

Université du Québec
Institut national de la recherche scientifique
Centre Eau Terre Environnement

**Étude des anomalies géothermiques du bassin sédimentaire des
Basses-Terres du Saint-Laurent (Québec, Canada)**

Madeline Chapelet

Proposition de recherche pour
Maîtrise en sciences de la Terre
(Programme de bidualité avec l'Université de Rennes 1)

Directeur de recherche

Jasmin Raymond
INRS – Centre Eau Terre Environnement

Mai 2020

TABLE DES MATIÈRES

1. Nomenclature	2
2. Introduction	3
2.1. Mise en contexte	3
2.2. Cadre géologique du bassin sédimentaire des BTSL	7
2.2.1. Propriétés thermiques	9
2.2.2. Propriétés hydrauliques des unités réservoirs	13
3. Problématique	15
4. Objectifs	18
4.1. Objectifs généraux :	19
4.2. Sous-objectifs :	19
5. Méthodologie	21
5.1. Evaluation du flux de chaleur	21
5.2. Méthodes de correction des températures de fond de puits	22
5.3. Utilisation des données de TRT et corrections paléoclimatiques	23
5.4. Identification et optimisation des zones réservoirs	25
5.5. Détermination des gammes de température possibles	28
5.6. Comparaison du BTSL avec des bassins sédimentaires analogues	29
6. Échéancier	30
7. Budget	30
8. Conclusion	31
9. Références	32

1. Nomenclature

Variable	Nom	Unité
λ	Conductivité thermique	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
A	Constante de génération de chaleur interne	$\mu\text{W m}^{-3}$
ΔT	Différence de température	$^{\circ}\text{C}$
α	Diffusivité thermique	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
f	Facteur de correction	
Q	Flux de chaleur	mW m^{-2}
$\left[\frac{\Delta T}{\Delta z}\right]$	Gradient géothermique	$^{\circ}\text{C km}^{-1}$
z	Profondeur	m
T	Température	$^{\circ}\text{C}$
t	Temps	s

Unité	Nom	Équivalent
$^{\circ}\text{C}$	Degré Celsius	
K	Kelvin	
m	Mètre	
Km	Kilomètre	10^3 m
s	Seconde	
W	Watt	
μW	Microwatt	10^{-6} W
mW	Milliwatt	10^{-3} W

Indice	Nom
BHT	Bottom-hole temperature (mesure en fond de puit)
c	Corrigé
e	Effective
0	En surface
m	Mesuré
sed	Sédiments

2. Introduction

2.1. Mise en contexte

Face à l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre et à la demande énergétique mondiale, le développement de ressources énergétiques renouvelables est un enjeu environnemental et sociétal majeur. Avec l'éolien, le solaire et la biomasse, l'énergie géothermique constitue l'un des axes à développer dans le processus de transition énergétique. Les ressources géothermiques permettent une production continue d'énergie, contrairement aux autres énergies renouvelables qui dépendent souvent de flux naturels variables (conditions atmosphériques) et qui en font des sources d'énergie intermittentes. Pour exploiter de telles ressources géothermiques, des puits doivent être forés dans la croûte terrestre pour en extraire la chaleur en profondeur afin de chauffer des bâtiments, voire même de créer de l'électricité, grâce aux fluides que l'on peut pomper ou injecter dans les puits pour en récupérer l'énergie. Selon la température et la profondeur atteintes par les puits, différents types de ressources géothermiques sont envisageables et leurs limites sont parfois discutées. Muffler (1979) définit trois types de ressources de la façon suivante :

- La basse énergie : température inférieure à 90 °C (et très basse énergie pour une température inférieure à 30 °C).
- La moyenne énergie : température de 90 °C à 150 °C.
- La haute énergie : température supérieure à 150 °C.

Les systèmes géothermiques superficiels exploitant des ressources de très basse énergie sont utilisés pour le chauffage et la climatisation de bâtiments par l'utilisation de

pompes à chaleur. Les systèmes géothermiques profonds, dont l'opération repose sur les ressources de moyenne à haute température, permet une utilisation directe pour le chauffage urbain et industriel, mais aussi la production d'électricité dans le cas où la température atteint 150 °C. Il existe différents systèmes géothermiques pour capter la chaleur du sous-sol. Très utilisés, les systèmes à boucle fermée sont composés d'un ou plusieurs circuits de tuyaux scellés installés en profondeur dans lesquels on fait circuler un fluide caloporteur. Les systèmes à boucle ouverte, quant à eux, utilisent directement l'eau souterraine comme fluide caloporteur. En règle générale, ce système se compose de deux puits, un puits de production pompant l'eau de l'aquifère ciblé et un puits d'injection rejetant l'eau usée en profondeur. Contrairement aux systèmes à boucle fermée, les systèmes à boucle ouverte sont dépendants des conditions hydrogéologiques du sous-sol, des réglementations sur le captage d'eau souterraine, et nécessitent un entretien régulier. Cependant, les systèmes à boucle ouverte ont l'avantage d'offrir une meilleure efficacité thermique (Lo Russo *et al.*, 2012).

