

Évaluation du potentiel géothermique des mines désaffectées de Société Asbestos limitée à Thetford Mines



Félix-Antoine Comeau
Jasmin Raymond
Dan David Ngoyo Mandemvo



Institut national
de la recherche
scientifique

Rapport de recherche R1856

soumis à
Société Asbestos limitée

11 juin 2019

Centre Eau Terre Environnement, 490 de la Couronne, Québec, QC, G1K 9A9

© INRS, Centre - Eau Terre Environnement, 2019
Tous droits réservés

ISBN : 978-2-89146-984-5 (version numérique)

Dépôt légal - Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2024
Dépôt légal - Bibliothèque et Archives Canada, 2024

RÉSUMÉ

Depuis l'arrêt des opérations, les galeries souterraines de la mine Johnson et les fosses à ciel ouvert des mines King-Beaver et British-Canadian, à Thetford Mines, se sont remplies d'eau, dont la température est relativement constante tout le long de l'année. En utilisant des pompes à chaleur géothermique, cette eau pourrait servir à chauffer et climatiser des bâtiments qui pourraient être localisés à proximité de ces mines, ce qui donnerait une seconde vie à ce site minier et contribuerait à sa restauration.

Un bilan thermique, soit l'énergie totale pouvant être extraite du volume d'eau des trois mines sur une période minimale de 25 ans, a d'abord été calculé et ce, pour trois applications énergétiques distinctes. Les modes « chauffage » et « climatisation » impliquent l'utilisation d'un système de pompe à chaleur pour bonifier l'extraction énergétique de l'eau, tandis que le mode « *free-cooling* » utilise directement la basse température de l'eau pour climatiser, en la faisant circuler dans un circuit du bâtiment.

À partir du résultat des calculs du bilan thermique des mines, la capacité d'approvisionner trois types de bâtiments en chaleur ou en froid avec l'eau des mines a été évaluée, soit :

- 2 usines (200' x 500' chacune)
- 1 serre de cannabis (1,0 ha)
- 1 centre de données (100' x 100')

À la lumière des résultats obtenus, il apparaît que les deux mines à ciel ouvert contiennent l'énergie suffisante pour subvenir aux besoins énergétiques de chauffage, *free-cooling* ou climatisation des trois bâtiments-types sur une période de 25 ans. Alors que les deux mines à ciel ouvert semblent avoir un potentiel similaire pour le chauffage, il s'avère que la mine British-Canadian a un potentiel près de deux fois supérieur en ce qui a trait au *free-cooling* et à la climatisation, dû à la température un peu plus basse de son eau, ainsi que son volume supérieur à celui de la mine King-Beaver.

En effet, basé sur les évaluations énergétiques réalisées par SNC-Lavalin des trois bâtiments-types, les mines à ciel ouvert King-Beaver et British-Canadian pourraient, chacune, fournir la chaleur annuelle nécessaire pour 4 usines. En *free-cooling*, c'est de 2 à 4 ha de serres de cannabis, ainsi qu'un centre de données, que chacune des mines pourraient alimentées.

C'est en mode climatisation couplé à un système de pompes à chaleur que le potentiel des mines semble être le plus élevé, avec une capacité jusqu'à 3 fois supérieure qu'en *free-cooling*. En effet, c'est de 5 à 8 ha de serres de cannabis respectivement, ainsi que de 1 à 2 centres de données, que l'eau des mines à ciel ouvert King-Beaver et British-Canadian pourrait subvenir.

En ce qui concerne la mine souterraine Johnson, bien que la température de l'eau y soit plus élevée (± 8 °C), le volume d'eau demeure très restreint à 0,2 M m³ comparativement à 22,7 M m³ pour King-Beaver et 34,5 M m³ pour BC. Ainsi, ce système ne pourrait être utilisé que pour des besoins limités, qui seraient toutefois suffisants pour la consommation énergétique annuelle en chauffage d'une unité de 2 usines.

TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION	7
2. LOCALISATION	9
2.1 Cadre géologique	9
2.2 Le site minier de Société Asbestos	9
3. Travaux de terrain	11
3.1 Acquisition de profils de température	11
3.2 Échantillonnage d'eau	11
4. Résultats des analyses d'eau	13
5. Bilan thermique de l'eau contenue dans les mines	15
5.1 Température de l'eau des mines	15
5.2 Volume de l'eau des mines.....	16
5.3 Volume de la roche des mines	17
5.4 Bilan thermique global	21
6. Capacité de génération d'énergie géothermique	23
6.1 Bâtiments-types	23
6.2 Énergie géothermique disponible	24
7. Conclusion	29
8. Bibliographie.....	31
Annexe 1 - Résultats des analyses d'eau pour les bactéries du fer.	33
Annexe 2 - Résultats des analyses d'eau pour les éléments et paramètre physico-chimiques.....	47
Annexe 3 - Bilan thermique du volume d'eau des mines.	53
Annexe 4 – Bilan thermique de la roche encaissante de la mine King-Beaver.	55
Annexe 5 – Bilan thermique de la roche encaissante de la mine British-Canadian.....	56
Annexe 6 – Bilan thermique de la roche encaissante de la mine Johnson.	57

1. INTRODUCTION

Malgré que les sites miniers requièrent l'investissement d'importants capitaux pour en permettre leur exploitation, ceux-ci ont toujours été considérés comme ayant très peu de valeur après leur fermeture. Il existe cependant des utilisations potentiellement positives pour les mines aujourd'hui inactives, en particulier la production d'énergie géothermique renouvelable (Hall et al., 2011; Peralta Ramos et al., 2015; Loredó et al., 2016 ; Al-Habaibeha et al., 2018). Après leur fermeture, la plupart des mines deviennent inondées par l'eau souterraine et de ruissellement. L'inertie thermique de cette masse d'eau peut être exploitée par l'utilisation de systèmes de pompes à chaleur géothermique. Cette technologie peut être déployée dans tout type d'environnement géologique au bénéfice des utilisateurs qui réalisent alors des économies d'énergie significatives.

C'est dans ce contexte que Société Asbestos désire contribuer au développement économique de la région de Thetford Mines en valorisant les installations existantes sur sa propriété minière. Depuis l'arrêt des opérations, les galeries souterraines et les fosses à ciel ouvert sous la propriété de Société Asbestos, situées à l'intérieur de la ville de Thetford Mines, se sont remplies de millions de mètres cubes d'eau. Dans cette optique, Société Asbestos désire connaître le potentiel géothermique de trois de ses mines désaffectées et ennoyées présentes sur leur propriété : les mines à ciel ouvert King-Beaver et British-Canadian ainsi que la mine souterraine Johnson.

Lors de l'implantation de systèmes de pompe à chaleur géothermique, les principaux coûts sont normalement reliés aux forages. Dans le cas d'une mine désaffectées et ennoyée, cette ressource géothermique est directement accessible par les réseaux de galeries souterraines existantes ou à même la fosse à ciel ouvert. Après récupération de la chaleur contenue dans l'eau pompée via des échangeurs de chaleur, cette eau peut être retournée à un autre endroit dans la mine. Ce type de système géothermique est dit « en boucle ouverte », car il permet de pomper directement l'eau souterraine, ici contenue dans la mine (**Figure 1**).

En utilisant de cette façon des pompes à chaleur géothermique, l'énergie extraite de cette eau pourrait être utilisée pour chauffer et climatiser des bâtiments commerciaux, industriels et institutionnels situés à proximité de ces mines ou bien des entreprises énergivores comme les complexes de serres ou des centres de données. La venue de nouvelles entreprises donnerait un second souffle à Société Asbestos et à la ville de Thetford Mines. Dans un monde compétitif, toute économie est bienvenue. Peu importe le domaine d'activité, les coûts de chauffage et de climatisation représentent une part importante de l'utilisation d'un bâtiment. Par conséquent, l'utilisation de l'énergie géothermique disponible dans l'eau des mines permettrait de réduire ces coûts de façon appréciable. De plus, cela permettrait de sauvegarder des bâtiments miniers qui font partie de l'histoire de la région de Thetford Mines.

L'objectif de ce projet est ainsi d'évaluer le potentiel géothermique des mines de Société Asbestos limitée, qui désire donner une deuxième vie à ses sites, ses bâtiments ainsi qu'à ses équipements, qui sont présentement en dormance. Ceci constitue le Volet 1 d'une étude globale commandée par Société Asbestos. Dans un second temps, les coûts d'ingénierie et de construction, puis les coûts d'opération et de maintenance d'un système géothermique, font l'objet du Volet 2 : Évaluation économique sommaire. Ce volet 2 est assuré par les professionnels et ingénieurs de SNC Lavalin, en collaboration avec l'équipe responsable du volet 1 de l'INRS.

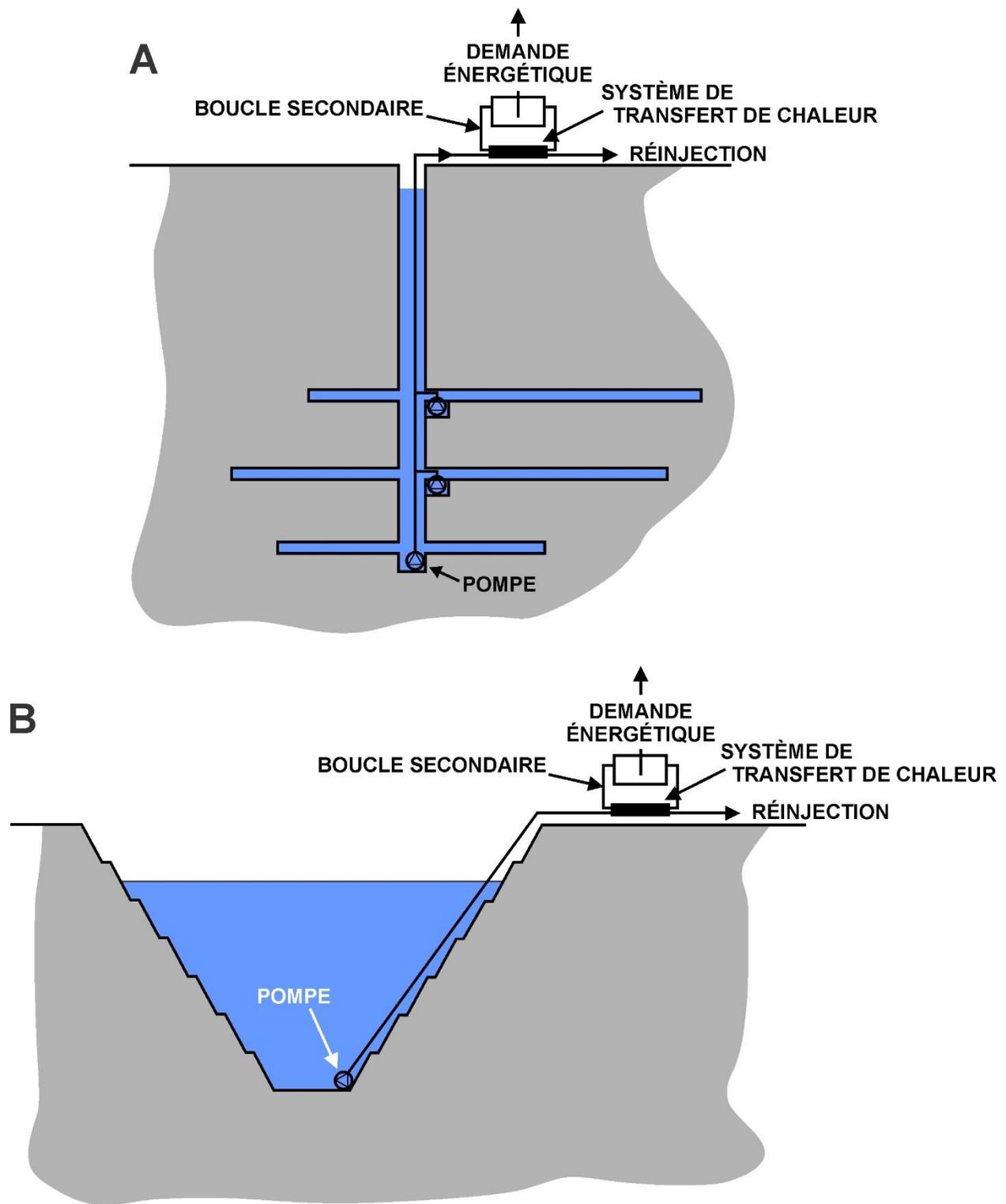


Figure 1. Systèmes de pompes à chaleur géothermiques utilisant l'eau de mines fermées et inondées. A) Mine souterraine; B) mine à ciel ouvert. Adapté de Preene et Younger (2014).

2. LOCALISATION

2.1 Cadre géologique

Le socle rocheux de la région de Thetford Mines se compose de bandes de roches ultramafiques à mafiques qui s'étendent jusqu'au mont Orford, au sud-ouest. Au sein de celles-ci, on retrouve des roches de composition péridotitique à gabbroïque appelées ophiolites. Ces roches représentent des reliques de croûtes océaniques, ainsi que du manteau supérieur, qui ont été formés au Cambrien et mis en place à l'Ordovicien inférieur lors de la fermeture de l'océan Iapétus, il y a environ 500 millions d'années, lors de la formation de la chaîne de montagnes des Appalaches. Le complexe ophiolitique de Thetford Mines s'étend sur une distance de plus de 55 km et sur une largeur maximale de 10 km au sud-ouest de la ville (Slivitzky et St-Julien, 1987). La séquence stratigraphique de ce complexe peut se diviser en quatre faciès, de la base au sommet :

- 1) péridotite tectonite très déformée (harzburgite, semelle serpentinite schisteuse et amphibolite);
- 2) suivie par les cumulats (dunite, pyroxénite et gabbro) qui est en contact tectonique avec l'harzburgite;
- 3) puis viennent les roches hypabyssales (métagabbros, dykes et filons-couches de diabase)
- 4) et, finalement de roches volcaniques (laves basaltiques coussinées) recouvertes d'une mince couche sédimentaire (argilite).

Les principaux gisements d'amiante se situent dans la péridotite, dont le site minier de Société Asbestos ne fait pas exception. D'ailleurs, le site constitue l'une des trois premières exploitations d'amiante au Canada, ayant débuté ses opérations en 1878.

