées. L'impact de cette réduction sur la longueur de forage a ensuite été évalué dans le cadre d'un projet de ruelle géothermique. Un calcul de dimensionnement a été réalisé et des longueurs de forage ont été proposées pour 5 scénarios de conception des échangeurs de chaleur géothermiques, soit : (1) tube 1U de type polyéthylène haute densité (PEHD) et remplissage avec du coulis géothermique; (2) tube 2U de type PEHD et remplissage avec du coulis géothermique; (3) tube 1U de type GEOPERFORMX V2 et remplissage avec du sable de silice; (4) tube 2U de type GEOPERFORMX V2 et remplissage avec du sable de silice; (5) tube 1U de type PEHD sans remplissage avec convection dans l'eau du puits; (6) tube 2U de type GEOPERFORMX V2 sans remplissage avec convection dans l'eau du puits. Ce dernier permet une réduction de la longueur de forage requise pour les bâtiments variant entre 23 % et 36 %.

Nomenclature

L (m)	Longueur de forage
q (m W^{-1})	Taux d'injection de chaleur
Q (kW)	Charge de chauffage/climatisation
R (m K W^{-1})	Résistance thermique
r (m)	Rayon
S	Somme des résidus au carré
t (s)	Temps
T ($^{\circ}\text{C}$)	Température
λ ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	Conductivité thermique
C ($\text{J kg}^{-1} \text{m}^{-3} \text{k}^{-1}$)	Capacité thermique
ρ (kg m^{-3})	Densité
α ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)	Diffusivité thermique
ΔT	Incrément moyen de la température

Abréviations

TRT	Test de réponse thermique
ÉCG	Échangeur de chaleur géothermique
ÉCGH	Échangeurs de chaleur géothermiques hybrides
PACG	Pompe à chaleur géothermique
TEE	Température d'entrée de l'eau
TSE	Température de sortie de l'eau
PEHD	Polyéthylène de haute densité
ÉS	Écoulement d'eau souterraine
CC	Cellule de convection
1U	Tube en U simple
2U	Double tube en U
COP	Coefficient de performance
SCOP	Coefficient de performance saisonnier
PVC	Polychlorure de vinyle

Indices

a	annuel
b	puits
f	fluide
h	horaire
i	longueur unitaire
m	mensuel
mod	calculé
obs	observé
ss	sous-sol
W	eau
0	initial

Introduction

Contexte

Les échangeurs de chaleur géothermiques (ÉCGs) utilisés dans les systèmes géothermiques à boucle verticale fermée sont couramment remblayés avec un coulis composé de bentonite, de sable de silice et d'eau pour éviter l'infiltration d'eau de surface dans les aquifères. Cependant, dans les pays scandinaves, une approche différente est parfois adoptée; l'ouverture du puits non remblayé est fermée et un tubage de métal est ajouté jusqu'au roc solide. Ainsi, l'eau souterraine remplit la partie du puits normalement occupée par le coulis. Une telle méthode permet généralement de réduire la résistance thermique du puits puisque l'eau y circule librement. Des phénomènes tels qu'un écoulement souterrain (ÉS) naturel ou forcé ou encore des cellules de convection (CC) dues aux gradients de température vont avoir un impact sur les propriétés thermiques du puits et du sol. Ces ÉCGs sont donc considérés comme hybrides.

Les objectifs du projet étaient donc :

- Étudier le potentiel des échangeurs de chaleur hybrides (ÉCGHs) dans le contexte géologique de la ville de Québec, soit les ÉCGs à boucle semi-ouverte ;
- Déterminer l'impact de ces ÉCGs sur la longueur de forage requise dans un cas concret d'aménagement d'un système géothermique

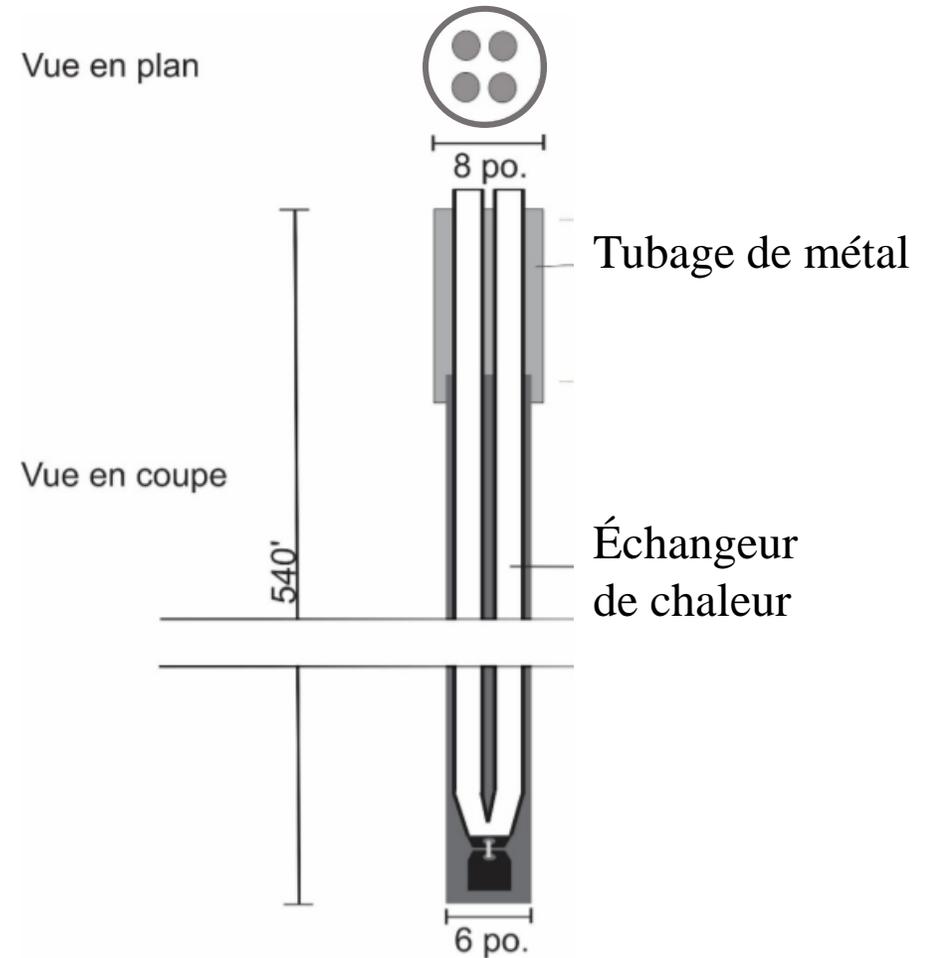


Figure modifiée de Ballard et al., 2018

Contexte

Pour atteindre le premier objectif, des travaux expérimentaux ont permis de déterminer l'influence d'une CC dans l'eau d'un puits géothermique sur la conductivité thermique du sous-sol et sur la résistance thermique du puits. La conductivité hydraulique au site à l'étude étant trop faible pour créer un ÉS, il a été préférable de créer une CC artificielle dans l'eau du puits pour mener à bien le projet. Les travaux font suite à un test de réponse thermique (TRT) réalisé en 2018 sur le même site dans un ÉCG avec double tube en U (2U) sur le terrain des Laboratoires pour l'innovation scientifique et technologique de l'environnement (LISTE) de l'INRS (Ballard et al., 2018). L'équation de la source de chaleur linéaire infinie et la méthode de superposition des courbes (Raymond et al., 2011) avaient été utilisées pour analyser les données. Un TRT implique de chauffer le fluide dans l'échangeur de chaleur et de le faire circuler en mesurant l'évolution de la température pour déterminer la conductivité thermique du sous-sol et la résistance thermique du puits. Dans le cas des travaux de Ballard, cette analyse indique une conductivité thermique de $1.74 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ et une résistance thermique de 0.05 m K W^{-1} (Raymond et al., 2019) dans les meilleures conditions.

Un TRT a été réalisé en 2017 dans un ÉCG situé sur le même site. Le puits de 154 m (505 pi) de profondeur et d'un diamètre de 114 mm (4.5 po) comprend environ 10 m (33 pi) de dépôts meubles argileux suivis de shale. L'ÉCG est entouré d'un coulis amélioré composé de sable, d'eau et de bentonite avec une conductivité thermique de $1.7 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. L'ÉCG d'un diamètre nominal de 32 mm (1.25 po) et d'un SDR de 11 est composé d'un tube PEHD conventionnel avec une conductivité thermique de $0.4 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Une conductivité thermique du sous-sol de $1.75 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ et une résistance thermique de puits de 0.088 m K W^{-1} ont été observées (Raymond, 2018). Une comparaison a été réalisée avec ces données antérieures au projet.

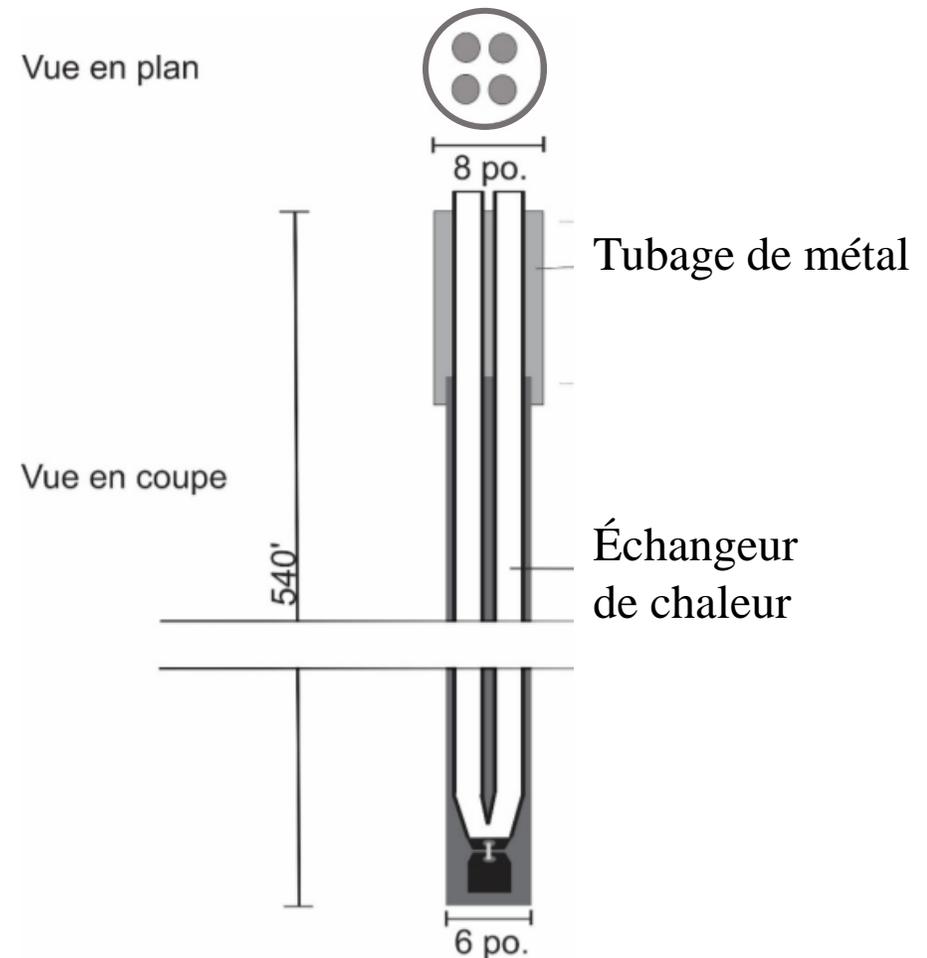


Figure modifiée de Ballard et al., 2018

Potentiel des ÉCH dans un cas d'une ruelle géothermique

Pour atteindre le deuxième objectif, l'impact d'ÉCGH a été évalué en déterminant la longueur de puits requise pour combler les besoins énergétiques de 7 logements dans une ruelle ou l'aménagement d'un champ d'ÉCGs partagés est envisagé.