Plus on progresse en profondeur dans la croûte terrestre et plus la température de la roche et des eaux souterraines augmente. Ce phénomène décrivant l'augmentation de la température avec la profondeur est appelé gradient géothermique. Exprimé en degré Celsius par mètre ($^{\circ}\text{C}.\text{m}^{-1}$) ou plus usuellement en degré Celsius par kilomètre ($^{\circ}\text{C}.\text{km}^{-1}$), le gradient géothermique dépend des conditions géologiques locales et varie généralement de 10 à 40 $^{\circ}\text{C}.\text{km}^{-1}$ au Canada (Grasby *et al.*, 2011). Les zones tectoniquement actives, telles que les limites de plaques tectoniques, sont des régions où le gradient géothermique est assez élevé pour pouvoir atteindre des gammes de température favorable à l'exploitation des ressources géothermiques en particulier pour

la production d'électricité (Etats-Unis, Nouvelle-Zélande, Islande, Italie, etc.). Bien qu'en général les bassins sédimentaires se situent dans des zones peu actives, à gradient géothermique théoriquement faible, ils constituent tout de même une cible privilégiée pour l'exploration des ressources géothermiques basse et moyenne température (Bassin Parisien en France) et même pour la production d'électricité à grande profondeur (cinq kilomètres à Soultz-sous-Forêts en France). Leur potentiel s'explique par la présence d'eau souterraine en grande quantité, mais aussi par le rôle de piège thermique que peuvent jouer les roches couvertures des bassins sédimentaires. En effet, ces roches sédimentaires à grains fins ont généralement une conductivité thermique faible qui diminue la diffusion de la chaleur vers la surface et ainsi provoque des gradients géothermiques élevés.

En 2016, le gouvernement du Québec a déposé une nouvelle politique énergétique ayant pour ambition de « faire du Québec, à l'horizon 2030, un chef de file nord-américain dans les domaines de l'énergie renouvelable et de l'efficacité énergétique » (<http://www.politiqueenergetique.gouv.qc.ca/accueil/>). C'est dans ce contexte que le bassin sédimentaire des Basses-Terres du Saint-Laurent (BTSL), situé dans le sud-ouest du Québec (Figure 1), a fait l'objet d'études visant à définir le potentiel de production des ressources géothermiques profondes (ex : Saull *et al.*, 1962; Raymond *et al.*, 2012; Majorowicz et Minea, 2012; Bédard *et al.*, 2016 ; Figure 2). Étendu sur près de 20 000 km² le long du fleuve Saint-Laurent, c'est d'ailleurs au cœur de ce grand bassin sédimentaire, que la majorité de la population québécoise est implantée (plus de 4 millions d'habitants). D'un point de vue énergétique, écologique et économique, la forte concentration de population et le développement des zones urbaines associées constituent les raisons d'un

intérêt pour l'exploration des ressources géothermiques profondes au sein de ce bassin sédimentaire.

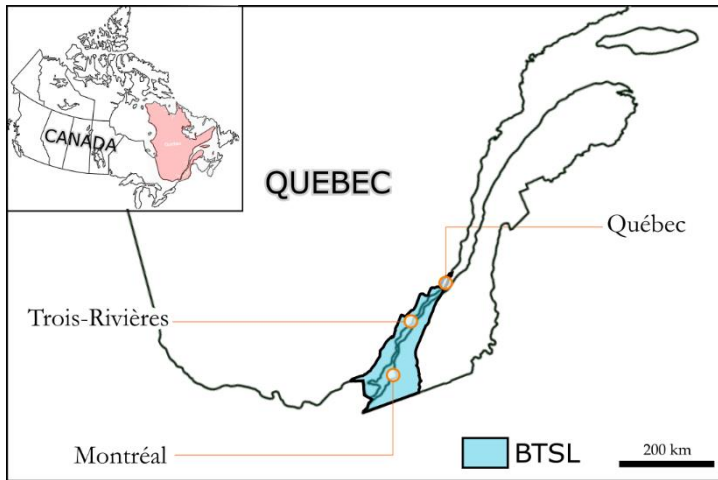


Figure 1: Localisation du bassin sédimentaire des Basses-Terres du Saint-Laurent au sein de la province de Québec, au Canada.