2.2 Le site minier de Société Asbestos

Société Asbestos est propriétaire d'un très vaste terrain, au centre de la ville de Thetford Mines, contenant des haldes de résidus miniers. Les métaux et minéraux contenus dans ces résidus sont notamment le magnésium, le nickel, le chrome et le cobalt. La société veut ainsi poursuivre ses efforts de développement économique par la valorisation et l'utilisation de ces résidus, mais également de ces mines désaffectées. En effet, les mines à ciel ouvert King-Beaver et British-Canadian (**Figure 2**), dont les opérations ont cessé depuis une dizaine d'années se sont peu à peu remplies d'eau et constituent aujourd'hui de véritables lacs contenant des millions de mètres cube d'eau caractérisée par une couleur turquoise. Cette couleur est due aux molécules d'eau et à de très fines particules en suspension qui renvoient les longueurs d'ondes bleues et vert pâle de la lumière solaire. Comme le fond de roche est clair, notamment en raison d'un dépôt d'oxyde de magnésium comme dans la mer Caraïbes, la couleur perçue est ainsi d'un turquoise vif. De plus, il n'y a alors pas d'apport extérieur de matières organiques ou minérales pour troubler sa limpidité et changer sa couleur comme dans la plupart des lacs.

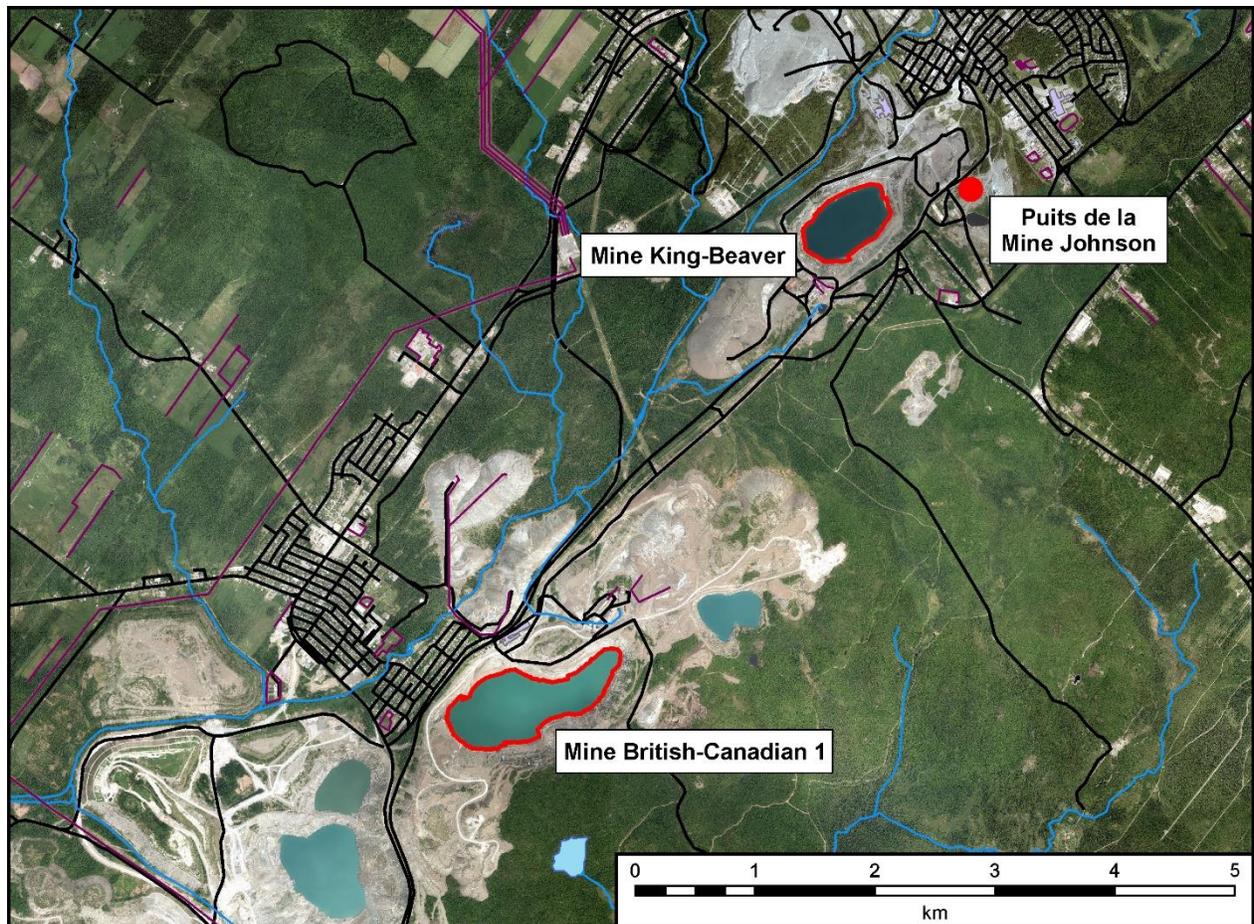


Figure 2. Image satellite du site minier de Société Asbestos à Thetford Mines et localisation des mines à ciel ouvert King-Beaver et British-Canadian, ainsi que du puits de la mine souterraine Johnson.

3. Travaux de terrain

Les 14 et 15 août 2018, un professionnel de recherche ainsi qu'un stagiaire de premier cycle se sont déplacés sur le site de Société Asbestos afin :

- 1) d'y acquérir des données de températures au sein des deux fosses à ciel ouvert (King-Beaver et British-Canadian);
- 2) d'échantillonner l'eau des trois mines (King-Beaver, British-Canadian et Johnson).

3.1 Acquisition de profils de température

Un profil de température de plus 100 m a été enregistré au moyen d'une sonde pour les mines à ciel ouvert King-Beaver et British-Canadian. La prise de donnée a été réalisée à partir du centre du lac formé par ces mines à l'aide d'une chaloupe à moteur.

Ces données de température permettent de calculer le gradient thermique et la température en profondeur de l'eau des mines à ciel ouvert. Ces données seront combinées aux données existantes de température mesurées dans un ancien puits de ventilation de la mine souterraine Johnson.

3.2 Échantillonnage d'eau

Des échantillons d'eau des mines King-Beaver, British-Canadian et Johnson ont été prélevés afin de connaître la concentration de certains éléments clefs. Ceci est nécessaire afin d'évaluer le potentiel de corrosion et de colmatage que ces eaux peuvent causer sur un système de pompes à chaleur géothermique.

Deux types d'analyses étaient visés par cet échantillonnage :

1) *Bactéries du fer - Dénombrement et identification*

Lorsque la concentration de ces bactéries est importante, l'activité bactérienne produit une gelée rougeâtre composée à 90 % d'eau qui peut obstruer les puits de pompage. Les analyses pour le dépistage des bactéries du fer ont été réalisées par les laboratoires [EnvironeX](#).

2) *Éléments et paramètre physico-chimiques*

Les analyses physico-chimiques ont été réalisées par les laboratoires de l'Institut national de la recherche scientifique au Centre Eau Terre Environnement (INRS-ETE) afin de déterminer la concentration des ions majeurs et mineurs, ainsi que d'autres paramètres, tel que la conductivité électrique et l'alcalinité. Ceci est nécessaire afin d'évaluer le risque d'entartrage et de corrosion pour le système de pompes à chaleur.

Pour ce faire, trois échantillons d'eau ont été récoltés pour chacune des analyses sur les trois sites à l'étude, soit les mines à ciel ouvert King-Beaver et British-Canadian, ainsi que dans le puits Johnson. Deux échantillons d'eau qualifiée « ultra-pure » ont été ajoutés aux analyses, appelés « Blanc », qui permettent ainsi de contrôler la contamination qui aurait pu survenir lors de l'échantillonnage. Au total, 11 échantillons d'eau ont été soumis pour chacune des deux analyses. Les résultats de tous ces tests sont présentés en annexe.

4. Résultats des analyses d'eau

Bactéries du fer - Dénombrement et identification

Les certificats d'analyse pour le dénombrement et l'identification des bactéries du fer se trouvent en annexe. Aucun résultat d'analyses n'ont pu identifier de bactéries du fer et portent la mention « Absentes » sur les certificats d'analyses. Il est donc permis de considérer ce paramètre comme étant nul et sera donc négligé lors de l'évaluation du risque de colmatage de l'eau des mines.

Éléments et paramètre physico-chimiques

Le résultat de ces analyses (en annexe) permet alors de calculer quatre différents indices afin d'évaluer le risque d'entartrage et de corrosion de ces eaux (**Tableau 1**). Ces indices se basent sur le pH de l'eau et utilisent les valeurs analytiques suivantes:

- dureté totale, exprimée en concentration de CaCO_3
- alcalinité totale, exprimée en concentration de CaCO_3
- solides dissous totaux (TDS)
- température

Au total, les indices indiquent tous un léger potentiel d'entartrage et un potentiel de corrosion quasi-nul pour une température minimale et maximale de 2 et 20 °C (**Tableau 2**). En effet, tous les échantillons d'eau montrent un indice de Langelier supérieur à 0, ce qui signifie une eau sursaturée pouvant engendrer un dépôt de carbonate de calcium (CaCO_3). Toutefois, tous les échantillons ont des indices de Ryznar et Puckorius inférieur à 7, ainsi qu'un indice de Larson-Skold inférieur à 0,8, ce qui signifie que l'eau n'a pas de tendance corrosive.

Ainsi, l'eau des trois mines montre une légère tendance à la formation de tartre, ce qui peut amener, au cours des années, à encrasser l'échangeur de chaleur du système de pompes à chaleur. Un encrassement vient réduire l'efficacité de l'échangeur de chaleur et compromettre les performances du système. Toutefois, en ayant cette information, différentes approches sont possibles pour atténuer, voire éliminer, l'effet de l'encrassement du CaCO_3 . Par exemple, il est alors possible de configurer convenablement le système en utilisant des échangeurs de chaleur dits « à plaques » afin de minimiser l'effet. Mais le nettoyage mécanique des échangeurs de chaleur demeure l'une des stratégies les plus couramment utilisées dans l'industrie pour tenter de résoudre le problème de l'encrassement (Ogbonnaya et Ajayi, 2017).

Tableau 1. Chartes des indices d'entartrage et de corrosion.

Indice de saturation de Langelier (ISL)	Indice de stabilité de Ryznar (ISR)
L'eau est sous-saturée en CaCO_3 , ce qui a tendance	Indice d'entartrage de Puckorius (IEP)
< 0 à enlever les revêtements protecteurs contre le CaCO_3	< 7 pas de tendance corrosive
existants dans les tuyaux et les équipements.	7 - 8 corrosion légère
> 0 L'eau est sursaturée en CaCO_3 , ce qui peut	> 8 corrosion importante
causer un dépôt.	
	Indice de corrosion de Larson-Skold (ICLS)
	< 0,8 pas de corrosion
	0,8 - 1,2 corrosion légère
	> 1,2 corrosion élevée

Tableau 2. Calculs des indices d'entartrage et de corrosion.

Numéro d'échantillon	KING-BEAVER			BRITISH-CANADIAN			JOHNSON		
	18-04975	18-04976	18-04977	18-04978	18-04979	18-04980	18-04981	18-04982	18-04983
Alcalinité totale (mg/l en CaCO₃)	187	190	190	400	400	400	445	445	445
Dureté totale (mg/l en CaCO₃)	198	197	197	437	437	437	572	573	568
Solides dissous totaux (mg/l)	423	442	425	449	456	464	722	740	767
Cl⁻ (meq/l)	2,79	2,80	2,77	1,04	1,03	1,03	1,77	1,79	1,79
SO₄ (meq/l)	0,178	0,179	0,178	0,172	0,172	0,172	2,14	2,16	2,16
HCO₃ (meq/l)	3,28	3,30	3,29	6,32	6,35	6,41	8,75	8,83	8,83
T_{min} (°C)	2	2	2	2	2	2	2	2	2
T_{max} (°C)	20	20	20	20	20	20	20	20	20
pH	8,9	8,9	8,9	9,2	9,3	9,3	7,7	7,7	7,8
$A = (\log[SDT] - 1)/10$	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
$B_{min} = -13,12 \times \log[T_{min}+273] + 34,55$	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
$B_{max} = -13,12 \times \log[T_{max}+273] + 34,55$	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
$C = \log[dureté] - 0,4$	1,9	1,9	1,9	2,2	2,2	2,2	2,4	2,4	2,4
$D = \log[alcalinité]$	2,3	2,3	2,3	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6
$pH_{s-min} = 9,3 + (A + B_{min}) - (C + D)$	7,8	7,8	7,8	7,2	7,2	7,2	7,0	7,0	7,0
$pH_{s-max} = 9,3 + (A + B_{max}) - (C + D)$	7,5	7,5	7,5	6,8	6,8	6,8	6,7	6,7	6,7
$pH_{eq} = 1,465 \times \log[alcalinité] + 4,54$	7,9	7,9	7,9	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4
Indice de saturation Langelier 2 °C	1,01	1,03	1,03	1,99	2,09	2,08	0,67	0,69	0,72
ISL = pH - pH _s 20 °C	1,37	1,39	1,40	2,35	2,45	2,44	1,04	1,05	1,08
Indice de stabilité Ryznar 2 °C	6,83	6,81	6,80	5,18	5,08	5,09	6,35	6,33	6,31
ISR = 2 x pH _s - pH 20 °C	6,11	6,08	6,08	4,45	4,36	4,37	5,63	5,61	5,59
Indice d'entartrage Puckorius 2 °C	7,81	7,80	7,79	5,99	5,99	5,99	5,63	5,63	5,64
IEP = 2 x pH _s - pH _{eq} 20 °C	7,09	7,07	7,07	5,26	5,26	5,27	4,91	4,91	4,92
Indice de corrosion Larson-Skold	0,15	0,15	0,15	0,03	0,03	0,03	0,43	0,44	0,44
ICLS = (Cl ⁻ x SO ₄)/HCO ₃									

5. Bilan thermique de l'eau contenue dans les mines

Un bilan thermique des trois mines a été calculé et ce, pour trois applications énergétiques distinctes :

- en mode chauffage, soit abaisser la température de l'eau de la mine jusqu'à 2 °C
- en mode *free-cooling*, soit augmenter la température de l'eau de la mine jusqu'à 11 °C
- en mode climatisation, soit augmenter la température de l'eau de la mine jusqu'à 20 °C

Pour ce faire, nous avons estimé l'énergie nécessaire pour extraire sur une période de 25 ans toute l'énergie disponible du volume d'eau de la mine et de la roche encaissante influencé par les variations de températures.