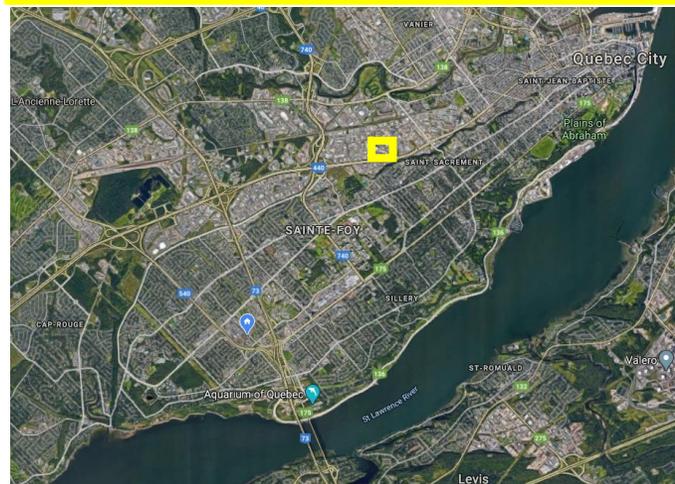
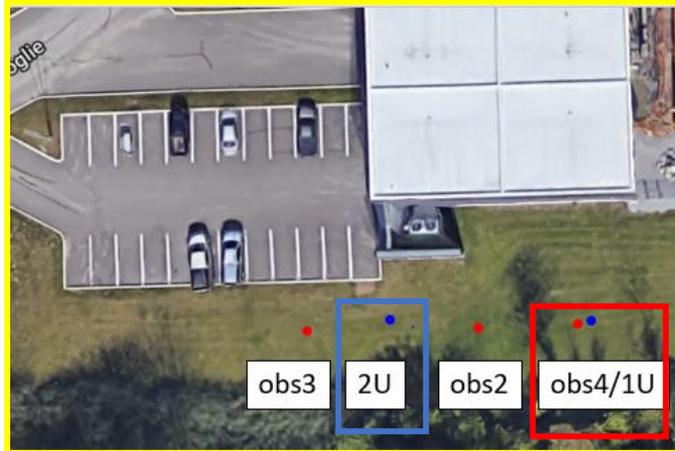
Un groupe de 21 citoyens résidant sur les rues Casot et Manrèse ont contacté l'INRS pour exposer leur projet de ruelle géothermique. Ce projet est similaire au projet Celsius, consultable sur le site <https://solon-collectif.org/celsius/>, développé à Montréal par plusieurs compagnies et organismes, dont l'organisme Solon et la firme Induktion Géothermie. Les 7 logements impliqués comportent 4 étages et sont chauffés à l'électricité et au mazout. Chaque étage a une superficie d'environ 1700 pi².

Pour arriver à concevoir un champ d'ÉCGs dans cette ruelle, il a fallu trouver les différentes propriétés hydrauliques et thermiques du sous-sol au site à l'étude et aussi émettre des scénarios concernant les charges de chauffage et de climatisation. Ces données ont permis de faire un calcul de dimensionnement pour ensuite évaluer la longueur de forage nécessaire pour couvrir la consommation d'énergie liée au chauffage et à la climatisation des logements. Différents scénarios d'aménagement des échangeurs de chaleurs ont été considérés, soit avec un tube en U simple (1U) ou double, fait de polyéthylène à haute densité régulier ou amélioré (GEOPERFORMX) et avec un remblayage en coulis géothermique ou en sable de slice. Les résultats ont été comparés au cas où des ÉCGs à boucle semi-ouverte sont utilisés pour diminuer la résistance thermique du puits.

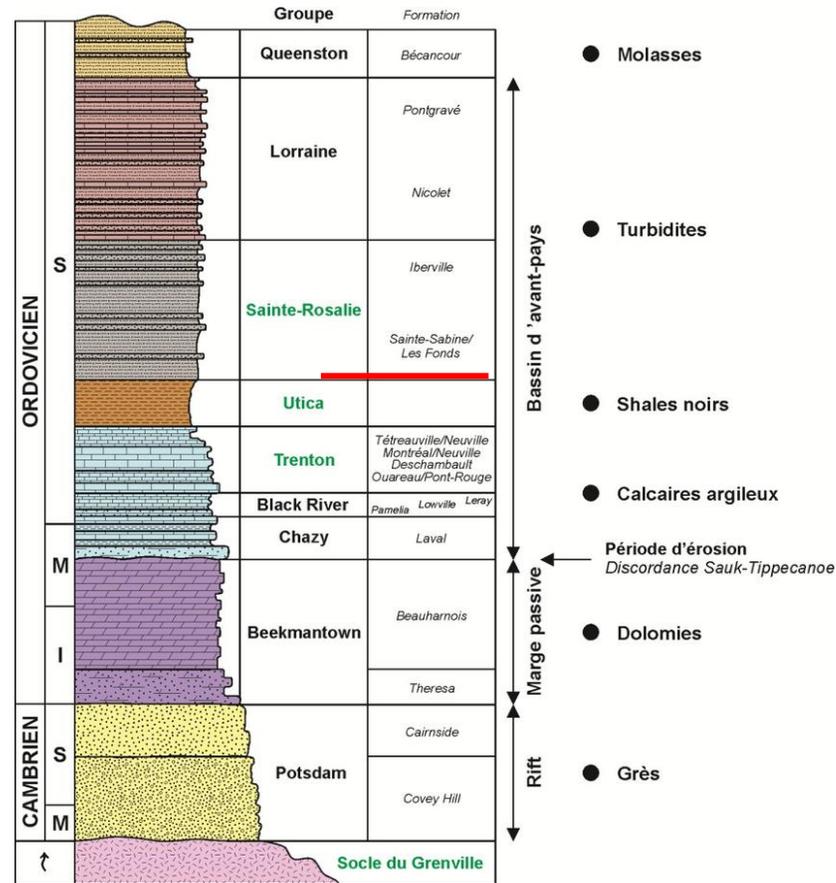
-  Logements des citoyens
-  Ruelle



Localisation de l'échangeur de chaleur utilisé pour le TRT



N 46°47'44,58"; O 71°18'09,97"



Comeau et al., 2013

Le puits géothermique utilisé pour les travaux expérimentaux est situé sur le terrain des laboratoires lourds (LISTE) de l'INRS, localisé dans le Parc technologique du Québec métropolitain. Il est encadré en bleu dans la figure à gauche. Le roc en place est composée de shale gris et de shale vert avec des fractures à quelques endroits, faisant partie du groupe de Sainte-Rosalie (Basses-terres du Saint-Laurent). Celui-ci est perméable par endroits étant donné qu'il est fracturé mais sa faible conductivité hydraulique ne permet pas un ÉS significatif (voir annexe). On retrouve entre 8 et 14 m de sable, gravier et tills sableux au-dessus du roc. Le TRT réalisé en 2017 (Raymond, 2018) a été effectué dans le puits encadré en rouge

Localisation et géologie de la ruelle

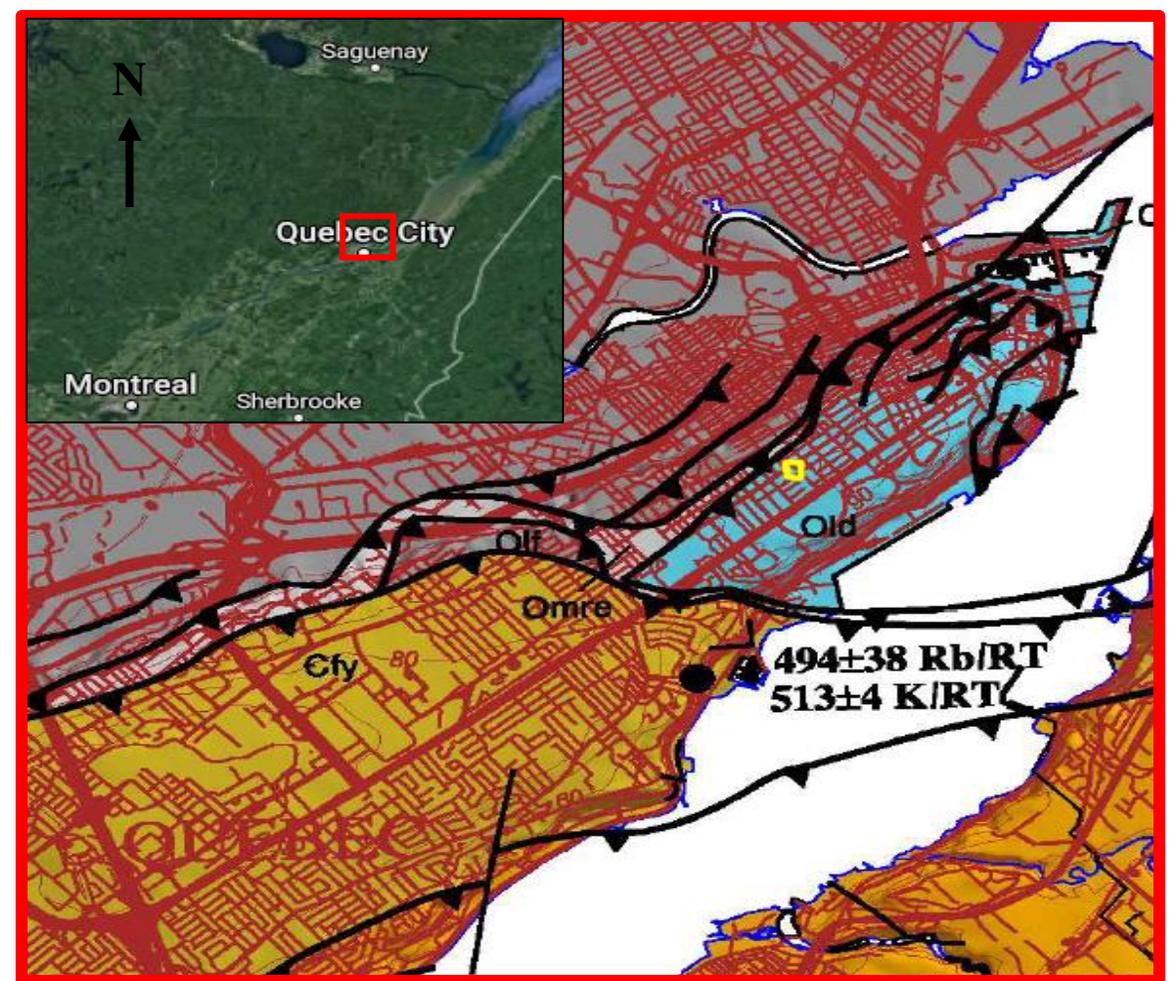
La ruelle en question se trouve à la limite entre les provinces géologiques des Appalaches et des Basses-Terres du Saint-Laurent, plus précisément à la limite de la Formation de La Citadelle, d'un mélange tectonique et de la Formation de Les Fonds.

La Formation de La Citadelle est composée de calcaire argileux, de calcaire dolomitique, de lits de shale et de quelques lits de conglomérat. Dans le mélange tectonique, soit la deuxième unité de cette formation (Gayot, 2004), on retrouve principalement du shale calcaireux et sablonneux.

La Formation de Les Fonds est composée de grès et de grès calcaireux ainsi que de shale (Gayot, 2004).

Les Formations de Sainte-Foy et de Saint-Nicolas, identifiées en jaune sur la carte, ne se retrouvent pas dans la zone en question.

Les travaux réalisés par Talbot-Poulin et al. (2013) démontrent que le niveau piézométrique varie entre 2 et 8 m sous la surface et qu'il y a entre 1 et 5 m de dépôts meubles dans le secteur concerné.



Légende

Basses-terres du Saint-Laurent

FORMATION DE LES FONDS

Olf Ardoise; ardoise dolomitique

Appalaches

MÉLANGE DE LA RIVIÈRE ETCHEMIN (Ordovicien moyen à supérieur)

Omre Mélange tectonique et aliostrormal ?; shale et schiste argileux à blocs polygéniques

FORMATION DE SAINT-NICOLAS (Cambrien inférieur)

Cnc Schiste argileux multicolore; grès feldspatique; conglomérat

FORMATION DE SAINTE-FOY (Cambrien)

Cfy Schiste argileux rouge, vert et gris; siltstone

FORMATION DE LA CITADELLE (Ordovicien inférieur à moyen)