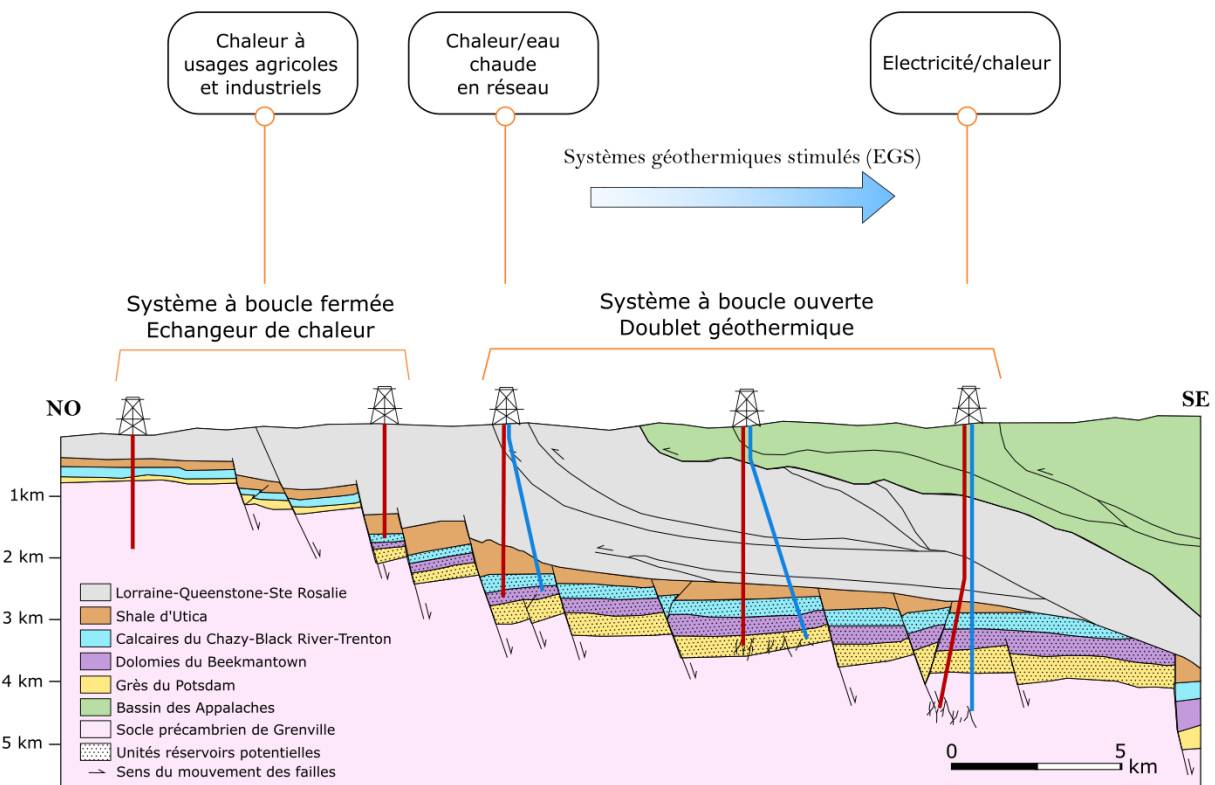


Figure 2: Schéma illustrant l'architecture du bassin sédimentaire des BTSL le long de la ligne sismique M-2001 et montrant des exemples de systèmes d'exploitation de la ressource géothermique envisageables au sein du bassin sédimentaire. Modifiée de Castonguay et al. (2010) et Bédard et al. (2018).

2.2. Cadre géologique du bassin sédimentaire des BTSL

Le bassin sédimentaire des BTSL est limité au nord-ouest par les roches précambriennes de la Province de Grenville et au sud-est par les roches cambro-ordoviciennes des Appalaches (Figures 2 et 3). Les Appalaches recouvrent les roches cambro-ordoviciennes du bassin sédimentaire des BTSL via une grande faille chevauchante appelée la Ligne Logan (Figures 2 et 3). Des failles normales d'orientation NE-SO découpent la séquence sédimentaire en blocs basculés de plus en plus profonds en direction du sud-est (Konstantinovskaya *et al.*, 2009 ; Castonguay *et al.*, 2010 ; Figure 2), où elle peut dépasser les 5 000 mètres d'épaisseur vers le SE. Les unités stratigraphiques qui composent le bassin sédimentaire peuvent être séparées en deux catégories principales : les roches dites « couvertures » et les roches réservoirs potentielles (Figures 2 et 4). En effet, les roches des groupes de Queenston, Lorraine, Sainte-Rosalie et du Shale d'Utica ont été regroupées en unités couvertures par Bédard *et al.*, (2018) de par leurs faibles valeurs de conductivité thermique et hydraulique. Tandis que les roches des groupes de Trenton, Black River, Chazy, Beekmantown et Potsdam sont considérées comme étant des unités réservoirs potentielles (Dietrich *et al.*, 2011 ; Konstantinovskaya *et al.*, 2014 ; Tran Ngoc *et al.*, 2014 ; Bédard *et al.*, 2018) compte tenu de leur nature lithologique (calcaires, dolomies et grès ; Figure 4). En effet, les unités dolomitiques du Groupe de Beekmantown ont agi comme réservoirs d'hydrocarbures liquides et de gaz naturels pendant leur enfouissement (Chi *et al.*, 2000) et un gisement de gaz y a été exploité de 1980 à 1994. Par ailleurs, la faible conductivité hydraulique du Groupe de Potsdam et du socle grenvillien fait de ces roches profondes des cibles