5.1 Température de l'eau des mines

La **Figure 3** présente respectivement le profil de température mesuré pour les mines King-Beaver et British-Canadian, les 14 et 15 août 2018. Dans les deux cas, à partir d'environ 25 mètres de profondeur, la température est plus ou moins stable et d'environ 5 °C. Comparativement à la mine souterraine Johnson, ces températures sont inférieures. En effet, la température moyenne enregistrée en 2017 par Arrakis dans le puits Johnson avait été évalués à 8,29 °C. Toutefois, les températures enregistrées dans ce puits vont jusqu'à 382 m, tandis que les fosses à ciel ouvert n'ont qu'environ 100 m de profondeur et leur surface est directement en contact avec l'air ambiant. De plus, la mine souterraine conserve mieux la chaleur du sous-sol que les fosses à ciel ouvert. En effet, la surface des mines à ciel ouvert est directement en contact avec l'air ambiant, dont la température atmosphérique moyenne annuelle a été de 4,6°C de 1981 à 2010 (Gouvernement du Canada, 2019).

À lumière de ces résultats, il a été décidé d'utiliser les valeurs de température qui deviennent constantes sous les 25 mètres de profondeur pour le calcul du bilan thermique. Nous avons donc négligé les variations de température mensuelles dans la couche superficielle de 25 mètres plus élevées durant les saisons chaudes puis inférieures en hiver, et assumons donc qu'au cours de l'année, cette couche a une température moyenne équivalente à celle mesurée en profondeur. Ainsi, les températures suivantes ont été considérées pour l'eau des mines :

- King-Beaver : 4,8 °C
- British-Canadian: 4,0 °C
- Johnson: 8,29 °C

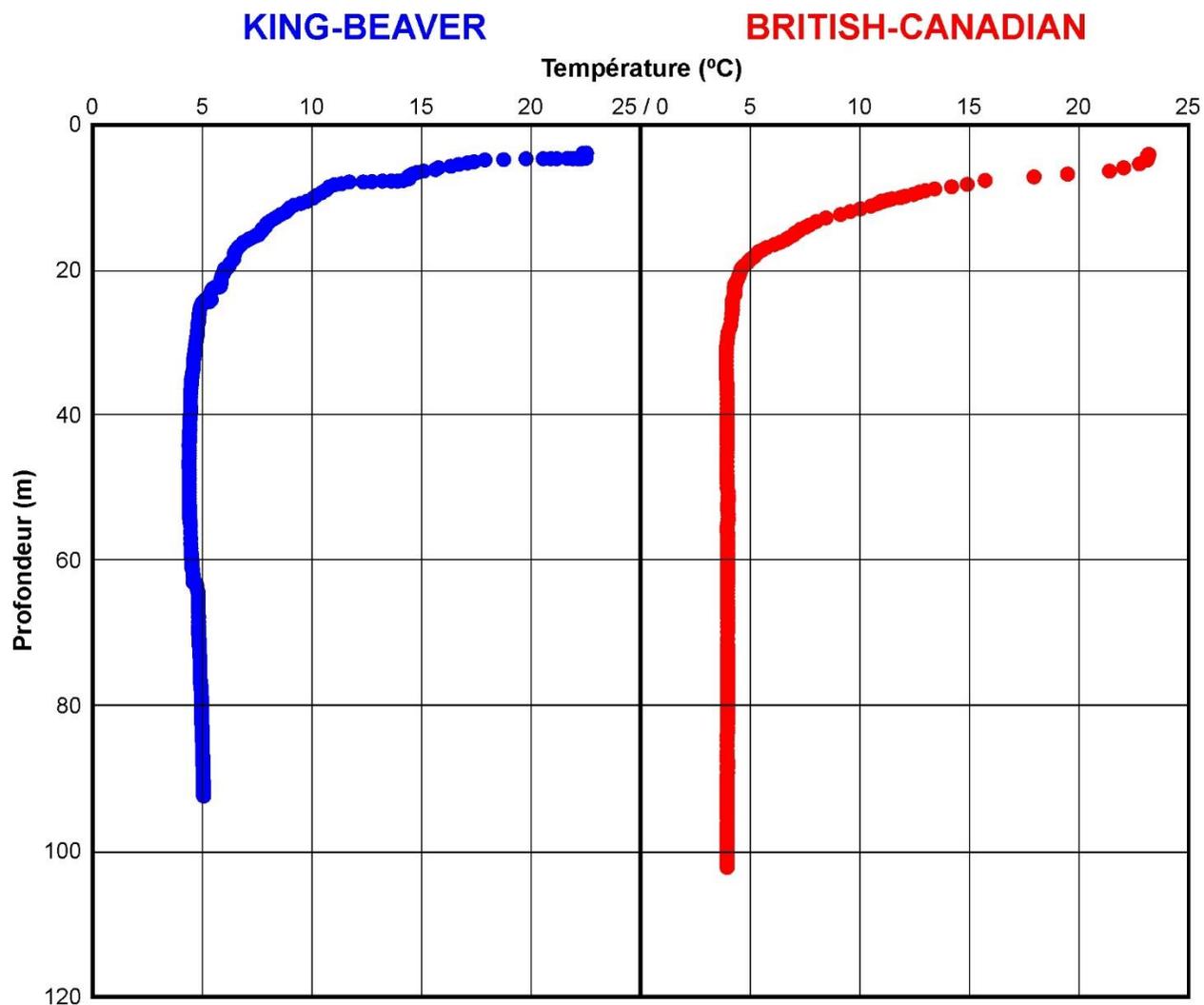


Figure 3. Profils de température de l’eau contenue dans les mines à ciel ouvert King-Beaver et British-Canadian, enregistrés respectivement les 14 et 15 août 2018.

5.2 Volume de l’eau des mines

Pour le calcul du volume de l’eau contenue dans les mines à ciel ouvert, nous avons utilisé la géométrie de la fosse King-Beaver, montrée par la coupe transversale produite par Arrakis (2011) (**Figure 4**). De plus, pour la mine souterraine Johnson, nous avons utilisé les estimations de volume d’eau réalisés par Société Asbestos (**Tableau 3**).

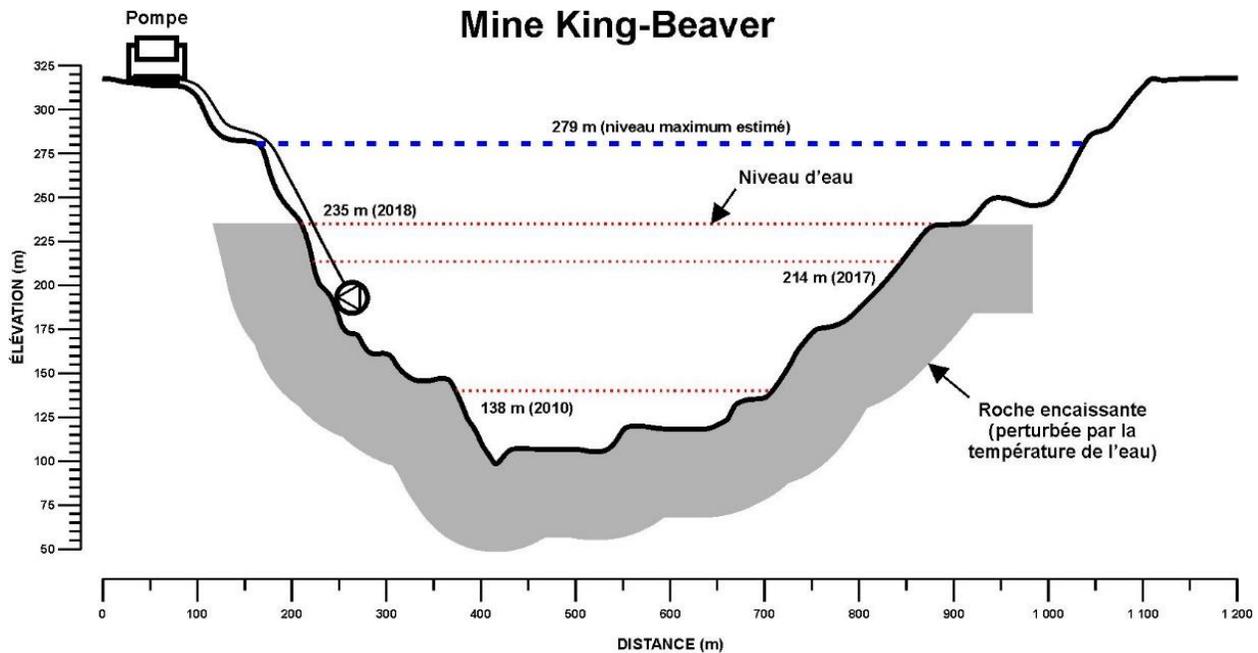


Figure 4. Coupe transversale de la mine King-Beaver montrant les niveaux d'eau historiques (modifié d'Arrakis, 2011).

Tableau 3. Volume d'eau des mines utilisé pour les calculs du bilan thermique.

Mines	Niveau	Superficie (m ²)	Volume (m ³)
King-Beaver	235	305 442	22 680 986
British-Canadian	274	600 428	34 492 918
Johnson	1720	–	182 365

5.3 Volume de la roche des mines

Pour les deux mines à ciel ouvert, King-Beaver et British-Canadian, les rayons d'influence de la température du volume d'eau sur la roche encaissante ont été calculés à l'aide d'un modèle numérique (**Tableau 4**). Cette étape est cruciale pour l'évaluation du bilan thermique afin de considérer l'énergie qui pourrait être extraite ou absorbée par la roche encaissante en abaissant ou augmentant sa température. La température initiale de la roche encaissante a été évaluée à 8,8 °C et été déduite des données météorologiques historiques de Thetford Mines de 1981 à 2010 (Gouvernement du Canada, 2019) en utilisant l'équation empirique pour la température du sol non perturbée proposée par Ouzzane et al. (2015). Ainsi, les **Figure 5**, **Figure 6** et **Figure 7** montrent le graphique des rayons d'influence de la température dans la roche encaissante des mines à ciel ouvert pour les modes chauffage, *free-cooling* et climatisation, respectivement.

Pour la mine souterraine Johnson, les rayons d'influence de la température de l'eau sur la roche encaissante ont été estimés à une profondeur de 262 m (**Tableau 5**), soit la moitié du fonds du puits Johnson (524 m ou 1 720'). À cette profondeur, avec un gradient géothermique de 16 °C km⁻¹

(Missener et al., 1951; Beck 1977), la température de la roche est donc évaluée à 13,08°C, ce qui implique que le mode *free-cooling* n'est pas possible, car cette température de la roche encaissante est supérieure à la limite de 11 °C pour le fonctionnement du mode *free-cooling*. Malgré le faible volume d'eau de la mine souterraine Johnson, le volume de roche impliqué dans le calcul du bilan thermique est proportionnellement beaucoup plus important que celui des mines à ciel ouvert, étant donné la plus grande surface de contact impliquée par l'eau de la mine. Le résultat des calculs de volumes de la roche encaissante des trois mines pour les différents modes d'applications se retrouvent en annexe.

Tableau 4. Rayons d'influence de la température sur la roche encaissante des mines à ciel ouvert pour chacun des trois modes lorsque le volume d'eau de la mine a atteint son plein potentiel après 25 ans, soit la température limite du mode d'application énergétique.

MINES À CIEL OUVERT			KING-BEAVER ET BRITISH-CANADIAN					
CHAUFFAGE			FREE-COOLING			CLIMATISATION		
T (°C)	Rayon (m)	ΔT (°C)	T (°C)	Rayon (m)	ΔT (°C)	T (°C)	Rayon (m)	ΔT (°C)
2	0	6,8	11	0	2,2	20	0	11,2
3	3	5,8	10,5	9	1,7	18	4	9,2
4	7	4,8	10	19	1,2	17	6	8,2
5	11	3,8	9,5	30	0,7	16	8	7,2
6	16	2,8	9	41	0,2	15	10	6,2
7	23	1,8	8,8	61	0	14	12	5,2
8	31	0,8				13	14	4,2
8,1	34	0,7				12	17	3,2
8,5	43	0,3				11	21	2,2
8,8	64	0				10	25	1,2
						9	29	0,2
						8,9	31	0,1
						8,8	98	0

Tableau 5. Rayons d'influence de la température sur la roche encaissante de la mine souterraine pour les modes chauffage et climatisation lorsque le volume d'eau de la mine a atteint son plein potentiel après 25 ans, soit la température limite du mode d'application énergétique.

MINE SOUTERRAINE			MINE JOHNSON		
CHAUFFAGE			CLIMATISATION		
T (°C)	Rayon (m)	ΔT (°C)	T (°C)	Rayon (m)	ΔT (°C)
2	0	11,6	20	0	6,9
4	1	9,6	19	2	5,9
5	2	8,6	18	3	4,9
6	3	7,6	17	5	3,9
7	4	6,6	16	8	2,9
8	6	5,6	15	13	1,9
9	8	4,6	14	21	0,9
10	12	3,6	13,08	60	0,0
11	14	2,6			
12	16	1,6			
13,08	53	0,52			

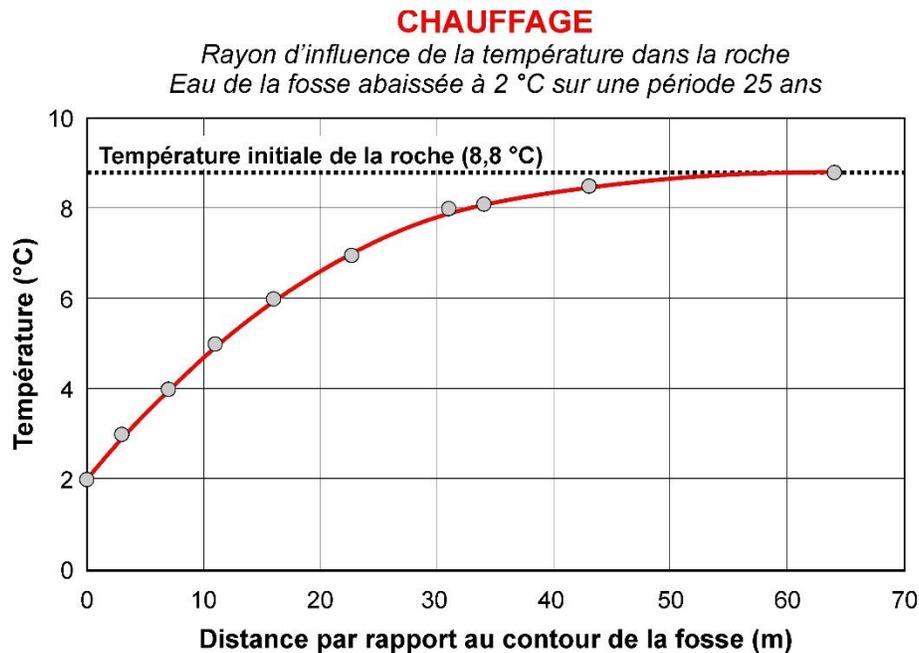


Figure 5. Rayons d'influence de la température sur la roche encaissante de la mine King-Beaver pour le mode chauffage.