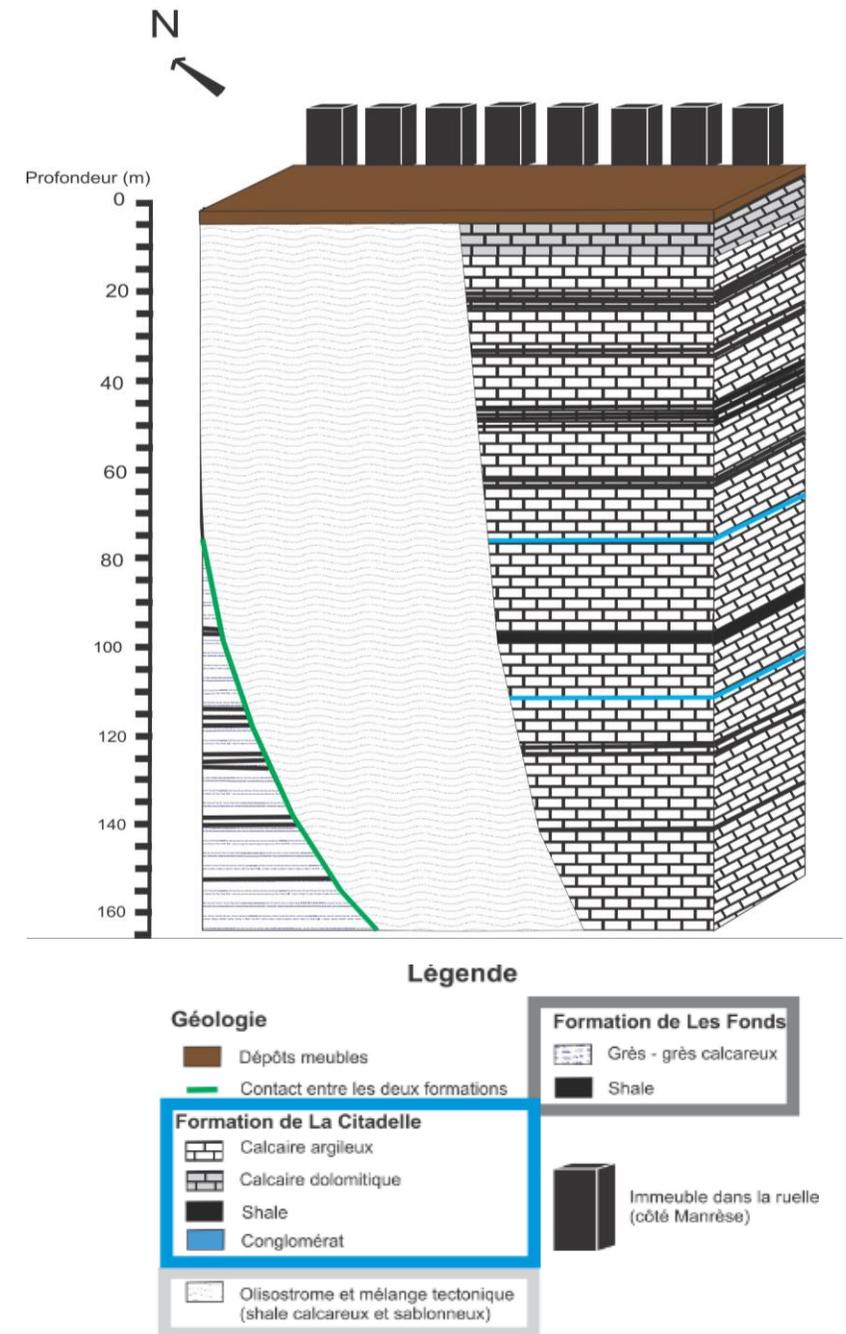
Old Calcaire argileux; shale calcaireux; shale; conglomérat polygénique

Localisation et géologie de la ruelle géothermique (suite)

Cette coupe géologique présente une interprétation des lithologies situées sous la ruelle. Les bâtiments en noir sont situés sur la rue Manrèse, entre les rues Père-Marquette et René-Lévesque. Les dépôts meubles sont situés sous la ruelle. Les lithologies ne sont vraisemblablement pas horizontalement stratifiées telles que présentées dans la coupe et peu de données sont disponibles pour déterminer leur pendage.

Le mélange tectonique est l'unité 2 de la Formation de La Citadelle. D'après Gayot (2004), cette unité, composée de trois faciès distincts, apparaît à quelques endroits seulement dans la ville de Québec. De plus, cette unité présente des contacts tantôt normaux, tantôt discordants, ce qui rend son interprétation difficile.

Il est donc probable de rencontrer plusieurs unités et formations distinctes lors du forage dans la ruelle.

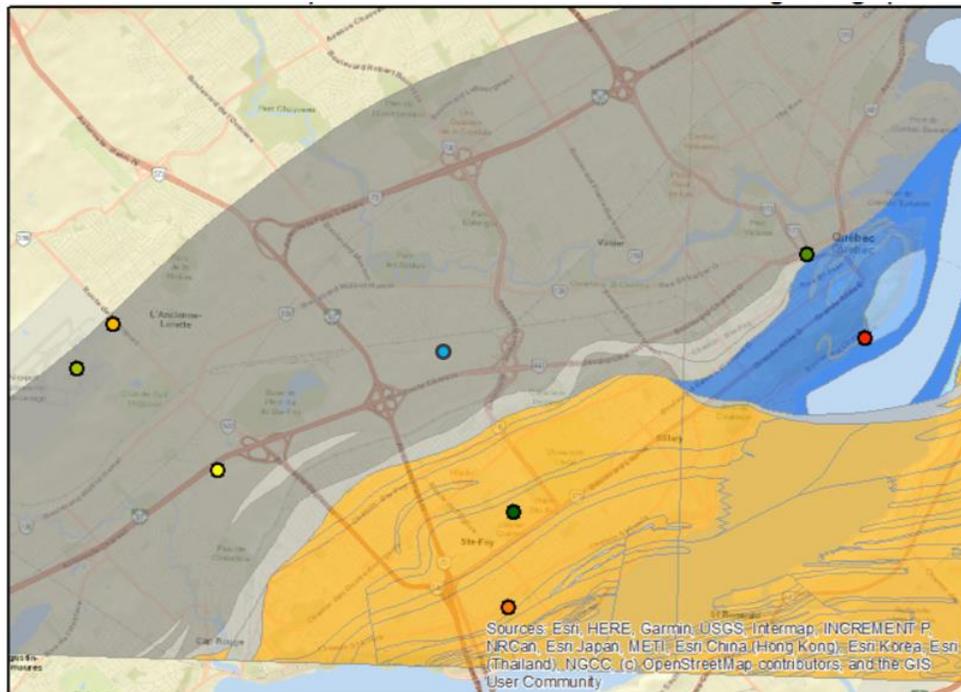


Propriétés thermiques du roc dans le secteur de Québec

Une propriété importante à connaître lors du calcul de dimensionnement des ÉCGs est la conductivité thermique du sous-sol qui est sa capacité à transmettre la chaleur par conduction. Un TRT doit être réalisé pour évaluer cette propriété de façon in situ. Cependant, dans le cadre de l'étude, aucun puits n'était disponible pour faire un essai au niveau de la ruelle géothermique. Des valeurs minimales et maximales ont été établies pour la conductivité thermique du sous-sol au site à l'étude en fonction des tests réalisés précédemment et inventoriés par Bédard et al. (2018). La conductivité thermique est donc supposée varier entre 2 et 2.59 W m⁻¹ K⁻¹.

La température non perturbée du sous-sol est aussi utilisée comme intrant au calcul de dimensionnement et varie en fonction de l'endroit et de la nature des formations géologiques. Une plage est donc établie pour la température de la même manière que pour la conductivité thermique. La température est censée varier entre 8.2 et 10.3 °C. Il est important de noter qu'il y a peu de données pour le mélange tectonique et pour la Formation de La Citadelle, ce qui ajoute de l'incertitude à cette estimation.

Conductivité thermique des différentes formations géologiques de Québec



Légende

Conductivité thermique du roc (W/mK)

- Mélange tectonique et olisostromal
- Formation de la Citadelle
- Groupe de Sillery
- Formation de les Fonds
- 2.59
- 2
- 2.44
- 1.72
- 2.02
- 2.12
- 2.21
- 2.37

Position	Temperature non-pertubée du sol (°C)	Géologie
Boulevard Hochelaga	8.96	Groupe Sillery
Rue Saint louis	9.10	Groupe sillery
Aéroport de Quebec	8.73	Les fonds
Université Laval	10.00	Groupe Sillery
Strom spa	10.30	De la citadelle
LISTE	8.20	Les Fonds

Échangeurs de chaleur hybrides

Plusieurs études ont été réalisées sur ce type d'ÉCG, démontrant clairement leur potentiel.

Des essais réalisés par Liebel (2012) ont démontré que la création d'une CC artificielle par pompage et injection dans l'eau d'un ÉCG permet de réduire la longueur de forage de 9 à 25 %, dépendamment du taux d'injection de chaleur.

Farabi-Asl (2017) ont aussi démontré qu'un système de PACG avec des ÉCGs verticaux à boucle semi-ouverte et création artificielle d'un ÉS par pompage et injection dans deux puits différents peut augmenter le coefficient de performance (COP) et le coefficient de performance saisonnier du système (SCOP) de 40 % et 20 %, respectivement.

Huber et Arslan (2015) ont par ailleurs étudié en laboratoire l'impact de la conduction et de la convection sur les systèmes de PACG pour conclure que la conductivité thermique effective du sous-sol peut augmenter entre 25 et 100 % dans des conditions d'ÉS. Le débit pour les aquifères peu perméables varie entre 0 et 0.3 m/jour. Le débit pour les aquifères moyennement perméables varie entre 0.3 et 0.6 m/jour. Le débit pour les aquifères perméables varie entre 0.6 et 1 m/jour.

Table 1
Results for the ILS parameter estimation and for the Hellström model [9] for the four different heat input rates during the MIR-TRT without pumping of groundwater.

Heat input rate	25 [W m ⁻¹]	45 [W m ⁻¹]	64 [W m ⁻¹]	83 [W m ⁻¹]
λ_{ILS} [W m ⁻¹ K ⁻¹]	4.11	3.98	4.67	4.22
λ_{Hell} [W m ⁻¹ K ⁻¹]	4.47	4.16	4.96	4.32
$R_{b, ILS}$ [m K W ⁻¹]	0.110	0.090	0.090	0.070
$R_{b, Hell}$ [m K W ⁻¹]	0.115	0.093	0.097	0.079

Table 2
Results for the ILS parameter estimation and for the Hellström model [9] for the four different heat input rates during the MIR-TRT with pumping of groundwater.

Heat input rate	39 [W m ⁻¹]	58 [W m ⁻¹]	77 [W m ⁻¹]	94 [W m ⁻¹]
λ_{ILS} [W m ⁻¹ K ⁻¹]	4.89	4.44	3.34	3.85
λ_{Hell} [W m ⁻¹ K ⁻¹]	5.14	4.49	3.35	3.91
$R_{b, ILS}$ [m K W ⁻¹]	0.070	0.060	0.030	0.040
$R_{b, Hell}$ [m K W ⁻¹]	0.069	0.062	0.032	0.048

Méthodologie

Mise en place du TRT pour l'échangeur de chaleur hybride

La température a été mesurée à l'aide de 7 capteurs ; 4 Pt100 (exactitude de 0.15 °C) et 3 Starmon mini (Star-Oddi) (exactitude de 0.025 °C, résolution de 0.001 °C). Un capteur Starmon mini a été placé dans le conduit d'injection pour pouvoir suivre l'évolution de la température de l'eau, de manière à ne pas troubler le débit.

Un taux d'injection de chaleur de 46.33 W m⁻¹ puis de 1.66 W m⁻¹ a été induit pendant l'injection de chaleur et la restitution thermique, respectivement.

Une pompe à jet Berkeley 7sn ¾ HP a tiré l'eau du puits à une profondeur de 3 m pour la réinjecter à 90 m. Celle-ci est alimentée par un courant de 11 A, à une tension de 110 V et une puissance de 1016 W. La pompe a été activée 5 h avant le début du test à un débit constant de 60 l/min.

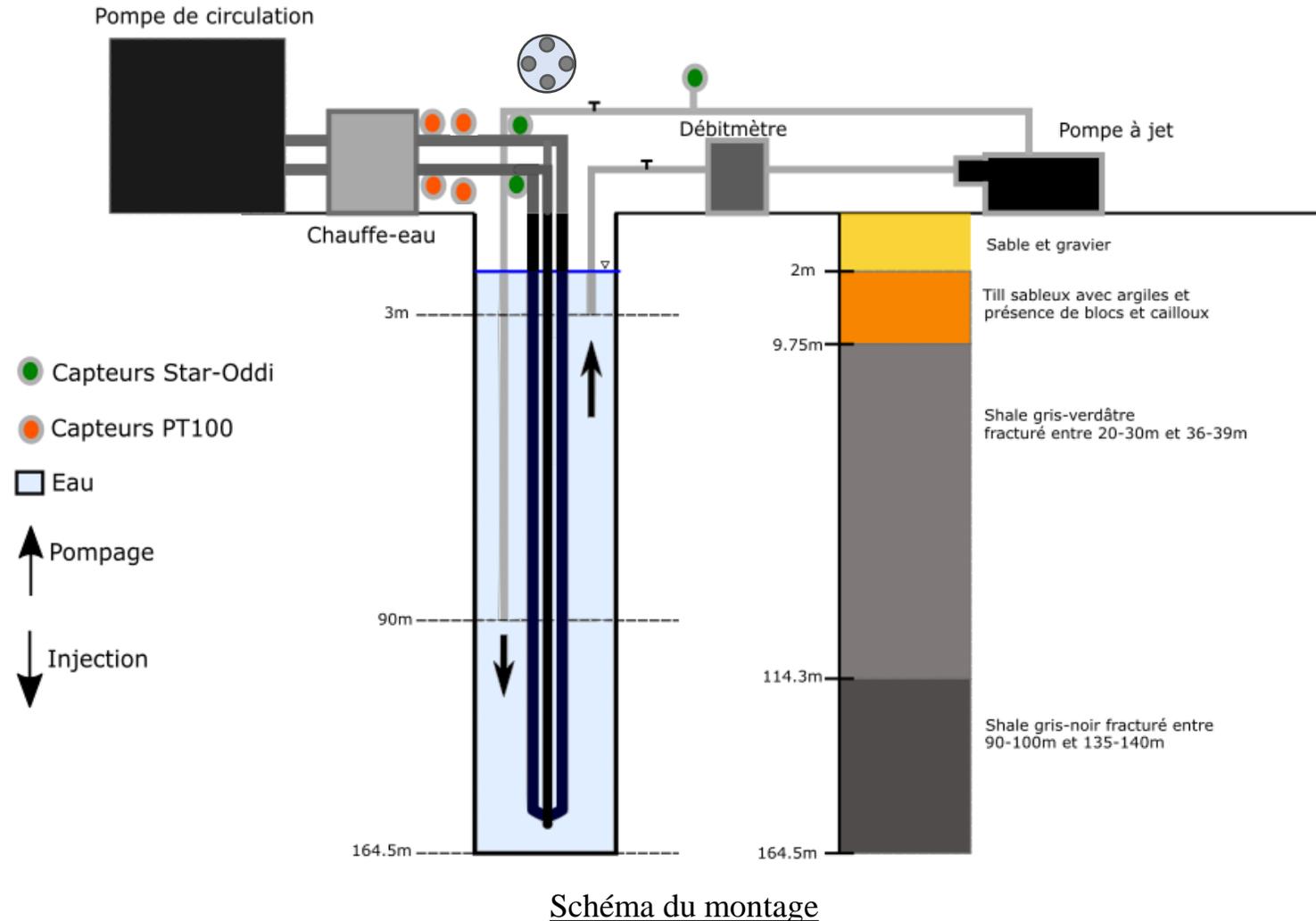
Un débitmètre ABB Watermaster a été utilisé pour suivre le débit de circulation d'eau dans le puits géothermique.

Le tube 2U de l'ÉCG est de type GEOPERFORMX V2 et a une conductivité thermique de 0.7 W m⁻¹ K⁻¹. Les côtés du tube ne sont pas espacés avec des entretoises. Des tuyaux PVC d'un diamètre intérieur de 30.29 mm (diamètre nominal 1 po) ont été utilisés pour créer le circuit de l'eau souterraine dans le puits géothermique.

La température du sol non perturbée est d'environ 8.5 °C et a été mesurée avec les capteurs Pt100 de l'unité TRT avec un essai de circulation de l'eau avant l'injection de chaleur.

Le niveau de l'eau souterraine dans le puits était stable et situé à 2.40 m sous la surface du sol.

Type de boucle	Double U
Type de tuyaux	GEOPERFORMX V2
Diamètre des tuyaux (int/ext) (mm)	31.75/48.3
Profondeur du puits (m)	164.59
Diamètre du puits (mm)	152.4



Analyse du TRT pour l'échangeur de chaleur hybride

$$\Delta T_W(t) = q_i R_b \sum_{i=1}^n (q_i - q_{i-1}) \frac{W(u)}{4\pi\lambda_s} \quad \mu = \frac{r_{bh}^2}{4\alpha_s(t_i - t_{i-1})} \quad (1)$$

$$\alpha_s = \frac{\lambda_s}{\rho_s c_s}$$

λ_s	Conductivité thermique du sol (W /m-1 K1)
α_s	Diffusivité thermique du sol (m ² /s)
q_i	Taux d'injection de chaleur par longueur unitaire
r_b	Rayon du puits (m)
R_b	Résistance thermique du puits (mK/W)
ΔT_W	Incrément moyen de la température de l'eau (°C)
ρ_s	Densité du sol (kg/m ³)
C_s	Capacité thermique du sol (J/kg m ³ k)
t_i	Temps pour la période i (s)
$W(u)$	Fonction utilisée pour évaluer l'intégrale exponentielle

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

S	Somme des résidus au carré (°C ²)
ΔT_{obs}	Incrément de température observé (°C)
ΔT_{mod}	Incrément de température calculé (°C)

La température moyenne de l'eau qui circule dans le tube 2U de l'ÉCG a été évaluée selon les températures enregistrées à la sortie et l'entrée du tube selon la moyenne pondérée par un facteur p tend vers -1 (Marcotte et al., 2008).

La température moyenne observée a été reproduite par superposition des courbes pour déterminer la conductivité thermique du sous-sol et la résistance thermique du puits. La température calculée a été évaluée selon l'équation de la source de chaleur linéaire infinie (équation 1; Carslaw, 1945).

Les paramètres λ_s et R_b ont été ajustés afin de minimiser la somme des résidus au carré à l'aide d'un solveur d'équation non linéaire (Raymond et al., 2011).

Scénarios de charges des bâtiments de la ruelle géothermique

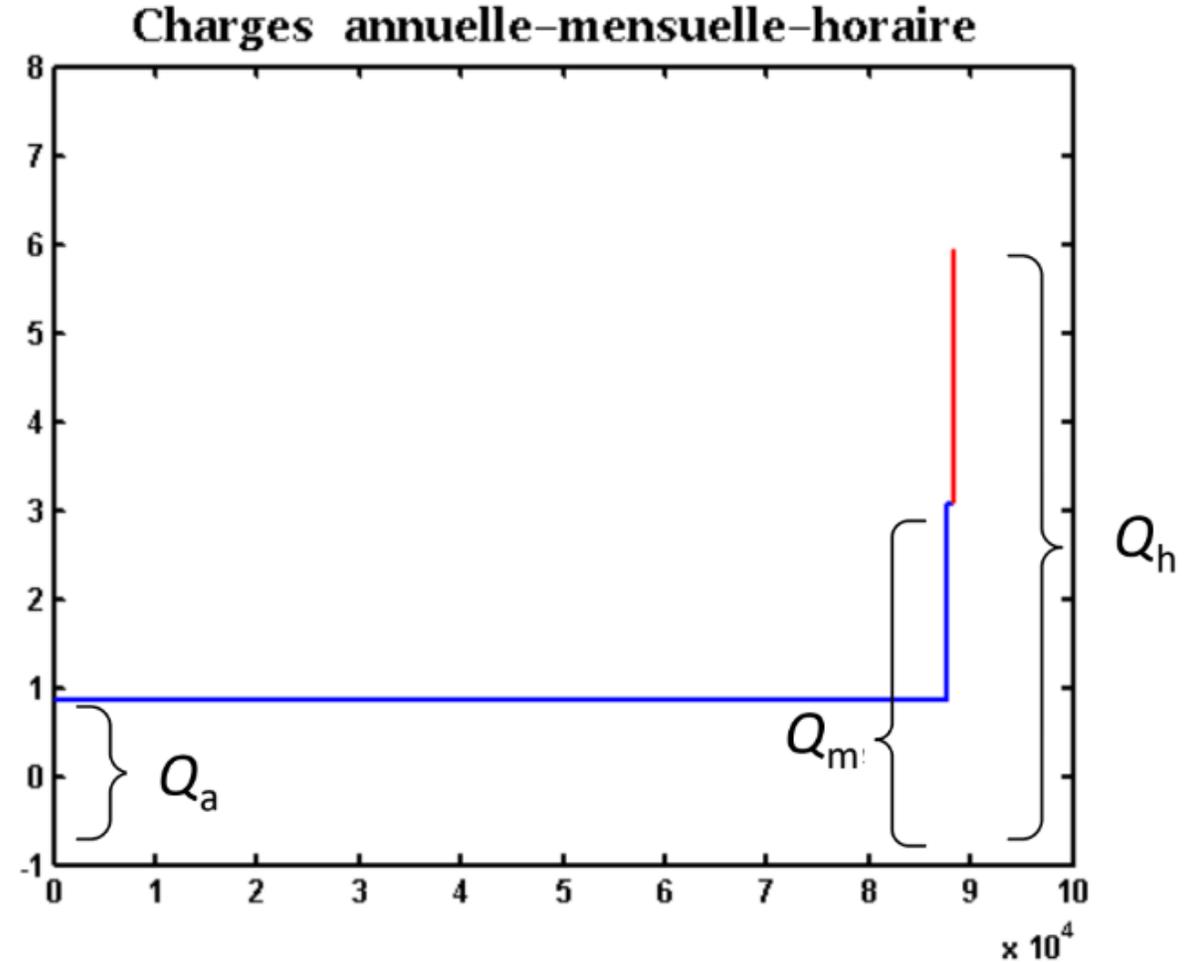
Pour réaliser le calcul de dimensionnements, on a dû déterminer les charges horaires, mensuelles et annuelles pour le chauffage et pour la climatisation.

La **charge horaire** (Q_h) est la consommation horaire maximale, la **charge mensuelle** (Q_m) est la moyenne de consommation du mois avec la plus grande consommation et la **charge annuelle** (Q_a) est la moyenne de consommation de l'année.

Pour déterminer ces charges, la base de données **CanmetENERGY** (Deru et al., 2011) pour la consommation d'un appartement moyen dans la ville de Minneapolis a été utilisée. Pour avoir une marge de données, une erreur présumée de 20 % a été appliquée.

Deux scénarios ont donc été établis pour les paramètres d'entrées requis pour le dimensionnement.

- **Scénario pessimiste** : température non perturbée et conductivité thermique du sous-sol de 8.2 °C et $2.02\text{ W m}^{-1}\text{ K}^{-1}$, avec une charge annuelle de chauffage pour un logement d'environ 1700 pi^2 de $46,866\text{ kWh}$.
- **Scénario optimiste** : température non perturbée et conductivité thermique du sol de 10.3 °C et $2.59\text{ W m}^{-1}\text{ K}^{-1}$, avec une charge annuelle de chauffage pour un logement d'environ 1700 pi^2 de $39,070\text{ kWh}$.



Calcul de dimensionnement des échangeurs de chaleur de la ruelle géothermique

Selon les scénarios définis précédemment, il a été possible de calculer de façon individuelle la longueur de forage requise pour chacun des bâtiments, laquelle dépend des calculs effectués pour la résistance thermique du puits et la température de pénalité associée à des puits rapprochés. L'interface graphique VersaGLD et le programme PyGLD (Gosselin, 2017) ont été utilisés pour effectuer ce calcul selon la méthode préconisée par Bernier (2000).

Le pourcentage de propylène glycol requis est de 26 %. Le point de congélation du fluide doit être environ 8°C plus bas que la température minimale qu'il va atteindre pendant sa circulation. La température minimale d'entrée (TEE) visée est de -1.8 °C. La TEE est la moyenne des deux températures minimales recommandées par l'ASHRAE (Kavanaugh, 2014) selon le scénario optimiste et pessimiste.

La capacité thermique du sous-sol, des matériaux de remblayage et du tube des ÉCGs a été déterminée à partir de la base de données de PyGLD (Gosselin, 2018) et du logiciel Earth Energy Designer (<https://buildingphysics.com/eed-2/>). Le cas de dimensionnement de l'ÉCGH a été réalisé en spécifiant de façon manuelle une résistance thermique de puits réduite d'environ 70 % et 83 % par rapport à celle calculée pour le scénario de référence, soit l'échangeur de chaleur 1U avec coulis géothermique.

Le débit à l'intérieur des ÉCGs varie en fonction de la pompe utilisée et de la consommation. Le débit est spécifié pour que l'écoulement soit turbulent dans les tuyaux avec un nombre de Reynolds plus grand que 2400.

La température à l'entrée de la pompe à chaleur est de -1.8 °C et est conforme aux normes ASHRAE (Kavanaugh, 2014).