FREE-COOLING

Rayon d'influence de la température dans la roche
Eau de la fosse augmentée à 11 °C sur une période 25 ans

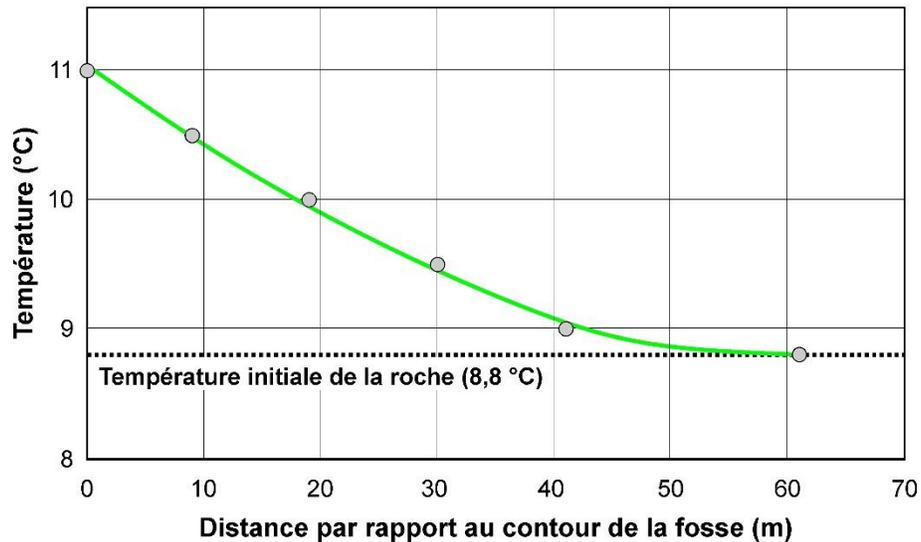


Figure 6. Rayons d'influence de la température sur la roche encaissante de la mine King-Beaver pour le mode *free-cooling*.

CLIMATISATION

Rayon d'influence de la température dans la roche
Eau de la fosse augmentée à 20 °C sur une période 25 ans

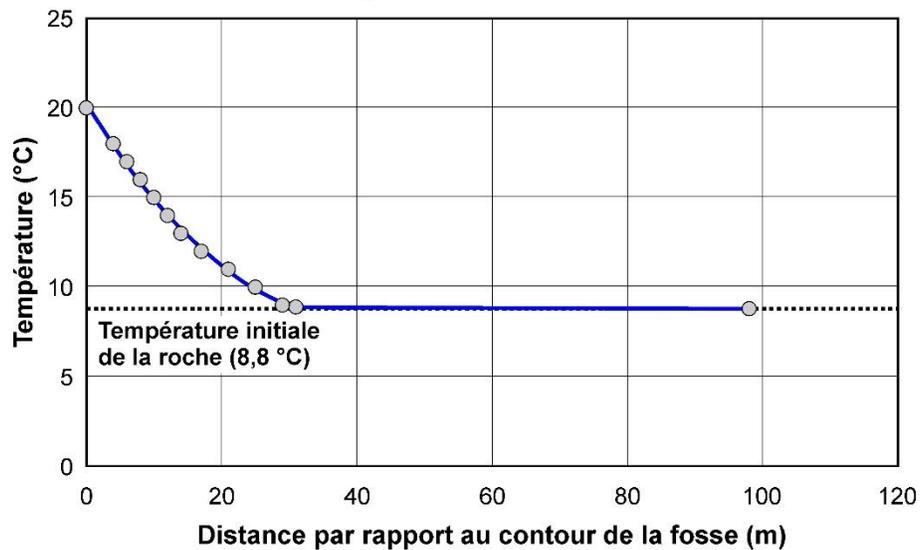


Figure 7. Rayons d'influence de la température sur la roche encaissante de la mine King-Beaver pour le mode climatisation.

5.4 Bilan thermique global

L'énergie globale disponible à partir de l'eau des mines provient en réalité de la somme du bilan thermique du volume d'eau et de la roche encaissante influencé par les variations de températures de l'eau. Pour ce faire, l'extraction ou l'injection de chaleur de l'eau de mine dépend de la température de l'eau et de la roche, ainsi que de leur volume, qui se calculent ainsi :

$$E_n = v_n \times (T_n - T_{min}) \times c$$

où,

E_n (MJ) est l'énergie disponible pour une période donnée,

v_n (m³) est le volume d'eau ou de roche,

T_n (°C) est la température de l'eau ou de la roche,

$T_{min/max}$ (°C) est la température minimale/ maximale à laquelle l'eau ou la roche peuvent être refroidies/réchauffées,

c (MJ m⁻³ K⁻¹) est la capacité thermique volumétrique (eau = 4,184 MJ m⁻³ K⁻¹; roche (péridotite) = 2,81 W m⁻¹ K⁻¹).

À noter que la valeur énergétique exprimée en MWh est souvent plus commode, et se convertit en divisant la valeur d'énergie en MJ par 3 600 s h⁻¹. Cette énergie extraite ou injectée du volume d'eau ou de la roche peut également être convertie en puissance selon cette équation :

$$P = \frac{E_n}{t_n}$$

où,

P (MW) est la puissance thermique,

E_n (MJ) est l'énergie disponible au cours de la période de temps t_n ,

t_n (s) est la période de temps au cours de laquelle cette énergie est extraite.

Les résultats du calcul du bilan thermique, sur une période de 25 ans, pour l'eau des mines et de leur roche encaissante sont présentés au **Tableau 6**. Les détails des calculs pour l'eau des mines et de la roche encaissante sont présents en annexe. Le débit d'eau nécessaire pour extraire ou injecter l'énergie sur une période de 25 ans est également calculé. Il est à noter que ce débit signifie une exploitation continue, 24 heures sur 24, pendant 25 ans. Pour ce calcul, l'équation de la puissance globale obtenue de la mine a été utilisée :

$$P = D \times \Delta T \times c$$

où,

D (m³ s⁻¹) est le taux d'extraction de l'eau de la mine ou le débit de pompage,

ΔT (K) est la baisse de température de l'eau de la mine, qui équivaut à $T_n - T_{min}$,

c (MJ m⁻³ K⁻¹) est la capacité thermique volumétrique de l'eau (4,184 MJ m⁻³ K⁻¹).

Tableau 6. Bilan thermique de l'eau des mines et de la roche encaissante.

		MINE KING-BEAVER			CHAUFFAGE			
	Niveau	Énergie (MWh)	$P_{25\text{ ans}}$ (MW)	P_{global} (MW)	T_0 (°C)	$T_{25\text{ ans}}$ (°C)	Débit ($\text{m}^3\text{ s}^{-1}$)	Débit (gal min^{-1})
EAU	235	73 809	0,337	0,402	4,8	2,0	0,034	544
ROCHE		14 174	0,065					
		MINE KING-BEAVER			FREE-COOLING			
	Niveau	Énergie (MWh)	$P_{25\text{ ans}}$ (MW)	P_{total} (MW)	T_0 (°C)	$T_{25\text{ ans}}$ (°C)	Débit ($\text{m}^3\text{ s}^{-1}$)	Débit (gal min^{-1})
EAU	235	163 434	0,746	0,775	4,8	11,0	0,030	473
ROCHE		6 204	0,028					
		MINE KING-BEAVER			CLIMATISATION			
	Niveau	Énergie (MWh)	$P_{25\text{ ans}}$ (MW)	P_{total} (MW)	T_0 (°C)	$T_{25\text{ ans}}$ (°C)	Débit ($\text{m}^3\text{ s}^{-1}$)	Débit (gal min^{-1})
EAU	235	400 677	1,830	1,910	4,8	20,0	0,030	476
ROCHE		17 522	0,080					
		MINE BRITISH-CANADIAN			CHAUFFAGE			
	Niveau	Énergie (MWh)	$P_{25\text{ ans}}$ (MW)	P_{global} (MW)	T_0 (°C)	$T_{25\text{ ans}}$ (°C)	Débit ($\text{m}^3\text{ s}^{-1}$)	Débit (gal min^{-1})
EAU	274	80 177	0,366	0,465	4,0	2,0	0,056	880
ROCHE		21 555	0,098					
		MINE BRITISH-CANADIAN			FREE-COOLING			
	Niveau	Énergie (MWh)	$P_{25\text{ ans}}$ (MW)	P_{global} (MW)	T_0 (°C)	$T_{25\text{ ans}}$ (°C)	Débit ($\text{m}^3\text{ s}^{-1}$)	Débit (gal min^{-1})
EAU	274	280 619	1,281	1,324	4,0	11,0	0,045	717
ROCHE		9 434	0,043					
		MINE BRITISH-CANADIAN			CLIMATISATION			
	Niveau	Énergie (MWh)	$P_{25\text{ ans}}$ (MW)	P_{global} (MW)	T_0 (°C)	$T_{25\text{ ans}}$ (°C)	Débit ($\text{m}^3\text{ s}^{-1}$)	Débit (gal min^{-1})
EAU	274	641 415	2,929	3,051	4,0	20,0	0,044	693
ROCHE		26 647	0,122					
		MINE JOHNSON			CHAUFFAGE			
	Niveau	Énergie (MWh)	$P_{25\text{ ans}}$ (MW)	P_{total} (MW)	T_0 (°C)	$T_{25\text{ ans}}$ (°C)	Débit ($\text{m}^3\text{ s}^{-1}$)	Débit (gal min^{-1})
EAU	1720	1 335	0,006	0,207	8,3	2,0	0,008	125
ROCHE		44 107	0,201					
		MINE JOHNSON			CLIMATISATION			
	Niveau	Énergie (MWh)	$P_{25\text{ ans}}$ (MW)	P_{total} (MW)	T_0 (°C)	$T_{25\text{ ans}}$ (°C)	Débit ($\text{m}^3\text{ s}^{-1}$)	Débit (gal min^{-1})
EAU	1720	1 908	0,009	0,150	8,3	20,0	0,003	49
ROCHE		30 836	0,141					

6. Capacité de génération d'énergie géothermique

6.1 Bâtiments-types

À partir du résultat des calculs du bilan thermique des mines, il est alors possible d'évaluer la capacité d'exploitation de l'eau des mines pour les trois bâtiments types :

- 2 usines (200' x 500' chacune, pour un total de 1,9 ha)
- 1 serre de cannabis (1,0 ha)
- 1 centre de données (100' x 100' ou 0,1 ha)

La position potentielle de ces bâtiments a été identifiée sur le site de la mine à ciel ouvert King-Beaver à la **Figure 8**.

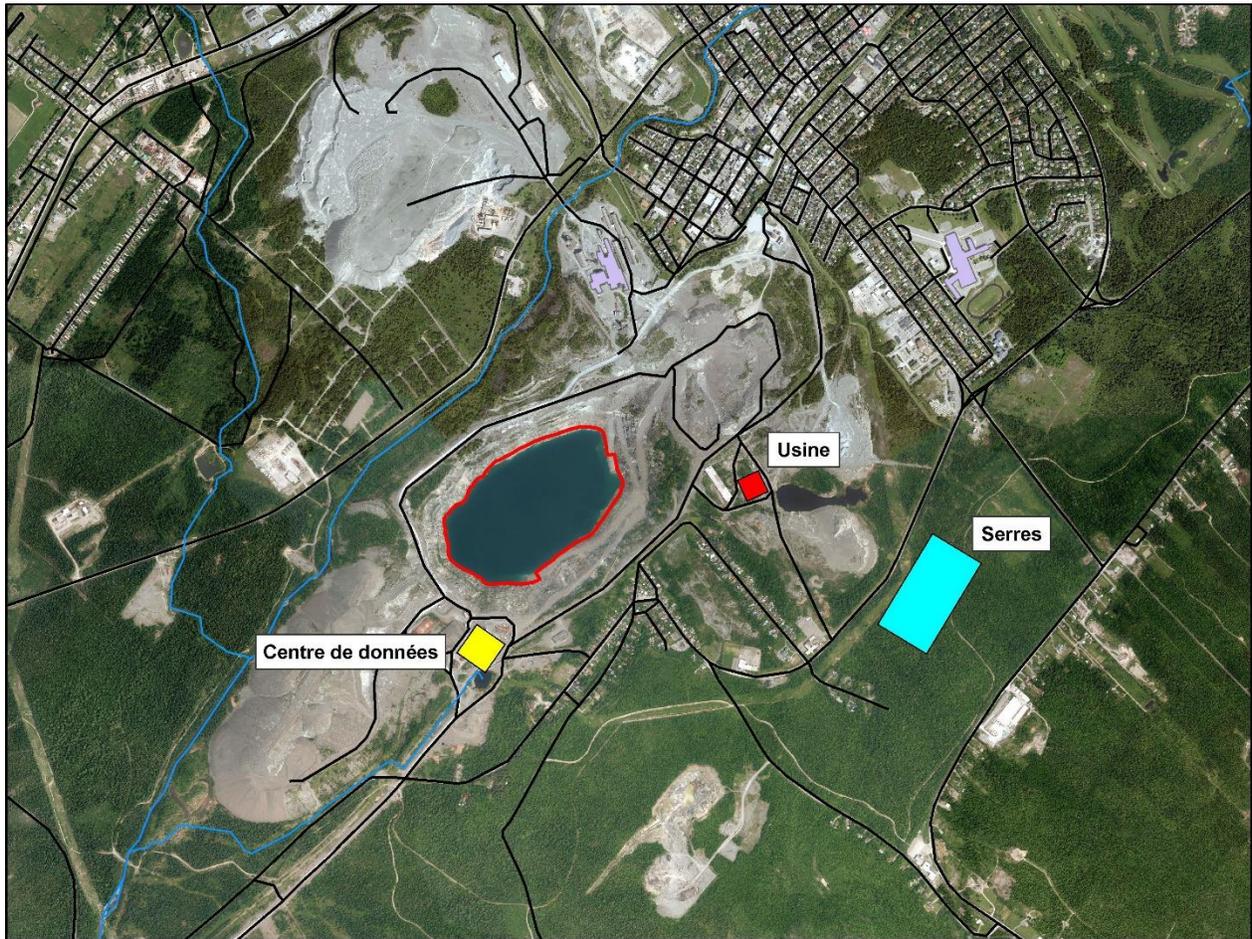


Figure 8. Localisation des bâtiments-types autour de la mine à ciel ouvert King-Beaver.

La demande énergétique annuelle globale sur chacune des mines et pour chacun des bâtiments-types a été évaluée, en fonction des simulations énergétiques de bâtiments réalisées avec SNC-Lavalin (**Tableau 7**). Étant donné que la serre de cannabis a besoin à la fois de chauffage et de climatisation sur une année, un calcul global supplémentaire a été réalisé en fonction du taux de contribution du système de pompes à chaleur et du COP utilisé par SNC-Lavalin (**Tableau 8**).

Tableau 7. Demande énergétique annuelle globale des trois bâtiments-types sur l'eau des mines.

	2 usines	Serre de cannabis	Centre de données
Superficie (ha)	1,859	1,000	0,093
Énergie de chauffage annuelle (MWh)	2 531	–	–
Énergie de climatisation annuelle (MWh)	–	2 536	8 293

Tableau 8. Consommation énergétique annuelle d'une serre de cannabis d'un hectare, estimée par SNC-Lavalin.

	Serre de cannabis			
	Énergie annuelle (MWh)	Ratio d'énergie (%)	COP	Étotal (MWh)
Énergie de chauffage annuelle (MWh)	6 376	78	3,29	3 461
Énergie de <i>free-cooling</i> annuelle (MWh)	12 494	48	–	5 997
				2 536

6.2 Énergie géothermique disponible

À l'aide d'un système de pompes à chaleur géothermique, de la chaleur ainsi que du froid peuvent être produits de façon efficace selon la température de l'eau à l'entrée de la pompe à chaleur, en fonction d'un coefficient de performance (COP) propre au système, conçu par SNC-Lavalin. En fonction du débit élevé nécessaire à l'exploitation de l'eau des mines, un COP respectivement de 3,29 et 4,30 a été utilisé pour le chauffage et la climatisation. Quant à lui, le mode « *free-cooling* » n'implique pas de COP, car celui-ci utilise directement la basse température de l'eau pour climatiser, en la faisant circuler dans un circuit du bâtiment.

Une source d'énergie, généralement de l'électricité, est nécessaire pour l'opération du compresseur du système de pompes à chaleur géothermique. Il en résulte ainsi des économies d'énergie, que ce soit pour le mode chauffage ou climatisation. Toutefois, la quantité d'énergie nécessaire pour faire fonctionner le compresseur du système est fonction du COP. Celui-ci se calcul différemment pour ces deux applications, tel que voici :

Pour le chauffage :

$$COP = \frac{\text{Chaleur fournie (W)}}{\text{Énergie consommée (W)}} = \frac{\text{Énergie sol} + \text{Énergie compresseur}}{\text{Énergie compresseur}}$$

$$\text{Donc, Énergie compresseur} = \frac{\text{Énergie sol}}{COP - 1}$$

Pour la climatisation :

$$COP = \frac{\text{Fraîcheur fournie (W)}}{\text{Énergie consommée (W)}} = \frac{\text{Énergie sol} - \text{Énergie compresseur}}{\text{Énergie compresseur}}$$

$$\text{Donc, Énergie compresseur} = \frac{\text{Énergie sol}}{COP + 1}$$

De plus, une perte d'énergie liée à perte de charge de pompage a été considérée, c'est-à-dire à la différence de hauteur entre le niveau de l'eau de la fosse et la pompe. Pour ces calculs, la position de la pompe a été déterminée à une distance de 80 m par rapport au niveau de l'eau.

$$\dot{E}_{pompe} = D \times \rho \times g \times h$$

où,

D ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) est le taux d'extraction du fluide ou le débit de pompage,

ρ (kg m^{-3}) est la masse volumique de l'eau ($1\,000 \text{ kg m}^{-3}$),

g (m s^{-2}) est l'accélération gravitationnelle ($9,80665 \text{ m s}^{-2}$),

h (m) est la perte de charge ou la hauteur.

Cette perte de charge doit être soustraite à l'énergie du sol (de l'eau de la fosse) dans le calcul d'efficacité énergétique.

Ainsi, le **Tableau 9** montre le résultat des calculs pour la capacité de génération d'énergie géothermique selon les trois modes d'application énergétique pour chacune des mines. La capacité d'exploitation en fonction des bâtiments-types est présentée au **Tableau 10**.

Tableau 9. Capacité de génération d'énergie géothermique pour les trois modes d'application.

MINE KING-BEAVER			
Paramètres	Chauffage	Free-cooling	Climatisation
Puissance thermique global (MW)	0,402	0,775	1,910
Taux de pompage maximum (m ³ s ⁻¹)	0,034	0,030	0,030
Taux de pompage maximum (USgal min ⁻¹)	544	473	476
Coefficient de performance (COP)	3,29	–	4,30
Puissance nécessaire du compresseur (MW)	0,175	–	0,360
Perte de charge de la pompe (MW)	-0,027	-0,023	-0,024
Puissance totale (MW)	0,577	0,775	1,549
Taux d'efficacité (%)	65	97	122
Énergie totale (MW h)	5 056	6 786	13 572

MINE BRITISH-CANADIAN			
Paramètres	Chauffage	Free-cooling	Climatisation
Puissance thermique global (MW)	0,465	1,324	3,051
Taux de pompage maximum (m ³ s ⁻¹)	0,056	0,045	0,044
Taux de pompage maximum (USgal min ⁻¹)	880	717	693
Coefficient de performance (COP)	3,29	–	4,30
Puissance nécessaire du compresseur (MW)	0,203	–	0,576
Perte de charge de la pompe (MW)	-0,044	-0,035	-0,034
Puissance totale (MW)	0,667	1,324	2,475
Taux d'efficacité (%)	63	97	122
Énergie totale (MW h)	5 846	11 602	21 680

MINE JOHNSON			
Paramètres	Chauffage	Free-cooling	Climatisation
Puissance thermique global (MW)	0,207	–	0,150
Taux de pompage maximum (m ³ s ⁻¹)	0,008	–	0,003
Taux de pompage maximum (USgal min ⁻¹)	125	–	48
Coefficient de performance (COP)	3,29	–	4,30
Puissance nécessaire du compresseur (MW)	0,091	–	0,028
Perte de charge de la pompe (MW)	-0,040	–	-0,016
Puissance totale (MW)	0,298	–	0,121
Taux d'efficacité (%)	56	–	110
Énergie totale (MW h)	2 611	–	1 063

Tableau 10. Capacité de génération d'énergie géothermique pour les trois types de bâtiments.

MINE KING-BEAVER

Applications	Énergie totale (MW h)	Types de bâtiment	Superficie (ha)	Demande (MW h)	Nombre d'unité	Superficie totale (ha)
Chauffage	5 056	2 usines	1,859	2 531	2,0	3,714
Free-cooling	6 786	Serre cannabis	1,000	2 536	2,7	2,676
		Centre de données	0,093	8 293	0,8	0,076
Climatisation	13 572	Serre cannabis	1,000	2 536	5,4	5,352
		Centre de données	0,093	8 293	1,6	0,152

MINE BRITISH-CANADIAN

Applications	Énergie totale (MW h)	Types de bâtiment	Superficie (ha)	Demande (MW h)	Nombre d'unité	Superficie totale (ha)
Chauffage	5 846	2 usines	1,859	2 531	2,3	4,295
Free-cooling	11 602	Serre cannabis	1,000	2 536	4,6	4,576
		Centre de données	0,093	8 293	1,4	0,130
Climatisation	21 680	Serre cannabis	1,000	2 536	8,6	8,550
		Centre de données	0,093	8 293	2,6	0,243

MINE JOHNSON

Applications	Énergie totale (MW h)	Types de bâtiment	Superficie (ha)	Demande (MW h)	Nombre d'unité	Superficie totale (ha)
Chauffage	2 611	2 usines	1,859	2 531	1,0	1,918
Free-cooling	-	Serre cannabis	1,000	-	-	-
		Centre de données	0,093	-	-	-
Climatisation	1 063	Serre cannabis	1,000	2 536	0,4	0,419
		Centre de données	0,093	8 293	0,1	0,012

7. Conclusion

Le but de la présente étude était de déterminer si les grands volumes d'eau formés par les mines à ciel ouvert King-Beaver et maintenant inactives, contiennent suffisamment d'énergie pouvant éventuellement être extraite par un système de pompes à chaleur géothermique pour chauffer ou climatiser trois types de bâtiments : 2 usines (200' x 500' chacune), une serre de cannabis (1 ha) ainsi qu'un centre de données (100' x 100'). L'utilisation directe pour fin de climatisation, par la méthode du *free-cooling*, a également été évaluée. Le même exercice a aussi été tenté pour la mine souterraine Johnson. Voici un bilan des résultats, ainsi que des recommandations pour des travaux futurs.

7.1 Bilan des résultats

- L'eau des trois mines montre un risque faible en entartrage et un potentiel nul en ce qui a trait à la corrosion.
- Les profils de température enregistrés sur toute la colonne d'eau des mines à ciel ouvert indiquent une température constante d'environ 4 à 5 °C à partir de 25 m de profondeur, soit sous la couche superficielle influencée par les variations saisonnières en surface.
- Les trois mines possèdent chacune une capacité d'énergie suffisante pour alimenter les besoins en chauffage annuels d'au moins une unité de 2 usines.
- Les mines à ciel ouvert apparaissent particulièrement intéressantes pour des applications liées à la climatisation, montrant une capacité 3 fois plus élevée qu'en chauffage, ce qui serait suffisant pour alimenter jusqu'à 1-2 centres de données par mine.
- L'énergie fournie en *free-cooling* par les mines à ciel ouvert serait aussi suffisante pour alimenter 2-4 serres de cannabis ou un centre de données.
- Le potentiel de climatisation de la mine souterraine Johnson est toutefois plus faible et le *free-cooling* n'est pas envisageable, car la température de l'eau et du roc, respectivement d'environ 8 et 13 °C, est plus élevée.
- La méthodologie du calcul de bilan thermique tient essentiellement compte de la masse thermique de l'eau et de la roche encaissante, ce qui demeure une simplification. Un calcul plus représentatif axé sur les mécanismes de transfert thermique impliquant l'advection donnerait ainsi une estimation plus élevée. De plus, le potentiel de recharge de la température de l'eau a été négligé, c'est-à-dire lorsque le chauffage ou la climatisation ne sont pas opérationnels au cours d'une période de l'année. Ces paramètres seraient plus complexes à implémenter et vont au-delà de ce mandat.

7.2 Recommandations

À court terme

- Enregistrer un profil de température durant la période hivernale afin de confirmer que la température de l'eau des mines à ciel ouvert demeure constante sous 25 m de profondeur.
- Afin de raffiner cette évaluation et de mieux illustrer le potentiel géothermique de l'eau des mines, des simulations numériques pourraient être réalisées avec un modèle géologique 3D et ainsi mieux comprendre l'interaction des différents paramètres du système.
- Une modélisation géochimique pourrait être exécutée dans le but de simuler la précipitation de CaCO₃ et d'ainsi configurer le système d'une manière optimale pour anticiper les risques d'entartrage.

- Simuler l'extraction des besoins énergétiques de chacun des bâtiments en intégrant les variations de température saisonnière pour évaluer l'impact sur la performance du système

À moyen terme

- Réaliser des essais en laboratoire sur des échantillons d'eau des mines afin d'évaluer le risque de précipitation et de colmatage du système.
- Faire un suivi de l'opération d'un système de pompes à chaleur lorsque les premiers développements d'un projet seront réalisés.

8. Bibliographie

- Al-Habaibeha, A., Athresha, A.P., Parker, K., 2018. **Performance analysis of using mine water from an abandoned coal mine for heating of buildings using an open loop based single shaft GSHP system.** Applied Energy 21(1): 393-402.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.025>
- Arrakis, 2011. **Valorisation des résidus de chrysotile - Étude hydrogéologique.** Rapport H497-02A. Réalisé pour Société Asbestos Limitée. 44 pages et 6 annexes.
- Beck, A.E., 1977. **Climatically perturbed temperature gradients and their effect on regional and continental heat-flow means.** Tectonophysics 41(1-3): 17-39.
[https://doi.org/10.1016/0040-1951\(77\)90178-0](https://doi.org/10.1016/0040-1951(77)90178-0)
- Gouvernement du Canada, 2019. **Données des stations pour le calcul des normales climatiques de Thetford Mines de 1981 à 2010.** <https://bit.ly/2wsajn2> (Consulté le 21 mars 2019).
- Hall, A., Scott, J.A., Shang, H., 2011. **Geothermal energy recovery from underground mines.** Renewable and Sustainable Energy Reviews 15(2): 916-924.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.007>
- Loredo, C., Roqueñí, N. et Ordóñez, A., 2016. **Modelling flow and heat transfer in flooded mines for geothermal energy use: A review.** International Journal of Coal Geology 164: 115-122.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.coal.2016.04.013>
- Missener, A.D., Thompson, L.G.D. et Uffen, R.J., 1951. **Terrestrial heat flow in Ontario and Quebec.** Transactions of the American Geophysical Union 32: 729-738.
<https://doi.org/10.1029/TR032i005p00729>
- Ogbonnaya, S.K. et Ajayi, O.O., 2017. **Fouling phenomenon and its effect on heat exchanger: A review.** Frontiers in Heat and Mass Transfer 9: 31.
<http://dx.doi.org/10.5098/hmt.9.31>
- Ouzzane, M., Eslami-Nejad, P., Badache, B., Aidoun, Z., 2015. **New correlations for the prediction of the undisturbed ground temperature.** Geothermics 53: 379–384.
<https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.08.001>
- Peralta Ramos, E., Breede, K et Falcone, G., 2015. **Geothermal heat recovery from abandoned mines: a systematic review of projects implemented worldwide and a methodology for screening new projects.** Environmental Earth Sciences 73(11): 6783–6795.
<https://doi.org/10.1007/s12665-015-4285-y>
- Preene, M. et Younger, P.L., 2014. **Can you take the heat? – Geothermal energy in mining.** Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Technology 123(2): 107-118.
<https://doi.org/10.1179/1743286314Y.0000000058>

Slivitzky, A. et St-Julien, P, 1987. **Compilation géologique de la région de l'Estrie-Beauce.**
Gouvernement du Québec. Ministère de l'Énergie et des Ressources, MM 85-04: 40 p.
<http://gq.mines.gouv.qc.ca/documents/EXAMINE/MM8504/>

Annexe 1 - Résultats des analyses d'eau pour les bactéries du fer.