Paramètres constants	
Température non perturbée du sol (°C)	8.2 - 10.3
λ du sol ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	2.02 - 2.59
Capacité thermique volumique ($\text{kJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$)	2.010
TEE (°C)	-1.8
Propylène glycol (%)	26.5
Diamètre du puits (mm)	150
Diamètre extérieur du tube de l'ÉC (mm)	42.16
Diamètre intérieur du tube de l'ÉC (mm)	33.99
Espacement entre les côtés du tube de l'ÉC (mm)	107.84

Calcul de dimensionnement des échangeurs de chaleur de la ruelle géothermique

Paramètres	Paramètres selon la méthode					
	(1) 1U - Mélange bentonite - ÉC PEHD	(2) 1U - Sable de silice - ÉC GEOPERFORMX	(3) 2U - Mélange bentonite - ÉC PEHD	(4) 2U - Sable de silice - ÉC GEOPERFORMX	(5) 1U - Ouvert - ÉC PEHD - Avec pompage et injection ***	(6) 2U - Ouvert - ÉC GEOPERFORMX - Avec pompage et injection ***
Configuration des ÉC	1U	1U	2U	2U	1U	2U
λ du coulis ($W m^{-1} K^{-1}$)	1.5	2.4	1.5	2.4	0.6	0.6
Capacité thermique volumique du coulis ($kJ m^{-3} K^{-1}$)	3400	2500	3400	2500	4200	4200
λ du tube de l'ÉC ($W m^{-1} K^{-1}$)	0.4	0.7	0.4	0.7	0.4	0.7
Capacité thermique volumique du tube de l'ÉC ($kJ m^{-3} K^{-1}$)	1500	1500	1500	1500	1500	1500

*** Une cellule de convection artificielle réduit la résistance thermique du puits
Mélange bentonite = 12% bentonite, 15% sable

Calcul de dimensionnement des échangeurs de chaleur de la ruelle géothermique

$$L = \frac{Q_a R_{s,a} + Q_m R_{s,m} + Q_h (R_{s,h} + R_b)}{T_0 - T_f} \quad (3)$$

Q_a	Charge moyenne annuelle
Q_m	Charge moyenne mensuelle la plus grande
Q_h	Charge bloc horaire la plus grande
$R_{s,a}$	Résistance thermique annuelle du sous-sol
$R_{s,m}$	Résistance thermique mensuelle du sous-sol
$R_{s,h}$	Résistance thermique horaire du sous-sol
R_b	Résistance thermique du puits
T_0	Température non-perturbée du sous-sol
T_f	Température moyenne du fluide dans le puits
L	Longueur de forage

La longueur de forage L est déterminée avec l'équation 3 (Bernier, 2000).

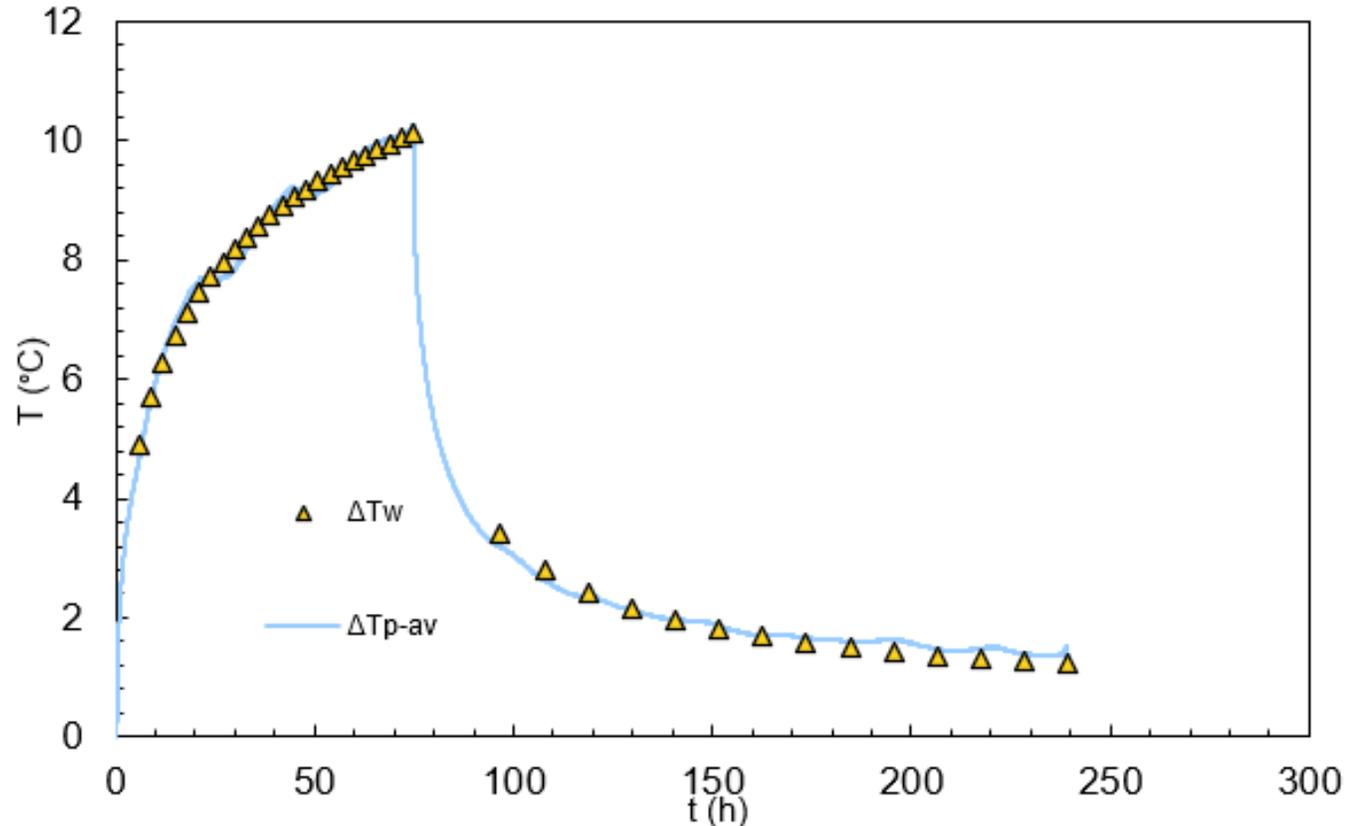
Résultats

Analyse du TRT réalisé sur l'ÉCGH

Données du test de réponse thermique

La température moyenne de l'eau dans le tube de l'ÉCG lors du TRT est montrée par la ligne bleue sur la figure adjacente (moyenne p-linéaire). Les triangles représentent la température calculée et superposée selon l'optimisation réalisée avec le solveur pour une conductivité thermique de $1.72 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ et une résistance thermique de 0.015 m K W^{-1} .

La somme des résidus au carré total, pour l'injection de chaleur et pour la restitution thermique est de 0.81, 0.58 et 0.23 respectivement.



λ_{ss}	1.72	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
R_{bh}	0.015	m K W^{-1}
T_0	8.5	$^{\circ}\text{C}$

Charges de chauffage et de climatisation des bâtiments de la ruelle géothermique

Charges annuelles, mensuelles et horaires estimées pour un immeuble de 4 étages dans la ruelle géothermique

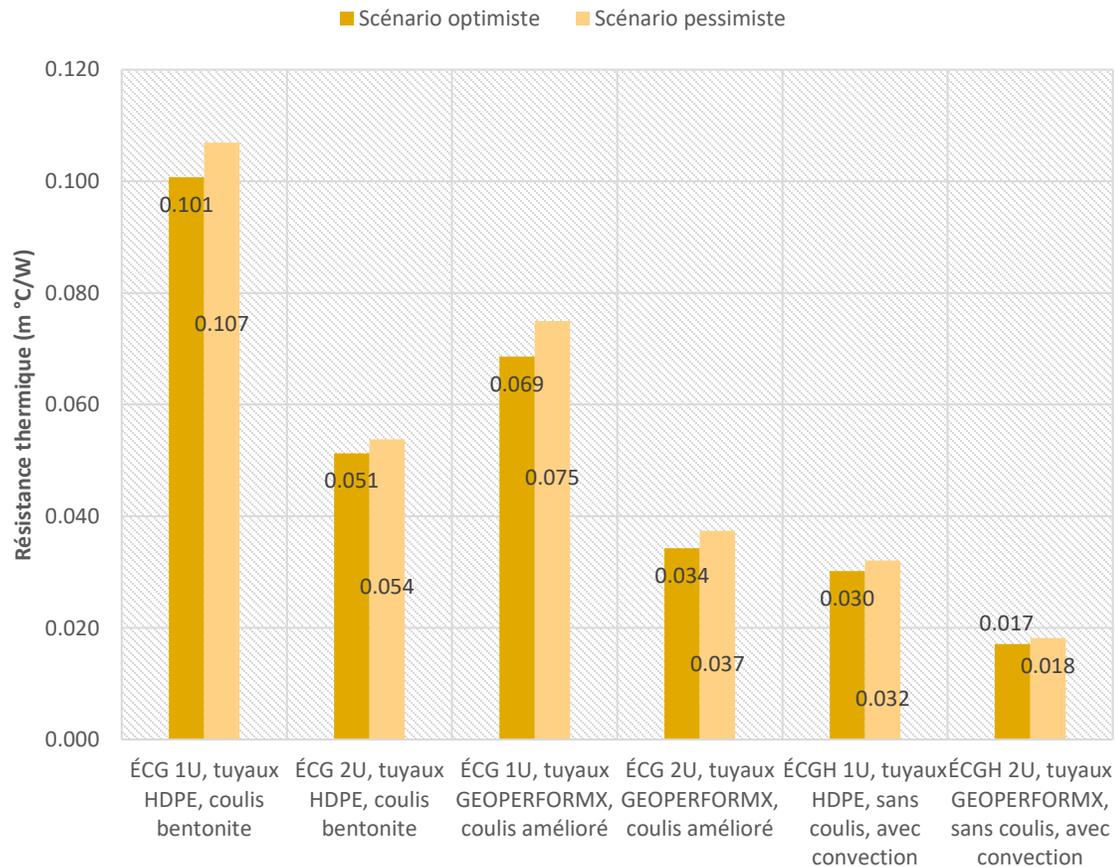
Charges	Système uniquement géothermique							
	Chauffage				Climatisation			
	Consommation annuelle (kWh)	Annuelle (kW)	Mensuelle (kW)	Horaire (7h/jour) (kW)	Consommation annuelle (kWh)	Annuelle (kW)	Mensuelle (kW)	Horaire (7h/jour) (kW)
Scénario optimiste	39,070	4.46	15.75	37.94	15,768	1.80	6.91	21.39
Scénario pessimiste	46,866	5.35	18.90	45.53	18,834	2.15	8.30	25.66

Charges	Système hybride (70% géothermique)							
	Chauffage (70%)				Climatisation (100%)			
	Consommation annuelle (kWh)	Annuelle (kW)	Mensuelle (kW)	Horaire (7h/jour) (kW)	Consommation annuelle (kWh)	Annuelle (kW)	Mensuelle (kW)	Horaire (7h/jour) (kW)
Scénario optimiste	38,719	4.42	15.41	26.57	15,768	1.80	6.91	21.39
Scénario pessimiste	46,516	5.31	18.49	31.88	18,834	2.15	8.30	25.66

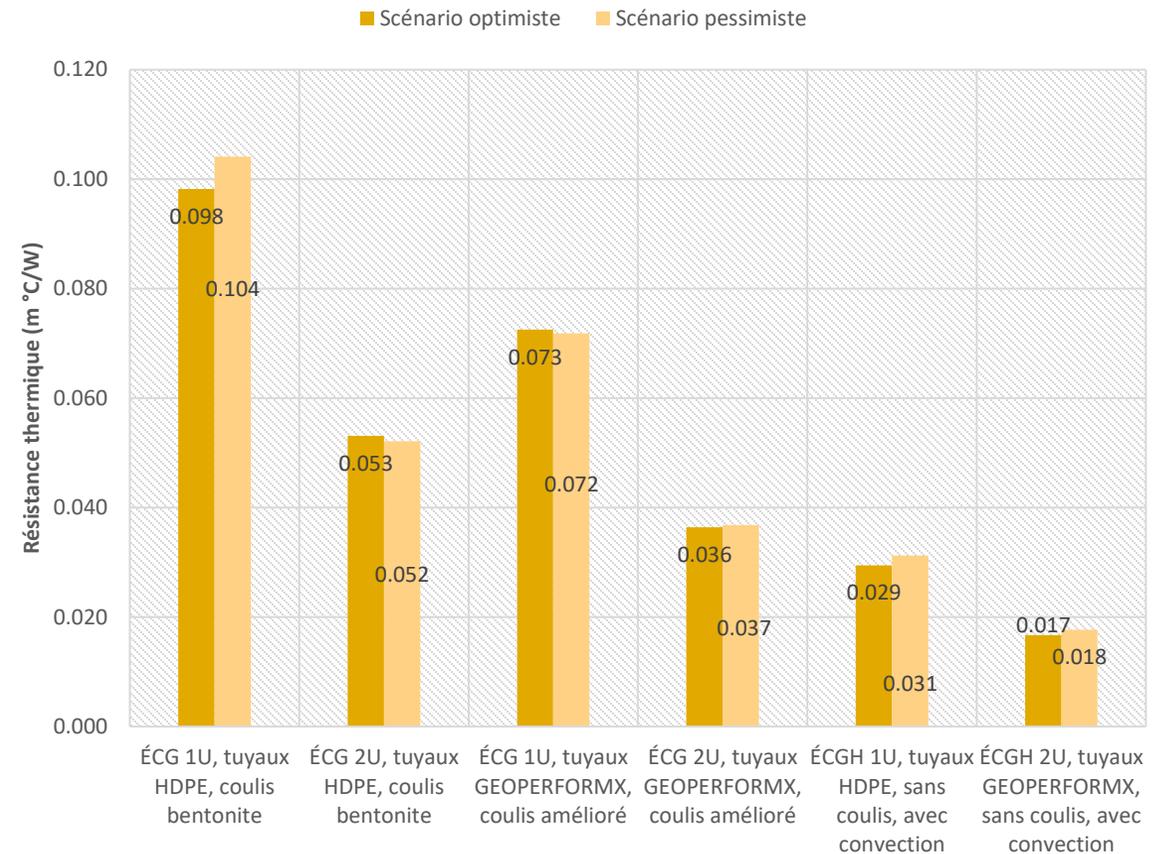
Les charges sont présentées pour un immeuble de 4 étages de 1706 pi². Pour connaître les charges totales pour toute la ruelle, il faut multiplier les charges d'un immeuble par le nombre d'immeubles. La consommation en chauffage est plus importante que celle en refroidissement. La longueur de forage nécessaire pour le système géothermique est donc basée sur les charges de chauffage. Les mois les plus importants pour le chauffage au Québec sont les mois de janvier et février, pour la charge horaire (7 h par jour) et mensuelle. Un système couvrant 70 % de la charge horaire est aussi proposé pour réduire le coût de forage.