CERTIFICAT D'ANALYSES OFFICIEL

INRS
Félix-Antoine Comeau
490, rue de la Couronne
Québec, Québec
G1K 9A9
Tél.: 418.654.2652

Certificat : **2099977**
Demande d'analyse : NA
Date du rapport: 2018-08-15
Projet client : Analyse d'eau
Bon de commande : NA
Chargé de projets : Nadia Guérard : 1-877-977-1220
Adresse courriel : nadiaguerard@labenvironex.com

Données sur le prélèvement

Échantillon Environex : 3728638

Identification client : BC3

Nature : Eau de surface

Nom du préleveur : Félix-Antoine Comeau

Date de prélèvement: 2018-08-14

Date de réception: 2018-08-14

Lieu du prélèvement : Voir Référence

Info. supplémentaires : NA

Chlore résiduel libre : NA

Chlore résiduel total : NA

Chloramine : NA

Résultat pH : NA

Paramètres	Accr. *	Méthode Interne	Résultats	Unités	Date d'analyse	Laboratoire
Bactéries du fer- Dénombrement et identification	Non	ENVX-MBIO-16			2018-08-15	QC
Résultat			Absence			

Commentaires de l'échantillon Température à la réception : 14.5°C

Microbiologie (bactéries du fer) : Limite de détection de la méthode : < 200 cell/mL

Accr. * : Accréditation du MDDELCC -- NA : Non-Applicable -- TNI: Colonies trop nombreuses pour être identifiées -- TNC : Colonies trop nombreuses pour être comptées ■ = Hors critères

Laboratoire traitant : QC : Québec; LG : Longueuil; SH : Sherbrooke; ST : Sous-traitance externe / Méthode interne : CHM ou MBIO (méthodes QC) ; ILCE ou ILME (méthodes LG)

À moins d'une demande explicite du client, les échantillons d'analyse chimiques seront entreposés au maximum 21 jours après l'émission du certificat pour les paramètres dont le délai analytique le permet.

Ce certificat ne peut être reproduit, sinon en entier, sans l'autorisation écrite du laboratoire. Résultats applicables qu'aux échantillons soumis à l'analyse.

Tous les résultats d'analyse provenant de matrice solide sont calculés sur une base sèche, à moins d'avis contraires.

CERTIFICAT D'ANALYSES OFFICIEL

INRS
Félix-Antoine Comeau
490, rue de la Couronne
Québec, Québec
G1K 9A9
Tél.: 418.654.2652

Certificat : **2099977**
Demande d'analyse : NA
Date du rapport: 2018-08-15
Projet client : Analyse d'eau
Bon de commande : NA
Chargé de projets : Nadia Guérard : 1-877-977-1220
Adresse courriel : nadiaguerard@labenvironex.com

Données sur le prélèvement

Échantillon Environex :	3728639	
Identification client :	Johnson 2	Chlore résiduel libre : NA
Nature :	Eau de surface	Chlore résiduel total : NA
Nom du préleveur :	Félix-Antoine Comeau	Chloramine : NA
Date de prélèvement:	2018-08-13	Résultat pH : NA
Date de réception:	2018-08-14	
Lieu du prélèvement :	Voir Référence	
Info. supplémentaires :	NA	

Paramètres	Accr. *	Méthode Interne	Résultats	Unités	Date d'analyse	Laboratoire
Bactéries du fer- Dénombrement et identification	Non	ENVX-MBIO-16			2018-08-15	QC
Résultat			Absence			

Commentaires de l'échantillon Température à la réception : 13.5°C

Microbiologie (bactéries du fer) : Limite de détection de la méthode : < 200 cell/mL

Accr. * : Accréditation du MDDELCC -- NA : Non-Applicable -- TNI: Colonies trop nombreuses pour être identifiées -- TNC : Colonies trop nombreuses pour être comptées ■ = Hors critères
Laboratoire traitant : QC : Québec; LG : Longueuil; SH : Sherbrooke; ST : Sous-traitance externe / Méthode interne : CHM ou MBIO (méthodes QC) ; ILCE ou ILME (méthodes LG)

À moins d'une demande explicite du client, les échantillons d'analyse chimiques seront entreposés au maximum 21 jours après l'émission du certificat pour les paramètres dont le délai analytique le permet.

Ce certificat ne peut être reproduit, sinon en entier, sans l'autorisation écrite du laboratoire. Résultats applicables qu'aux échantillons soumis à l'analyse.

Tous les résultats d'analyse provenant de matrice solide sont calculés sur une base sèche, à moins d'avis contraires.

CONFIDENTIEL

Page 2 de 9

CERTIFICAT D'ANALYSES OFFICIEL

INRS
Félix-Antoine Comeau
490, rue de la Couronne
Québec, Québec
G1K 9A9
Tél.: 418.654.2652

Certificat : **2099977**
Demande d'analyse : NA
Date du rapport: 2018-08-15
Projet client : Analyse d'eau
Bon de commande : NA
Chargé de projets : Nadia Guérard : 1-877-977-1220
Adresse courriel : nadiaguerard@labenvironex.com

Données sur le prélèvement

Échantillon Environex :	3728640		
Identification client :	King Beaver 2		
Nature :	Eau de surface	Chlore résiduel libre :	NA
Nom du préleveur :	Félix-Antoine Comeau	Chlore résiduel total :	NA
Date de prélèvement:	2018-08-14	Chloramine :	NA
Date de réception:	2018-08-14	Résultat pH :	NA
Lieu du prélèvement :	Voir Référence		
Info. supplémentaires :	NA		

Paramètres	Accr. *	Méthode Interne	Résultats	Unités	Date d'analyse	Laboratoire
Bactéries du fer- Dénombrement et identification	Non	ENVX-MBIO-16			2018-08-15	QC
Résultat			Absence			

Commentaires de l'échantillon Température à la réception : 22.0°C

Microbiologie (bactéries du fer) : Limite de détection de la méthode : < 200 cell/mL

Accr. * : Accréditation du MDDELCC -- NA : Non-Applicable -- TNI: Colonies trop nombreuses pour être identifiées -- TNC : Colonies trop nombreuses pour être comptées ■ = Hors critères
Laboratoire traitant : QC : Québec; LG : Longueuil; SH : Sherbrooke; ST : Sous-traitance externe / Méthode interne : CHM ou MBIO (méthodes QC) ; ILCE ou ILME (méthodes LG)

À moins d'une demande explicite du client, les échantillons d'analyse chimiques seront entreposés au maximum 21 jours après l'émission du certificat pour les paramètres dont le délai analytique le permet.

Ce certificat ne peut être reproduit, sinon en entier, sans l'autorisation écrite du laboratoire. Résultats applicables qu'aux échantillons soumis à l'analyse.

Tous les résultats d'analyse provenant de matrice solide sont calculés sur une base sèche, à moins d'avis contraires.

CONFIDENTIEL

Page 3 de 9

CERTIFICAT D'ANALYSES OFFICIEL

INRS
Félix-Antoine Comeau
490, rue de la Couronne
Québec, Québec
G1K 9A9
Tél.: 418.654.2652

Certificat : **2099977**
Demande d'analyse : NA
Date du rapport: 2018-08-15
Projet client : Analyse d'eau
Bon de commande : NA
Chargé de projets : Nadia Guérard : 1-877-977-1220
Adresse courriel : nadiaguerard@labenvironex.com

Données sur le prélèvement

Échantillon Environex : 3728641
Identification client : King-Beaver 3
Nature : Eau de surface
Nom du préleveur : F.A. Comeau
Date de prélèvement: 2018-08-14
Date de réception: 2018-08-14
Lieu du prélèvement : Voir Référence
Info. supplémentaires : NA

Chlore résiduel libre : NA
Chlore résiduel total : NA
Chloramine : NA
Résultat pH : NA

Paramètres	Accr. *	Méthode Interne	Résultats	Unités	Date d'analyse	Laboratoire
Bactéries du fer- Dénombrement et identification	Non	ENVX-MBIO-16			2018-08-15	QC
Résultat			Absence			

Commentaires de l'échantillon Température à la réception : 20.5°C

Microbiologie (bactéries du fer) : Limite de détection de la méthode : < 200 cell/mL

Accr. * : Accréditation du MDDELCC -- NA : Non-Applicable -- TNI: Colonies trop nombreuses pour être identifiées -- TNC : Colonies trop nombreuses pour être comptées ■ = Hors critères
Laboratoire traitant : QC : Québec; LG : Longueuil; SH : Sherbrooke; ST : Sous-traitance externe / Méthode interne : CHM ou MBIO (méthodes QC) ; ILCE ou ILME (méthodes LG)

À moins d'une demande explicite du client, les échantillons d'analyse chimiques seront entreposés au maximum 21 jours après l'émission du certificat pour les paramètres dont le délai analytique le permet.

Ce certificat ne peut être reproduit, sinon en entier, sans l'autorisation écrite du laboratoire. Résultats applicables qu'aux échantillons soumis à l'analyse.

Tous les résultats d'analyse provenant de matrice solide sont calculés sur une base sèche, à moins d'avis contraires.

CONFIDENTIEL

Page 4 de 9

CERTIFICAT D'ANALYSES OFFICIEL

INRS
Félix-Antoine Comeau
490, rue de la Couronne
Québec, Québec
G1K 9A9
Tél.: 418.654.2652

Certificat : **2099977**
Demande d'analyse : NA
Date du rapport: 2018-08-15
Projet client : Analyse d'eau
Bon de commande : NA
Chargé de projets : Nadia Guérard : 1-877-977-1220
Adresse courriel : nadiaguerard@labenvironex.com

Données sur le prélèvement

Échantillon Environex :	3728642		
Identification client :	King- Beaver 1		Chlore résiduel libre : NA
Nature :	Eau de surface		Chlore résiduel total : NA
Nom du préleveur :	Félix-Antoine Comeau		Chloramine : NA
Date de prélèvement:	2018-08-14		Résultat pH : NA
Date de réception:	2018-08-14		
Lieu du prélèvement :	Voir Référence		
Info. supplémentaires :	NA		

Paramètres	Accr. *	Méthode Interne	Résultats	Unités	Date d'analyse	Laboratoire
Bactéries du fer- Dénombrement et identification	Non	ENVX-MBIO-16			2018-08-15	QC
Résultat			Absence			

Commentaires de l'échantillon Température à la réception : 23.0°C

Microbiologie (bactéries du fer) : Limite de détection de la méthode : < 200 cell/mL

Accr. * : Accréditation du MDDELCC -- NA : Non-Applicable -- TNI: Colonies trop nombreuses pour être identifiées -- TNC : Colonies trop nombreuses pour être comptées ■ = Hors critères
Laboratoire traitant : QC : Québec; LG : Longueuil; SH : Sherbrooke; ST : Sous-traitance externe / Méthode interne : CHM ou MBIO (méthodes QC) ; ILCE ou ILME (méthodes LG)

À moins d'une demande explicite du client, les échantillons d'analyse chimiques seront entreposés au maximum 21 jours après l'émission du certificat pour les paramètres dont le délai analytique le permet.

Ce certificat ne peut être reproduit, sinon en entier, sans l'autorisation écrite du laboratoire. Résultats applicables qu'aux échantillons soumis à l'analyse.

Tous les résultats d'analyse provenant de matrice solide sont calculés sur une base sèche, à moins d'avis contraires.

CERTIFICAT D'ANALYSES OFFICIEL

INRS
Félix-Antoine Comeau
490, rue de la Couronne
Québec, Québec
G1K 9A9
Tél.: 418.654.2652

Certificat : **2099977**
Demande d'analyse : NA
Date du rapport: 2018-08-15
Projet client : Analyse d'eau
Bon de commande : NA
Chargé de projets : Nadia Guérard : 1-877-977-1220
Adresse courriel : nadiaguerard@labenvironex.com

Données sur le prélèvement

Échantillon Environex : 3728643

Identification client : BC2

Nature : Eau de surface

Nom du préleveur : Félix-Antoine Comeau

Date de prélèvement: 2018-08-14

Date de réception: 2018-08-14

Lieu du prélèvement : Voir Référence

Info. supplémentaires : NA

Chlore résiduel libre : NA

Chlore résiduel total : NA

Chloramine : NA

Résultat pH : NA

Paramètres	Accr. *	Méthode Interne	Résultats	Unités	Date d'analyse	Laboratoire
Bactéries du fer- Dénombrement et identification	Non	ENVX-MBIO-16			2018-08-15	QC
Résultat			Absence			

Commentaires de l'échantillon Température à la réception : 17.0°C

Microbiologie (bactéries du fer) : Limite de détection de la méthode : < 200 cell/mL

Accr. * : Accréditation du MDDELCC -- NA : Non-Applicable -- TNI: Colonies trop nombreuses pour être identifiées -- TNC : Colonies trop nombreuses pour être comptées ■ = Hors critères

Laboratoire traitant : QC : Québec; LG : Longueuil; SH : Sherbrooke; ST : Sous-traitance externe / Méthode interne : CHM ou MBIO (méthodes QC) ; ILCE ou ILME (méthodes LG)

À moins d'une demande explicite du client, les échantillons d'analyse chimiques seront entreposés au maximum 21 jours après l'émission du certificat pour les paramètres dont le délai analytique le permet.

Ce certificat ne peut être reproduit, sinon en entier, sans l'autorisation écrite du laboratoire. Résultats applicables qu'aux échantillons soumis à l'analyse.

Tous les résultats d'analyse provenant de matrice solide sont calculés sur une base sèche, à moins d'avis contraires.