Résistance thermique des puits calculée pour les scénarios d'aménagement des échangeurs de chaleur dans la ruelle géothermique

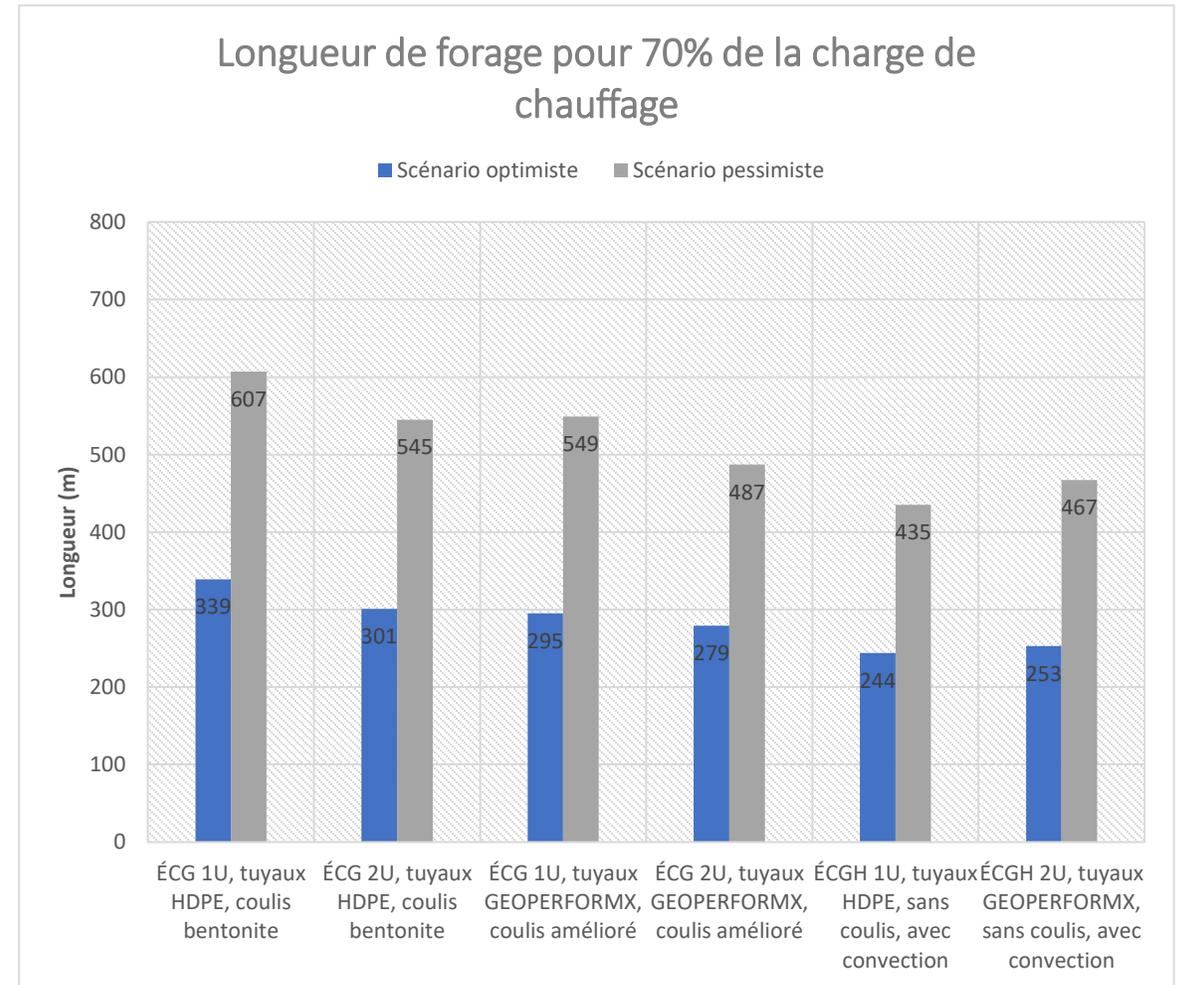
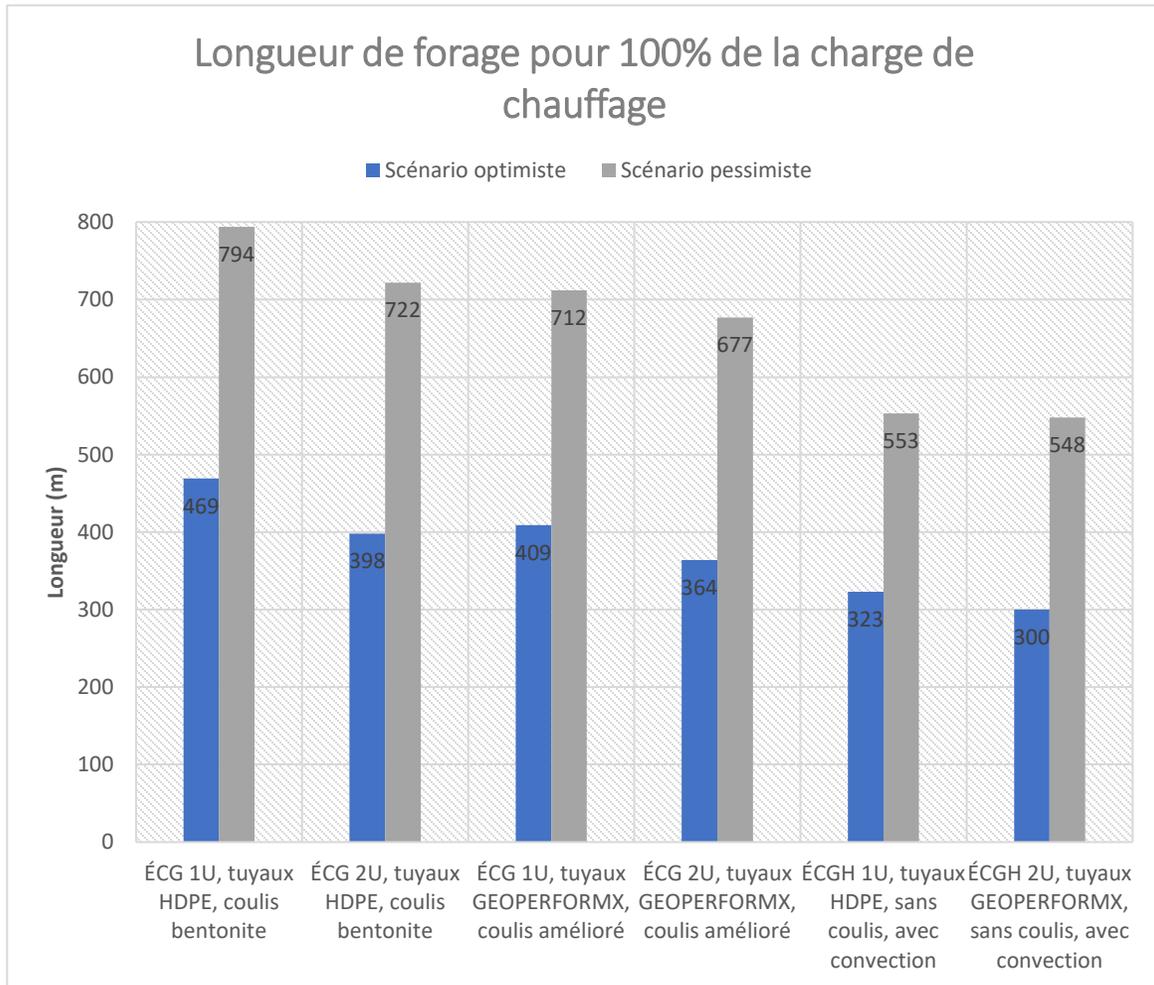
Résistance thermique réelle des trous de forage pour 100% de la charge de chauffage



Résistance thermique réelle des trous de forage pour 70% de la charge de chauffage



Longueur de forage requise pour un immeuble de 4 étages de 1706 pi² dans la ruelle géothermique



Réduction de la résistance thermique et de la longueur de forage pour les différents scénarios d'aménagement de la ruelle géothermique

	Réduction de la résistance thermique réelle du forage pour 100% de la charge de chauffage		Réduction de la résistance thermique réelle du forage pour 70% de la charge de chauffage	
	Scénario optimiste	Scénario pessimiste	Scénario optimiste	Scénario pessimiste
ÉCG 2U, tuyaux HDPE, coulis bentonite	49.1%	49.7%	45.9%	50.0%
ÉCG 1U, tuyaux GEOPERFORMX, coulis amélioré	31.9%	29.8%	26.2%	31.0%
ÉCG 2U, tuyaux GEOPERFORMX, coulis amélioré	65.9%	65.0%	62.9%	64.6%
ÉCGH 1U, tuyaux HDPE, sans coulis, avec convection	70.0%	70.0%	70.0%	70.0%
ÉCGH 2U, tuyaux GEOPERFORMX, sans coulis, avec convection	83.0%	83.0%	83.0%	83.0%

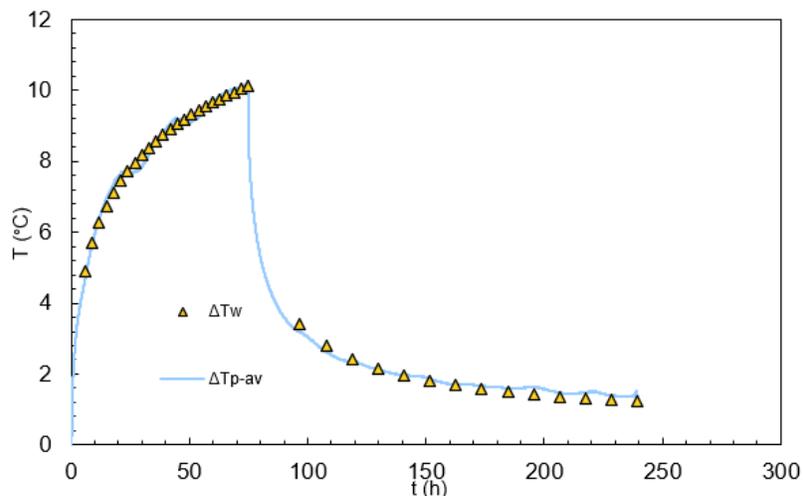
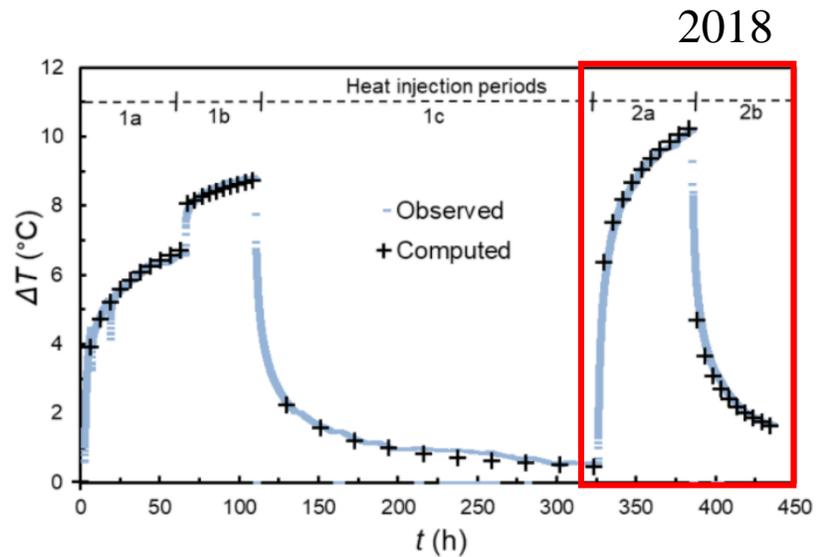
	Réduction de la longueur de forage pour 100% de la charge de chauffage		Réduction de la longueur de forage pour 70% de la charge de chauffage	
	Scénario optimiste	Scénario pessimiste	Scénario optimiste	Scénario pessimiste
ÉCG 2U, tuyaux HDPE, coulis bentonite	15.1%	9.1%	11.2%	10.2%
ÉCG 1U, tuyaux GEOPERFORMX, coulis amélioré	12.8%	10.3%	13.0%	9.6%
ÉCG 2U, tuyaux GEOPERFORMX, coulis amélioré	22.4%	14.7%	17.7%	19.8%
ÉCGH 1U, tuyaux HDPE, sans coulis, avec convection	31.1%	30.4%	28.0%	28.3%
ÉCGH 2U, tuyaux GEOPERFORMX, sans coulis, avec convection	36.0%	31.0%	25.4%	23.1%