CONFIDENTIEL

Page 6 de 9

CERTIFICAT D'ANALYSES OFFICIEL

INRS
Félix-Antoine Comeau
490, rue de la Couronne
Québec, Québec
G1K 9A9
Tél.: 418.654.2652

Certificat : **2099977**
Demande d'analyse : NA
Date du rapport: 2018-08-15
Projet client : Analyse d'eau
Bon de commande : NA
Chargé de projets : Nadia Guérard : 1-877-977-1220
Adresse courriel : nadiaguerard@labenvironex.com

Données sur le prélèvement

Échantillon Environex : 3728644

Identification client : BC1

Nature : Eau de surface

Nom du préleveur : Félix-Antoine Comeau

Date de prélèvement: 2018-08-14

Date de réception: 2018-08-14

Lieu du prélèvement : Voir Référence

Info. supplémentaires : NA

Chlore résiduel libre : NA

Chlore résiduel total : NA

Chloramine : NA

Résultat pH : NA

Paramètres	Accr. *	Méthode Interne	Résultats	Unités	Date d'analyse	Laboratoire
Bactéries du fer- Dénombrement et identification	Non	ENVX-MBIO-16			2018-08-15	QC
Résultat			Absence			

Commentaires de l'échantillon Température à la réception : 19.0°C

Microbiologie (bactéries du fer) : Limite de détection de la méthode : < 200 cell/mL

Accr. * : Accréditation du MDDELCC -- NA : Non-Applicable -- TNI: Colonies trop nombreuses pour être identifiées -- TNC : Colonies trop nombreuses pour être comptées ■ = Hors critères

Laboratoire traitant : QC : Québec; LG : Longueuil; SH : Sherbrooke; ST : Sous-traitance externe / Méthode interne : CHM ou MBIO (méthodes QC) ; ILCE ou ILME (méthodes LG)

À moins d'une demande explicite du client, les échantillons d'analyse chimiques seront entreposés au maximum 21 jours après l'émission du certificat pour les paramètres dont le délai analytique le permet.

Ce certificat ne peut être reproduit, sinon en entier, sans l'autorisation écrite du laboratoire. Résultats applicables qu'aux échantillons soumis à l'analyse.

Tous les résultats d'analyse provenant de matrice solide sont calculés sur une base sèche, à moins d'avis contraires.

CERTIFICAT D'ANALYSES OFFICIEL

INRS
Félix-Antoine Comeau
490, rue de la Couronne
Québec, Québec
G1K 9A9
Tél.: 418.654.2652

Certificat : **2099977**
Demande d'analyse : NA
Date du rapport: 2018-08-15
Projet client : Analyse d'eau
Bon de commande : NA
Chargé de projets : Nadia Guérard : 1-877-977-1220
Adresse courriel : nadiaguerard@labenvironex.com

Données sur le prélèvement

Échantillon Environex : 3728645

Identification client :

Nature : Eau de surface

Nom du préleveur : Félix-Antoine Comeau

Date de prélèvement: 2018-08-14

Date de réception: 2018-08-14

Lieu du prélèvement : Johnson 3

Info. supplémentaires : NA

Chlore résiduel libre : NA

Chlore résiduel total : NA

Chloramine : NA

Résultat pH : NA

Paramètres	Accr. *	Méthode Interne	Résultats	Unités	Date d'analyse	Laboratoire
Bactéries du fer- Dénombrement et identification	Non	ENVX-MBIO-16			2018-08-15	QC
Résultat			Absence			

Commentaires de l'échantillon Température à la réception : 16.5°C

Microbiologie (bactéries du fer) : Limite de détection de la méthode : < 200 cell/mL

Accr. * : Accréditation du MDDELCC -- NA : Non-Applicable -- TNI: Colonies trop nombreuses pour être identifiées -- TNC : Colonies trop nombreuses pour être comptées ■ = Hors critères

Laboratoire traitant : QC : Québec; LG : Longueuil; SH : Sherbrooke; ST : Sous-traitance externe / Méthode interne : CHM ou MBIO (méthodes QC) ; ILCE ou ILME (méthodes LG)

À moins d'une demande explicite du client, les échantillons d'analyse chimiques seront entreposés au maximum 21 jours après l'émission du certificat pour les paramètres dont le délai analytique le permet.

Ce certificat ne peut être reproduit, sinon en entier, sans l'autorisation écrite du laboratoire. Résultats applicables qu'aux échantillons soumis à l'analyse.

Tous les résultats d'analyse provenant de matrice solide sont calculés sur une base sèche, à moins d'avis contraires.

CONFIDENTIEL

Page 8 de 9

CERTIFICAT D'ANALYSES OFFICIEL

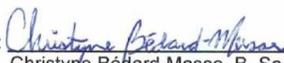
INRS
Félix-Antoine Comeau
490, rue de la Couronne
Québec, Québec
G1K 9A9
Tél.: 418.654.2652

Certificat : **2099977**
Demande d'analyse : NA
Date du rapport: 2018-08-15
Projet client : Analyse d'eau
Bon de commande : NA
Chargé de projets : Nadia Guérard : 1-877-977-1220
Adresse courriel : nadiaguerard@labenvironeX.com

Données sur le prélèvement

Échantillon EnvironeX : 3728645

Commentaires du certificat :

Approuvé par : 
Christyne Bédard-Masse, B. Sc.
Microbiologiste, Site de Québec



Accr. * : Accréditation du MDDELCC -- NA : Non-Applicable -- TNI: Colonies trop nombreuses pour être identifiées -- TNC : Colonies trop nombreuses pour être comptées  = Hors critères
Laboratoire traitant : QC : Québec; LG : Longueuil; SH : Sherbrooke; ST : Sous-traitance externe / Méthode interne : CHM ou MBIO (méthodes QC) ; ILCE ou ILME (méthodes LG)

À moins d'une demande explicite du client, les échantillons d'analyse chimiques seront entreposés au maximum 21 jours après l'émission du certificat pour les paramètres dont le délai analytique le permet.

Ce certificat ne peut être reproduit, sinon en entier, sans l'autorisation écrite du laboratoire. Résultats applicables qu'aux échantillons soumis à l'analyse.

Tous les résultats d'analyse provenant de matrice solide sont calculés sur une base sèche, à moins d'avis contraires.

CONFIDENTIEL

Page 9 de 9

CERTIFICAT D'ANALYSES OFFICIEL

INRS
Félix-Antoine Comeau
490, rue de la Couronne
Québec, Québec
G1K 9A9
Tél.: 418.654.2652

Certificat : **2099927**
Demande d'analyse : NA
Date du rapport: 2018-08-15
Projet client : Analyse d'eau
Bon de commande : NA
Chargé de projets : Nadia Guérard : 1-877-977-1220
Adresse courriel : nadiaguerard@labenvironex.com

Données sur le prélèvement

Échantillon Environex :	3728637		
Identification client :	Johnson 1		Chlore résiduel libre : NA
Nature :	Eau de surface		Chlore résiduel total : NA
Nom du préleveur :	Félix-Antoine Comeau		Chloramine : NA
Date de prélèvement:	2018-08-14		Résultat pH : NA
Date de réception:	2018-08-14		
Lieu du prélèvement :	Voir Référence		
Info. supplémentaires :	NA		

Paramètres	Accr. *	Méthode Interne	Résultats	Unités	Date d'analyse	Laboratoire
Bactéries du fer- Dénombrement et identification	Non	ENVX-MBIO-16			2018-08-15	QC
Résultat			Absence			

Commentaires de l'échantillon Température à la réception : 9.5 °C

Microbiologie (bactéries du fer) : Limite de détection de la méthode : < 200 cell/mL

Accr. * : Accréditation du MDDELCC -- NA : Non-Applicable -- TNI: Colonies trop nombreuses pour être identifiées -- TNC : Colonies trop nombreuses pour être comptées ■ = Hors critères
Laboratoire traitant : QC : Québec; LG : Longueuil; SH : Sherbrooke; ST : Sous-traitance externe / Méthode interne : CHM ou MBIO (méthodes QC) ; ILCE ou ILME (méthodes LG)

À moins d'une demande explicite du client, les échantillons d'analyse chimiques seront entreposés au maximum 21 jours après l'émission du certificat pour les paramètres dont le délai analytique le permet.

Ce certificat ne peut être reproduit, sinon en entier, sans l'autorisation écrite du laboratoire. Résultats applicables qu'aux échantillons soumis à l'analyse.

Tous les résultats d'analyse provenant de matrice solide sont calculés sur une base sèche, à moins d'avis contraires.

CONFIDENTIEL

Page 1 de 2



GROUPE

Environex

Emblème de qualité de vie

4495, boul. Wilfrid-Hamel, suite 150, Québec (Québec) G1P 2J7 418 977.1220

2350, chemin du Lac, Longueuil (Québec) J4N 1G8 514 332.6001

3705, boul. Industriel, Sherbrooke (Québec) J1L 1X8 819 481.1469

Sans frais : 1 877 977 1220 labEnvironex.com

CERTIFICAT D'ANALYSES OFFICIEL

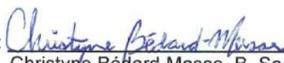
INRS
Félix-Antoine Comeau
490, rue de la Couronne
Québec, Québec
G1K 9A9
Tél.: 418.654.2652

Certificat : **2099927**
Demande d'analyse : NA
Date du rapport: 2018-08-15
Projet client : Analyse d'eau
Bon de commande : NA
Chargé de projets : Nadia Guérard : 1-877-977-1220
Adresse courriel : nadiaguerard@labenvironex.com

Données sur le prélèvement

Échantillon Environex : 3728637

Commentaires du certificat :

Approuvé par : 
Christyne Bédard-Masse, B. Sc.
Microbiologiste, Site de Québec



Accr. * : Accréditation du MDDELCC -- NA : Non-Applicable -- TNI: Colonies trop nombreuses pour être identifiées -- TNC : Colonies trop nombreuses pour être comptées [] = Hors critères
Laboratoire traitant : QC : Québec; LG : Longueuil; SH : Sherbrooke; ST : Sous-traitance externe / Méthode interne : CHM ou MBIO (méthodes QC) ; ILCE ou ILME (méthodes LG)

À moins d'une demande explicite du client, les échantillons d'analyse chimiques seront entreposés au maximum 21 jours après l'émission du certificat pour les paramètres dont le délai analytique le permet.

Ce certificat ne peut être reproduit, sinon en entier, sans l'autorisation écrite du laboratoire. Résultats applicables qu'aux échantillons soumis à l'analyse.

Tous les résultats d'analyse provenant de matrice solide sont calculés sur une base sèche, à moins d'avis contraires.

CONFIDENTIEL

Page 2 de 2

Annexe 2 - Résultats des analyses d'eau pour les éléments et paramètre physico-chimiques.

Service des laboratoires

Analyses métaux: Jean-François Dutil
Analyses anions: Julie Perreault
Analyses CIT: Jean-François Dutil
Analyses Conductivité: Philippe Girard
Analyses Alcalinité, pH: Philippe Girard

Instrument: ICP-AES Agilent 5110 Dual View
Instrument: Chromatographe ionique Thermo Integriom
Instrument: Shimadzu VCPH
Instrument: Conductivimètre
Instrument: pH mètre

Vérification: Lise Rancourt, chimiste

		Br (mg/L)	Cl (mg/L)	Cl- (meq/L)	F (mg/L)	NO2 (mg/L)	NO3 (mg/L)	SO42- (mg/L)	SO42- (meq/L)	NO2 (mgN/L)	NO3 (mgN/L)
#Labo	<i>Limite détection</i>	0,005	0,005		0,003	0,003	0,01	0,005		0,0009	0,002
	<i>Limite incluant dilution A</i>		0,05	0,0014				0,05			
18-04975	1	0,249	99	2,79	0,079	0,054	6,5	8,5	0,178	0,017	1,46
18-04976	2	0,248	99	2,80	0,138	0,056	6,5	8,6	0,179	0,017	1,46
18-04977	3	0,262	98	2,77	0,087	0,057	6,4	8,6	0,178	0,017	1,45
18-04978	4	0,159	37	1,04	0,203	0,063	9,2	8,2	0,172	0,019	2,08
18-04979	5	0,162	37	1,03	0,049	0,062	9,3	8,3	0,172	0,019	2,09
18-04980	6	0,162	36	1,03	0,061	0,064	9,3	8,3	0,172	0,019	2,10
18-04981	7	0,065	63	1,77	0,105	< 0.003	0,62	103	2,14	< 0.0009	0,14
18-04982	8	0,057	64	1,79	0,082	< 0.003	0,62	104	2,16	< 0.0009	0,14
18-04983	9	0,084	63	1,79	0,088	< 0.003	0,66	104	2,16	< 0.0009	0,15
18-04984	Blanc 1	< 0.005	0,013		0,011	< 0.003	0,131	0,007		< 0.0009	0,03
18-04985	Blanc 2	< 0.005	0,022		0,027	< 0.003	0,136	0,009		< 0.0009	0,03

Le CIT est majoritairement sous forme HCO₃⁻ car le pH est entre 7 et 9.3

CIT (mg C/L)	HCO ₃ ⁻ (meq/L)	pH	Conductivité (μS/cm)	Alcalinité (mg/L CaCO ₃)	Dureté totale (mg/L CaCO ₃)	Al (mg/L)	As (mg/L)	B (mg/L)	Ba (mg/L)	Ca (mg/L)	Ca (mg/L CaCO ₃)	Co (mg/L)
0,05				1		0,0007	0,008	0,001	0,0002	0,006		0,0003
39,4	3,28	8,85	631	187	198	0,0044	< 0.008	0,254	0,0064	3,59	8,97	< 0.0003
39,6	3,30	8,87	660	190	197	0,0062	< 0.008	0,253	0,0074	3,63	9,07	< 0.0003
39,5	3,29	8,87	635	190	197	0,0051	< 0.008	0,252	0,0071	3,56	8,89	< 0.0003
75,8	6,32	9,16	670	400	437	0,0068	< 0.008	0,026	0,0083	1,8	4,50	< 0.0003
76,2	6,35	9,26	680	400	437	0,0036	< 0.008	0,026	0,0039	1,77	4,42	0,0003
76,9	6,41	9,25	693	400	437	0,0049	< 0.008	0,026	0,005	1,72	4,30	0,0006
105	8,75	7,7	1077	445	572	0,0163	0,191	0,033	0,0157	57,7	144	0,0011
106	8,83	7,72	1105	445	573	0,0152	0,195	0,033	0,0156	58	145	0,0013
106	8,83	7,75	1145	445	568	0,016	0,196	0,034	0,0157	57,5	144	0,0011
< 0.05		5,43	0,87	< 1		0,0018	< 0.008	< 0.001	< 0.0002	< 0.006		< 0.0003
0,07		5,35	0,99	< 1		0,0018	< 0.008	< 0.001	< 0.0002	< 0.006		< 0.0003

Cu (mg/L)	Fe (mg/L)	K (mg/L)	Mg (mg/L)	Mg (mg/L CaCO ₃)	Mn (mg/L)	Na (mg/L)	Ni (mg/L)	P (mg/L)	S (mg/L)	Si (mg/L)	Sr (mg/L)	Zn (mg/L)
0,0003	0,0003	0,003	0,002		0,00005	0,007	0,002	0,02	0,02	0,003	0,00005	0,002
		0,03	0,02						0,2	0,03		
0,0003	0,0004	40,6	45,8	189	0,00011	38,9	0,0025	< 0.02	2,74	0,518	0,0326	0,0027
0,0006	0,0005	40,6	45,6	188	0,00015	38,6	< 0.002	< 0.02	2,79	0,514	0,0326	0,003
< 0.0003	0,0005	40,1	45,7	188	0,0001	38,3	< 0.002	< 0.02	2,71	0,513	0,0325	0,004
0,0011	0,0009	15,4	105	432	0,00027	2,66	< 0.002	< 0.02	2,69	0,355	0,00641	0,005
< 0.0003	0,0005	15,4	105	432	0,00006	2,61	< 0.002	< 0.02	2,67	0,353	0,0063	0,003
< 0.0003	0,0006	15,1	105	432	0,00009	2,64	< 0.002	< 0.02	2,73	0,355	0,00623	0,002
0,001	0,0047	5,13	104	428	0,0026	46,4	0,089	0,024	107	9,59	0,457	0,0179
0,001	0,0046	5,06	104	428	0,0026	46,6	0,089	0,024	113	9,53	0,457	0,0175
0,0006	0,0047	5,09	103	424	0,0026	46,7	0,09	0,024	106	9,48	0,459	0,0181
< 0.0003	< 0.0003	< 0.003	< 0.002		< 0.00005	0,037	< 0.002	< 0.02	< 0.02	0,0188	< 0.00005	0,0024
0,00125	< 0.0003	0,006	0,0023		< 0.00005	0,044	< 0.002	< 0.02	< 0.02	0,022	< 0.00005	0,0024

Annexe 3 - Bilan thermique du volume d'eau des mines.