*Valeurs supposées en fonction des observations réalisées lors des essais expérimentaux

Discussion

Réduction de la résistance thermique des puits de l'échangeur de chaleur hybride

Ballard (2018),
Raymond (2019)



	Comparaison des TRT réalisés aux laboratoires lourds				
	TRT - 1U, avec coulis (2017)	TRT - 2U, sans convection (2018)	TRT - 2U, avec convection (2020)	Différence entre 2020 - 2017 (%)	Différence entre 2020 - 2018 (%)
λ_{ss} (W m ⁻¹ K ⁻¹)	1.75	1.74	1.72	-1.71%	-1.15%
R_b (m K W ⁻¹)	0.088	0.050	0.015	-83%	-70%

En comparant les tests réalisés précédemment aux laboratoires lourds (LISTE) de l'INRS, il est possible de constater que la conductivité thermique du sous-sol a très peu changé d'un test à l'autre. En fait, la variation de conductivité thermique est inférieure à l'incertitude liée à l'analyse du TRT qui est de l'ordre de 10 %. La différence étant trop faible pour un test qui est sujet aux erreurs expérimentales, il est supposé par la suite qu'un ÉCGH ne changera pas la conductivité thermique du sous-sol. La résistance thermique du puits a quant à elle été réduite pour le test avec la création d'une CC par circulation d'eau dans le puits.

Réduction de la longueur de forage requise de l'ÉCGH

En comparant les longueurs de forage dans le tableau adjacent pour les différents scénarios d'aménagement de la ruelle géothermique, on observe que la longueur de forage pour le cas 5 (système d'ÉCGH 1U avec des tuyaux PEHD) est moins grande que la longueur de forage pour le cas 6 (système d'ÉCGH 2U avec des tuyaux GEOPERFORMX). Ce résultat est contre-intuitif, puisque la résistance thermique réelle du puits du système 1U et du système 2U est d'environ 0.031 m K W-1 et 0.017 m K W-1, respectivement. L'équation 3 démontre qu'une résistance thermique du puits (R_b) faible équivaut à une longueur de forage (L) moins importante. Cependant, les systèmes 2U font augmenter la température moyenne du fluide (T_f), ce qui augmente légèrement la longueur de forage.

Cette problématique s'applique seulement dans les systèmes qui couvrent 70 % de la charge de chauffage. Ce type de système réduit la charge horaire de 30 %. Étant donné que la résistance thermique du puits s'applique seulement à la charge horaire et que les charges mensuelles et annuelles restent pratiquement inchangées, une réduction de résistance thermique du puits est moins significative sur la longueur de forage requise.

	Réduction de la longueur de forage pour 100% de la charge de chauffage		Réduction de la longueur de forage pour 70% de la charge de chauffage	
	Scénario optimiste	Scénario pessimiste	Scénario optimiste	Scénario pessimiste
ÉCG 2U, tuyaux HDPE, coulis bentonite	15.1%	9.1%	11.2%	10.2%
ÉCG 1U, tuyaux GEOPERFORMX, coulis amélioré	12.8%	10.3%	13.0%	9.6%
ÉCG 2U, tuyaux GEOPERFORMX, coulis amélioré	22.4%	14.7%	17.7%	19.8%
ÉCGH 1U, tuyaux HDPE, sans coulis, avec convection	31.1%	30.4%	28.0%	28.3%
ÉCGH 2U, tuyaux GEOPERFORMX, sans coulis, avec convection	36.0%	31.0%	25.4%	23.1%

Comparaison avec les travaux antérieurs

En considérant la réduction de résistance thermique observée lors de l'essai dans l'ÉCGH et en l'appliquant pour le calcul de dimensionnement de la ruelle géothermique, on arrive à réduire la longueur de forage nécessaire aux bâtiments.

Les résultats sont conformes avec les travaux réalisés par Liebel, qui a réalisé des travaux expérimentaux similaires en 2012. La même méthode d'analyse avec l'équation de la source de chaleur linéaire infinie a été utilisée dans ces travaux. Kharseh (2011) a cependant démontré que la conductivité thermique du sous-sol peut augmenter avec un ÉCGH, particulièrement lorsque la conductivité hydraulique du sous-sol est élevée, puisque la CC engendrée dans le puits pénètre le roc.

Tableau comparatif des travaux réalisés sur les ÉCGHs

	Huber et Arslan (2015)	Liebel (2012)	Kharseh (2011)	Cette étude (2020)
Conductivité thermique du sous-sol	La conductivité thermique apparente est améliorée de 25 % à 100 % avec un écoulement d'eau souterraine. Plus la lithologie est perméable, plus il y a une augmentation	La conductivité thermique du sous-sol varie en fonction du taux d'injection de chaleur. Ces variations peuvent être attribuées aux erreurs expérimentales	La conductivité thermique du sous-sol est augmentée de 34 % avec la création d'une CC à partir de l'injection de bulles d'air dans le puits	La conductivité thermique du sous-sol reste constante à un taux d'injection de chaleur de 45 W/m
Résistance thermique du puits		La résistance thermique réelle du puits est réduite d'environ 40 %, peu importe le taux d'injection de chaleur	La résistance thermique réelle du puits est réduite de 29.7 % avec la création d'une CC	La résistance thermique réelle du puits est réduite de 70%
Longueur du forage		La longueur de forage est réduite de 9 % à 25 %		La longueur de forage est réduite de 23 % à 36 %

Emplacement des forages dans la ruelle géothermique



● Forage proposé

Seules les aires de stationnement des résidents voulant participer au projet pourront être utilisées pour aménager les forages, ce qui offre une superficie d'environ 445 m². Si les puits sont trop près les uns des autres, il peut y avoir un court-circuitage thermique entre les échangeurs de chaleur qui aura un impact négatif sur le système ce qui a été considéré dans le calcul de dimensionnement avec une température de pénalité, mais de façon individuelle pour chaque immeuble. La figure adjacente présente un scénario d'aménagement des forages pour le calcul de dimensionnement et le scénario de charges optimiste considérant 100% de l'énergie requise et des ÉCGs conventionnels qui impliquent 3 puits par immeuble.

Coûts d'installation du système de PACG

Sans entrer dans le calcul complet du coût d'installation et de rentabilité d'un système géothermique qui demanderait une analyse technico-économique complète, il est intéressant d'évaluer les coûts liés à un ÉCGH.

Les résultats du tableau suivant suggèrent que les ÉCGHs sont un moyen intéressant de réduire les coûts d'installation d'un système de PACG.

Installation	Coûts (\$/m)	Coûts additionnels	Longueur de forage, de tubage, de tuyau et de coulis pour le scénario pessimiste à 100 % de la charge de chauffage	
			ÉCG 1U, tuyaux PEHD, coulis bentonite	ÉCGH 2U, tuyaux GEOPERFORMX, sans coulis, avec convection
Forage	60		794 m	548 m
Tubage	80		10 m	10 m
Tuyaux de l'ÉCG	8		1,588 m	2,192 m
Coulis	12	1200\$ (transport)	794 m + transport	0
Pompe à jet	0	900\$/pompe	0	3 pompes
		Total	71,672 \$	53,916 \$ (réduction de 25%)

*Pour un immeuble de 4 étages. Chaque étage a une superficie de 1706 pi²

Coûts d'opération du système de PACG

En fonction d'une puissance de 1016 W sollicitée pendant les mois les plus froids (décembre, janvier, février) et d'un tarif d'électricité de 0.08 \$/kWh, il est possible d'estimer les coûts d'opération de la pompe à 176 \$/an. On suppose ici qu'une pompe fournit un ÉCGH. En comparaison, les économies d'énergie anticipées pour un immeuble avec trois échangeurs de chaleur sont de 2,149 \$/an (1,621 \$/an avec 3 pompes à jet). En effet, avec une consommation annuelle en chauffage de 39,070 kWh et un tarif de 0.08 \$/kWh, les coûts annuels de chauffage à l'électricité sont d'environ 3,125 \$. En revanche, les coûts annuels d'une PACG pour la même consommation sont de 977 \$ (1,504 \$ avec 3 pompes à jet). L'utilisation d'une seule pompe à jet pour 3 ÉCGHs pourrait être envisagée, mais plus de travaux seront nécessaires pour en démontrer la faisabilité.

L'ÉCGH semble intéressant pour réduire la longueur de forage lors de l'installation et potentiellement les coûts d'installation d'un système géothermique, bien que l'augmentation des coûts d'opération demeure raisonnable lorsque comparée aux économies d'énergie.

Charge de chauffage horaire couverte	COP	Scénario	Consommation annuelle pour le chauffage (kWh) *	Énergie consommée annuellement par la PACG (kWh)	Économies annuelles d'énergie (kWh)	Coûts annuels d'opération de la PACG (\$/an) **	Économies annuelles d'énergie (\$/an)**
100%	3.2	Optimiste	39,070	12,209	26,861	977	2,149
		Pessimiste	46,866	14,646	32,220	1,172	2,578
Optimiste		38,719	12,100	26,619	968	2,130	
Pessimiste		46,516	14,536	31,980	1,163	2,558	

Nombre de pompes par immeuble	Puissance d'une pompe (W)	Temps de sollicitation d'une pompe (heures)	Tarif d'électricité (\$/kWh)	Coûts annuels d'opération pour 3 pompes (\$/an)
3	1,016	2,160	0.08	527

* Il s'agit de la consommation en chauffage d'un immeuble de 4 étages de 1706 pi² par étage

** Calculs réalisés avec un tarif de 0.08 \$/kWh pour l'électricité

Limites de l'étude et recommandations pour des travaux futurs

Seule la méthode de superposition des courbes a été utilisée lors de l'analyse du TRT pour mieux comparer nos résultats avec les travaux de Ballard et al. (2018). Des erreurs expérimentales sont à considérer pour l'évaluation de la conductivité thermique du sous-sol et de la résistance thermique du puits lors d'un TRT dont l'incertitude est environ 10%. Le calcul de dimensionnement réalisé pour la ruelle géothermique est limité par l'incertitude face aux charges des bâtiments, à la température non perturbée du sous-sol ainsi qu'à l'incertitude sur la conductivité thermique du mélange tectonique.

Il serait intéressant de réaliser un TRT semblable à celui réalisé dans ce projet mais en utilisant une pompe submersible qui consomme moins d'énergie. Un TRT avec différents taux d'injection de chaleur permettrait aussi une meilleure comparaison avec les travaux de Liebel (2012). Pour la ruelle géothermique, il est recommandé d'évaluer les charges de bâtiments à l'aide de logiciels prévus à cet effet, ce qui diminuerait la marge d'erreur des calculs de dimensionnement. Finalement, il sera important d'effectuer un TRT au niveau de la ruelle pour connaître la température non perturbée et la conductivité thermique du sous-sol et déterminer la résistance thermique de puits en conditions réelles.

Conclusions

Une réduction de 70 % de la résistance thermique de puits a été observée lors d'un TRT réalisé sur un ÉCGH aménagé aux LISTE de l'INRS. Cette réduction a été évaluée en comparant les résultats de TRT avec et sans circulation de l'eau dans l'ÉCG et est encore plus importante lorsque comparée à la résistance thermique d'un ÉCG avec un seul tube en U. La conductivité hydraulique faible du roc au site à l'étude est potentiellement la raison pour laquelle la conductivité thermique effective n'a pas significativement changé d'un TRT à l'autre. L'aménagement d'ÉGG de conception améliorée, notamment des ÉCGHs, permet réduire la résistance thermique de puits et ainsi la longueur de forage nécessaire pour l'aménagement d'un système géothermique. La réduction de la longueur de forage anticipée pour la ruelle géothermique dans le cadre de cette étude était de 36 %. Ces résultats suggèrent que les ÉCGHs sont un moyen intéressant de réduire les coûts d'installation d'un système de PACG bien qu'une étude technico-économique complète soit nécessaire pour le démontrer.