KING-BEAVER	Niveau	Superficie (m²)	Volume (m³)	T₀ (°C)	T_{25ans} (°C)	Cap. therm. (MJ m⁻³ K⁻¹)	Énergie (MJ)	Énergie (M W h)	P_{25 ans} (MW)
Eau (2018) - Chauffage	235	305 442	22 680 986	4,8	2,0	4,18	265 712 290	73 809	0,337
Eau (2018) - Free-cooling	235	305 442	22 680 986	4,8	11,0	4,18	588 362 927	163 434	0,746
Eau (2018) - Climatisation	235	305 442	22 680 986	4,8	20,0	4,18	1 442 438 145	400 677	1,830

BRITISH-CANADIAN	Niveau	Superficie (m²)	Volume (m³)	T₀ (°C)	T_{25ans} (°C)	Cap. therm. (MJ m⁻³ K⁻¹)	Énergie (MJ)	Énergie (M W h)	P_{25 ans} (MW)
Eau (2018) - Chauffage	274	600 428	34 492 918	4,0	2,0	4,18	288 636 739	80 177	0,366
Eau (2018) - Free-cooling	274	600 428	34 492 918	4,0	11,0	4,18	1 010 228 587	280 619	1,281
Eau (2018) - Climatisation	274	600 428	34 492 918	4,0	20,0	4,18	2 309 093 913	641 415	2,929

JOHNSON	Niveau	Superficie (m²)	Volume (m³)	T₀ (°C)	T_{25ans} (°C)	Cap. therm. (MJ m⁻³ K⁻¹)	Énergie (MJ)	Énergie (M W h)	P_{25 ans} (MW)
Eau (2018) - Chauffage	1720	–	182 365	8,3	2,0	4,18	4 806 999	1 335	0,006
Eau (2018) - Free-cooling	1720	–	182 365	8,3	11,0	4,18	2 060 142	572	0,003
Eau (2018) - Climatisation	1720	–	182 365	8,3	20,0	4,18	8 927 284	1 908	0,011

Annexe 4 – Bilan thermique de la roche encaissante de la mine King-Beaver.

	Niveau	T (°C)	ΔT (°C)	Rayon d'influence (m)	Volume (m ³)	T ₀ (°C)	T _{25 ans} (°C)	Cap. therm. (MJ m ⁻³ K ⁻¹)	Énergie (MJ)	Énergie (M W h)	P _{25 ans} (MW)
KING-BEAVER CHAUFFAGE Roche (2018)	235	2,0	6,8	0	–	–	–	–	–	–	–
		3,0	5,8	3	460 056	8,8	2,5	2,78	8 057 419	2 238	0,010
		4,0	4,8	7	621 935	8,8	3,5	2,78	9 163 596	2 545	0,012
		5,0	3,8	11	631 670	8,8	4,5	2,78	7 550 978	2 097	0,010
		6,0	2,8	16	803 257	8,8	5,5	2,78	7 369 081	2 047	0,009
		7,0	1,8	23	1 150 038	8,8	6,5	2,78	7 353 341	2 043	0,009
		8,0	0,8	31	1 350 658	8,8	7,5	2,78	4 881 280	1 356	0,006
		8,8	0,0	64	5 979 508	8,8	8,4	2,78	6 649 213	1 847	0,008
									51 024 907	14 174	0,065
	Niveau	T (°C)	ΔT (°C)	Rayon d'influence (m)	Volume (m ³)	T ₀ (°C)	T _{25 ans} (°C)	Cap. therm. (MJ m ⁻³ K ⁻¹)	Énergie (MJ)	Énergie (M W h)	P _{25 ans} (MW)
KING-BEAVER FREE-COOL- ING Roche (2018)	235	11,0	2,2	0	–	–	–	–	–	–	–
		10,5	1,7	9	1 396 610	8,8	10,8	2,78	7 571 023	2 103	0,010
		10,0	1,2	19	1 609 544	8,8	10,3	2,78	6 488 073	1 802	0,008
		9,5	0,7	30	1 840 511	8,8	9,8	2,78	4 860 789	1 350	0,006
		9,0	0,2	41	1 913 651	8,8	9,3	2,78	2 393 977	665	0,003
		8,8	0,0	61	3 666 146	8,8	8,9	2,78	1 019 188	283	0,001
									22 333 051	6 204	0,028
	Niveau	T (°C)	ΔT (°C)	Rayon d'influence (m)	Volume (m ³)	T ₀ (°C)	T _{25 ans} (°C)	Cap. therm. (MJ m ⁻³ K ⁻¹)	Énergie (MJ)	Énergie (M W h)	P _{25 ans} (MW)
KING-BEAVER CLIMATISA- TION Roche (2018)	235	20,0	11,2	0	–	–	–	–	–	–	–
		18,0	9,2	4	614 626	8,8	19,0	2,78	17 428 348	4 841	0,022
		17,0	8,2	6	310 968	8,8	17,5	2,78	7 521 070	2 089	0,010
		16,0	7,2	8	313 402	8,8	16,5	2,78	6 708 688	1 864	0,009
		15,0	6,2	10	315 835	8,8	15,5	2,78	5 882 742	1 634	0,007
		14,0	5,2	12	318 266	8,8	14,5	2,78	5 043 246	1 401	0,006
		13,0	4,2	14	320 696	8,8	13,5	2,78	4 190 213	1 164	0,005

	12,0	3,2	17	485 597	8,8	12,5	2,78	4 994 846	1 387	0,006
	11,0	2,2	21	655 953	8,8	11,5	2,78	4 923 583	1 368	0,006
	10,0	1,2	25	665 647	8,8	10,5	2,78	3 145 847	874	0,004
	9,0	0,2	29	675 330	8,8	9,5	2,78	1 314 193	365	0,002
	8,9	0,1	31	341 293	8,8	9,0	2,78	142 319	40	0,000
	8,8	0,0	98	12 823 846	8,8	8,9	2,78	1 782 515	495	0,002
								63 077 611	17 522	0,080

Annexe 5 – Bilan thermique de la roche encaissante de la mine British-Canadian.

	Niveau	T (°C)	ΔT (°C)	Rayon d'influence (m)	Volume (m ³)	T ₀ (°C)	T _{25 ans} (°C)	Cap. therm. (MJ m ⁻³ K ⁻¹)	Énergie (MJ)	Énergie (M W h)	P _{25 ans} (MW)
BRITISH-CANADIAN CHAUFFAGE Roche (2018)	274	2,0	6,8	0	–	–	–	–	–	–	–
		3,0	5,8	3	699 646	8,8	2,5	2,78	12 253 607	3 404	0,016
		4,0	4,8	7	945 830	8,8	3,5	2,78	13 935 865	3 871	0,018
		5,0	3,8	11	960 634	8,8	4,5	2,78	11 483 419	3 190	0,015
		6,0	2,8	16	1 221 582	8,8	5,5	2,78	11 206 793	3 113	0,014
		7,0	1,8	23	1 748 961	8,8	6,5	2,78	11 182 855	3 106	0,014
		8,0	0,8	31	2 054 062	8,8	7,5	2,78	7 423 380	2 062	0,009
		8,8	0,0	64	9 093 549	8,8	8,4	2,78	10 112 027	2 809	0,013
								77 597 945	21 555	0,098	

	Niveau	T (°C)	ΔT (°C)	Rayon d'influence (m)	Volume (m ³)	T ₀ (°C)	T _{25 ans} (°C)	Cap. therm. (MJ m ⁻³ K ⁻¹)	Énergie (MJ)	Énergie (M W h)	P _{25 ans} (MW)
BRITISH-CANADIAN FREE-COOLING Roche (2018)	274	11,0	2,2	0	–	–	–	–	–	–	–
		10,5	1,7	9	2 123 945	8,8	10,8	2,78	11 513 903	3 198	0,015
		10,0	1,2	19	2 447 772	8,8	10,3	2,78	9 866 968	2 741	0,013
		9,5	0,7	30	2 799 022	8,8	9,8	2,78	7 392 218	2 053	0,009
		9,0	0,2	41	2 910 253	8,8	9,3	2,78	3 640 726	1 011	0,005
		8,8	0,0	61	5 575 421	8,8	8,9	2,78	1 549 967	431	0,002
								33 963 783	9 434	0,043	

	Niveau	T (°C)	ΔT (°C)	Rayon d'influence (m)	Volume (m ³)	T ₀ (°C)	T _{25 ans} (°C)	Cap. therm. (MJ m ⁻³ K ⁻¹)	Énergie (MJ)	Énergie (M W h)	P _{25 ans} (MW)	
BRITISH-CANADIAN		20,0	11,2	0	–	–	–	–	–	–	–	
		18,0	9,2	4	934 715	8,8	19,0	2,78	26 504 782	7 362	0,034	
		17,0	8,2	6	472 916	8,8	17,5	2,78	11 437 935	3 177	0,015	
		16,0	7,2	8	476 618	8,8	16,5	2,78	10 202 476	2 834	0,013	
		15,0	6,2	10	480 317	8,8	15,5	2,78	8 946 390	2 485	0,011	
		14,0	5,2	12	484 015	8,8	14,5	2,78	7 669 697	2 130	0,010	
	CLIMATISATION Roche (2018)	274	13,0	4,2	14	487 710	8,8	13,5	2,78	6 372 416	1 770	0,008
			12,0	3,2	17	738 488	8,8	12,5	2,78	7 596 091	2 110	0,010
			11,0	2,2	21	997 564	8,8	11,5	2,78	7 487 714	2 080	0,009
			10,0	1,2	25	1 012 306	8,8	10,5	2,78	4 784 159	1 329	0,006
		9,0	0,2	29	1 027 033	8,8	9,5	2,78	1 998 606	555	0,003	
		8,9	0,1	31	519 034	8,8	9,0	2,78	216 437	60	0,000	
		8,8	0,0	98	19 502 321	8,8	8,9	2,78	2 710 823	753	0,003	
									95 927 525	26 647	0,122	

Annexe 6 – Bilan thermique de la roche encaissante de la mine Johnson.

	Niveau	T (°C)	ΔT (°C)	Rayon d'influence (m)	Volume (m ³)	T ₀ (°C)	T _{25 ans} (°C)	Cap. therm. (MJ m ⁻³ K ⁻¹)	Énergie (MJ)	Énergie (M W h)	P _{25 ans} (MW)
JOHNSON CHAUFFAGE Roche (2018)		2,0	11,1	0	–	–	–	–	–	–	–
		4,0	9,1	1	262 783	13,08	3,0	2,78	7 363 817	2 046	0,009
		5,0	8,1	2	357 919	13,08	4,5	2,78	8 537 227	2 371	0,011
		6,0	7,1	3	467 802	13,08	5,5	2,78	9 857 708	2 738	0,013
		7,0	6,1	4	592 461	13,08	6,5	2,78	10 837 542	3 010	0,014
	1720	8,0	5,1	6	886 229	13,08	7,5	2,78	13 747 543	3 819	0,017
		9,0	4,1	8	1 239 459	13,08	8,5	2,78	15 781 291	4 384	0,020
		10,0	3,1	12	2 125 253	13,08	9,5	2,78	21 151 371	5 875	0,027
		11,0	2,1	14	2 658 291	13,08	10,5	2,78	19 066 327	5 296	0,024
		12,0	1,1	16	3 251 739	13,08	11,5	2,78	14 282 936	3 967	0,018
		13,1	0,0	53	25 418 870	13,08	12,5	2,78	38 158 808	10 600	0,048

158 784 570 44 107 0,201

	Niveau	T (°C)	ΔT (°C)	Rayon d'influence (m)	Volume (m ³)	T ₀ (°C)	T _{25 ans} (°C)	Cap. therm. (MJ m ⁻³ K ⁻¹)	Énergie (MJ)	Énergie (M W h)	P _{25 ans} (MW)
JOHNSON	1720	20	7	0	-	-	-	-	-	-	-
		19	6	2	357 919	13,08	19,5	2,78	6 387 995	1 774	0,008
		18	5	3	467 802	13,08	18,5	2,78	7 048 652	1 958	0,009
CLIMATISA- TION Roche (2018)	1720	17	4	5	731 927	13,08	17,5	2,78	8 993 631	2 498	0,011
		16	3	8	1 239 459	13,08	16,5	2,78	11 784 283	3 273	0,015
		15	2	13	2 384 236	13,08	15,5	2,78	16 040 185	4 456	0,020
		14	1	21	5 001 204	13,08	14,5	2,78	19 742 753	5 484	0,025
		13	0	60	32 070 657	13,08	13,5	2,78	41 011 956	11 392	0,052
									111 009 454	30 836	0,141