Références

- Ballard J-M, Koubikana Pambou CH & Raymond J (2018) Évaluation de la performance d'un forage géothermique de conception améliorée. INRS, Centre Eau, Terre et Environnement. Documents scientifiques et techniques I396, 20 p. <http://espace.inrs.ca/id/eprint/10318/>
- Bédard K, Comeau F-A & Malo M (2013) Modélisation géologique 3D du bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent: Rapport final. INRS, Centre Eau, Terre et Environnement,
- Bédard K, Comeau F-A, Raymond J, Gloaguen E, Comeau G, Millet E & Foy S (2018) Cartographie de la conductivité thermique des Basses-Terres du Saint-Laurent. (INRS, Centre Eau Terre Environnement).
- Bernier M (2000) A review of the cylindrical heat source method for the design and analysis of vertical ground-coupled heat pump systems. 4th International Conference on Heat Pumps in Cold Climates. p 1-14.
- Carlsaw HS (1906) Introduction to the Mathematical Theory of the Conduction of Heat in Solids. Dover Pub.,
- Deru M, Field K, Studer D, Benne K, Griffith B, Torcellini P, Liu B, Halverson M, Winiarski D & Rosenberg M (2011) US Department of Energy commercial reference building models of the national building stock.
- Eskilson P, Hellström G, Claesson J, Blomberg T, Sanner B (2000) Earth energy designer version 4.2. Sweden: Blocon Software. Consulté à partir de <https://buildingphysics.com/eed-2/>.
- Farabi-Asl H, Fujii H & Kosukegawa H (2018) Cooling tests, numerical modeling and economic analysis of semi-open loop ground source heat pump system. Geothermics 71:34-45. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2017.08.005>
- Gayot T (2004) Analyse structurale et mise en place de la Nappe du Promontoire de Quebec, domaine externe des Appalaches du Quebec. Université Laval, Québec. Mémoire de maîtrise, 85 p. <http://hdl.handle.net/20.500.11794/51878>
- Gosselin JS (2018) PyGLD, Python library to do ground loop design calculations. <https://github.com/jnsebgosselin/pygld>
- Huber H & Arslan U (2015) The Influence of the Darcy Velocity of Groundwater Flow on the Effective Thermal Conductivity. Proceedings.
- Kavanaugh SP & Rafferty KD (2014) Geothermal heating and cooling: design of ground-source heat pump systems. ASHRAE,
- Kharseh M (2011) Reduction of prime energy consumption by ground source heat pumps in a warmer world. (Luleå tekniska universitet).
- Lee C, Lee K, Choi H & Choi H-P (2010) Characteristics of thermally-enhanced bentonite grouts for geothermal heat exchanger in South Korea. Science in China Series E: Technological Sciences 53(1):123-128.
- Lielbel HT, Javed S & Vistnes G (2012) Multi-injection rate thermal response test with forced convection in a groundwater-filled borehole in hard rock. Renewable energy 48:263-268.
- Marcotte D & Pasquier P (2008) On the estimation of thermal resistance in borehole thermal conductivity test. Renewable energy 33(11):2407-2415.
- Pambou CHK, Raymond J & Lamarche L (2019) Improving thermal response tests with wireline temperature logs to evaluate ground thermal conductivity profiles and groundwater fluxes. Heat and Mass Transfer 55(6):1829-1843.
- Raymond J (2018) Colloquium 2016: Assessment of subsurface thermal conductivity for geothermal applications. Canadian Geotechnical Journal 55(9):1209-1229.
- Raymond J, Ballard JM, & Koubikana Pambou CH (2019) Improving ground heat exchangers for geothermal heat pump systems with a groundwater-filled borehole and a thermally enhanced double-U pipe. The 72nd Canadian Geotechnical Conference, St-John's.
- Raymond J, Therrien R, Gosselin L & Lefebvre R (2011) A review of thermal response test analysis using pumping test concepts. Groundwater 49(6):932-945. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2010.00791.x>
- Talbot Poulin MC, Comeau G, Tremblay Y, Therrien R, Nadeau MM, Lemieux JM, Molson J, Fortier R, Therrien P, Lamarche L, Donati-Daoust F & Bérubé S (2013) Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du territoire de la Communauté métropolitaine de Québec, Rapport final. Département de géologie et de génie géologique, Université Laval, mars 2013, 172 pages, 19 annexes, 28 cartes



UNIVERSITÉ
LAVAL

IN
RS

Institut national
de la recherche
scientifique



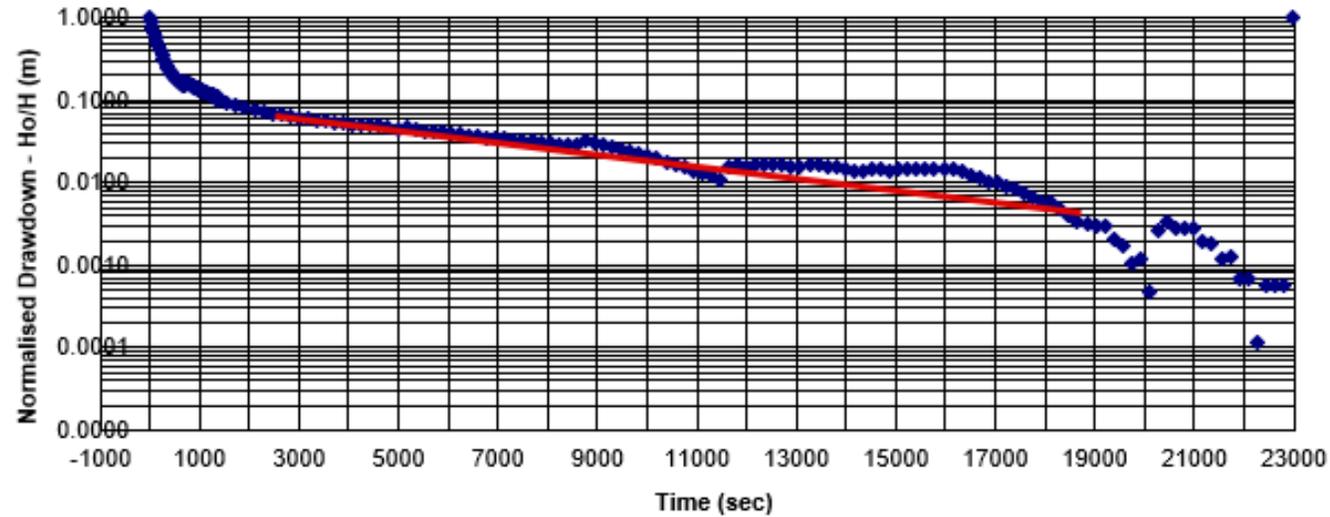
FONCER TEDGIEER

Technologies Environnementales de Décontamination
et Gestion Intégrée des Eaux et Effluents Résiduaire

COOP CARBONE

Annexe

Annexe



HYDRAULIC CONDUCTIVITY

$$K = \frac{Rc^2 \cdot \ln(Re/Rw) \cdot \ln(Ho/Ht)}{2 \cdot d \cdot t}$$

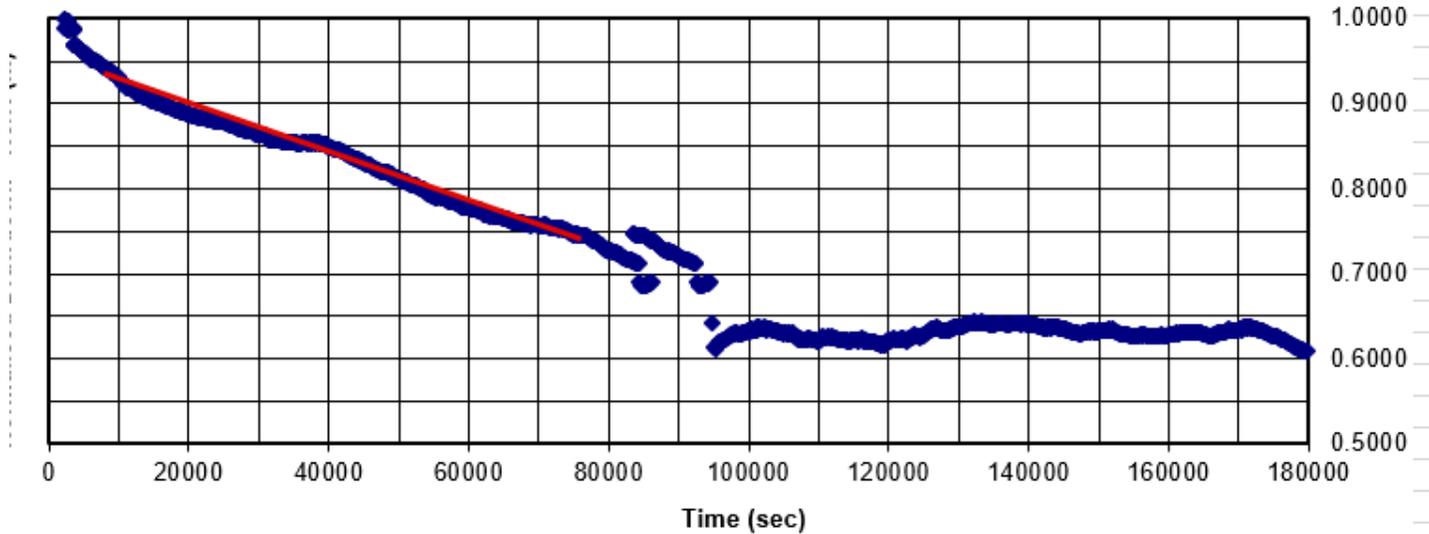
$H_1 =$	0.0810	m	$\ln(Re/Rw) =$	2.87	
$H_2 =$	0.0030	m	$Rc =$	0.053	m
$\Delta t =$	17000	sec	$d =$	1.5	m

Hydraulic conductivity

if Rc	$K =$	5.18E-07	m/sec	$T =$	2.07E-05
-------	-------	-----------------	-------	-------	-----------------

Slug test effectué dans le puits d'observation 1 sur le terrain du LISTE de l'INRS

Annexe



HYDRAULIC CONDUCTIVITY					
$K = \frac{Rc^2 \cdot \ln(Re/Rw) \cdot \ln(Ho/Ht)}{2 \cdot d \cdot t}$					
$H_1 =$	0.9692	m	$\ln(Re/Rw) =$	2.50	
$H_2 =$	0.7301	m	$Rc =$	0.076	m
$\Delta t =$	75660	sec	$d =$	1.5	m
Hydraulic conductivity					
if Rc	$K =$	1.80E-08	m/sec	$T =$	7.22E-07

Slug test effectué dans le puits d'observation 3 sur le terrain du LISTE de l'INRS

Annexe : Potentiel de l'énergie géothermique dans le traitement de l'eau potable

D'après les normes publiées en 1979 par Santé Canada, une limite de ≤ 15 °C a été établie pour la température de l'eau potable. De plus, la température de l'eau doit être régularisée pendant son traitement pour connaître la quantité de produits chimiques à ajouter. La température n'a pas d'effet direct sur la santé, mais a un impact sur l'efficacité de la chloration et de la coagulation ainsi que sur la survie des micro-organismes qui y résident. De plus, il est indiqué qu'une température basse de l'eau aide à réduire les pertes économiques dues à la corrosion.

Caractéristiques physiques liées à la température de l'eau ;

- en dépassant la limite de 19 °C, l'eau est considérée comme désagréable à boire selon une étude empirique menée par Burnson (1938);
- une température de 10 °C est optimale pour la consommation.

La géothermie **de type eau-eau** pourrait donc être intéressante pour régulariser la température de l'eau pendant son traitement ou encore pendant son transport vers les résidences. Au Québec, la température non perturbée du sol se situe **entre 8 °C et 10 °C**, soit à peu près la température optimale pour la consommation. De plus, la température du sol ne varie pas beaucoup au courant des saisons à partir de 10m, le système n'aurait pas besoin d'être particulièrement profond et onéreux.

(1) <https://www.canada.ca/content/dam/canada/health-canada/migration/healthy-canadians/publications/healthy-living-vie-saine/water-temperature-eau/alt/water-temperature-eau-eng.pdf>

(2) Burnson, B. Seasonal temperature variations in relation to water treatment. J. Am. Water Works Assoc., 30: 793 (1938)

Annexe : Fichiers de données

- [Donnees_TRT_2020](#) (données capteurs pt100)
- [Capteurs_StarOddi_In_out](#) (données capteurs Starmon mini)
- [staroddi_circulation](#) (données capteurs Starmon mini pendant la circulation)
- [Analyse_Staroddi](#) (capteurs Starmon mini)
- [ANALYSE_Pt100](#) (capteurs Pt100)
- [Slug test obs3](#) (données du slug test sur le puits d'observation obs3)
- [Slug test obs1](#) (données du slug test sur le puits d'observation obs1)