potentielles pour des systèmes géothermiques profonds de type EGS (*enhanced geothermal system*) (Gauchat, 2017 ; Figure 2).

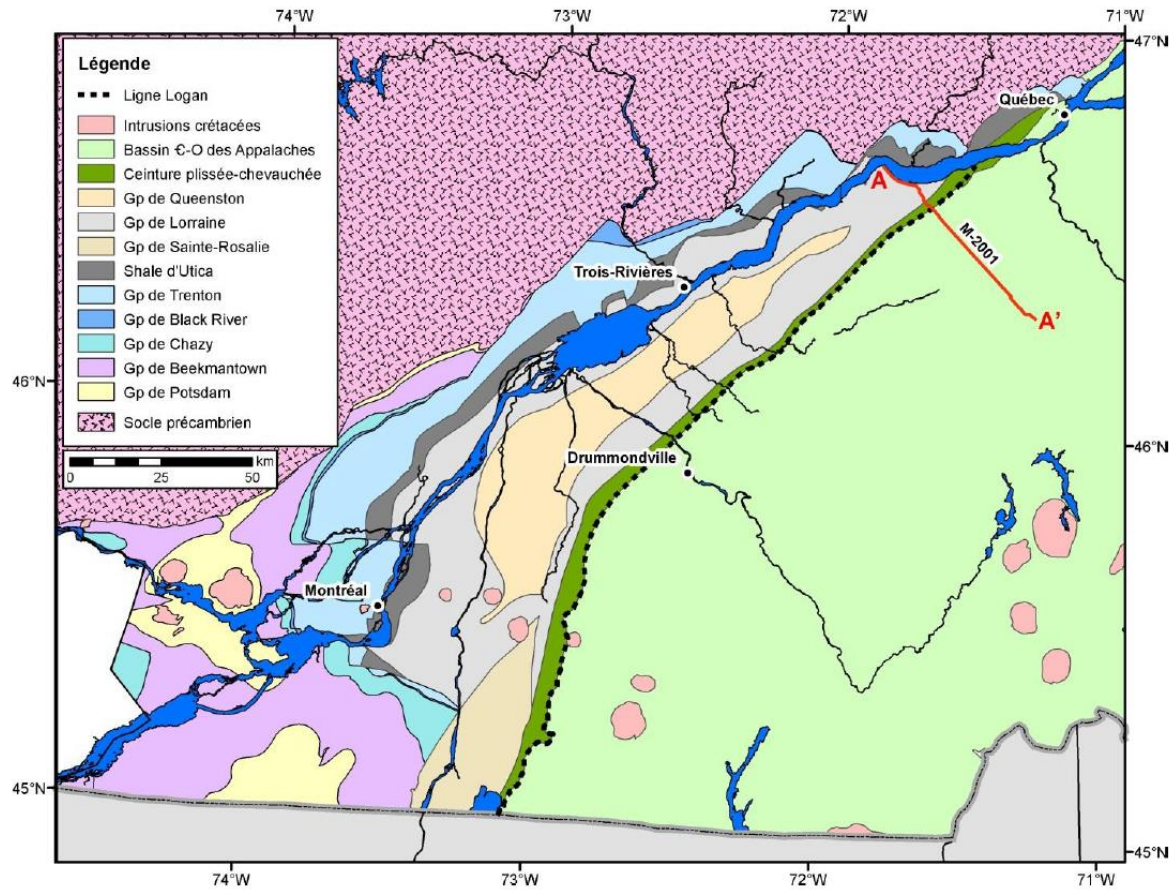


Figure 3: Carte géologique simplifiée du bassin sédimentaire des BTSL. C-O : cambro-ordovicien. L'interprétation de la ligne sismique M-2001 (en rouge) se trouve à la Figure 2. (Bédard et al., 2016).

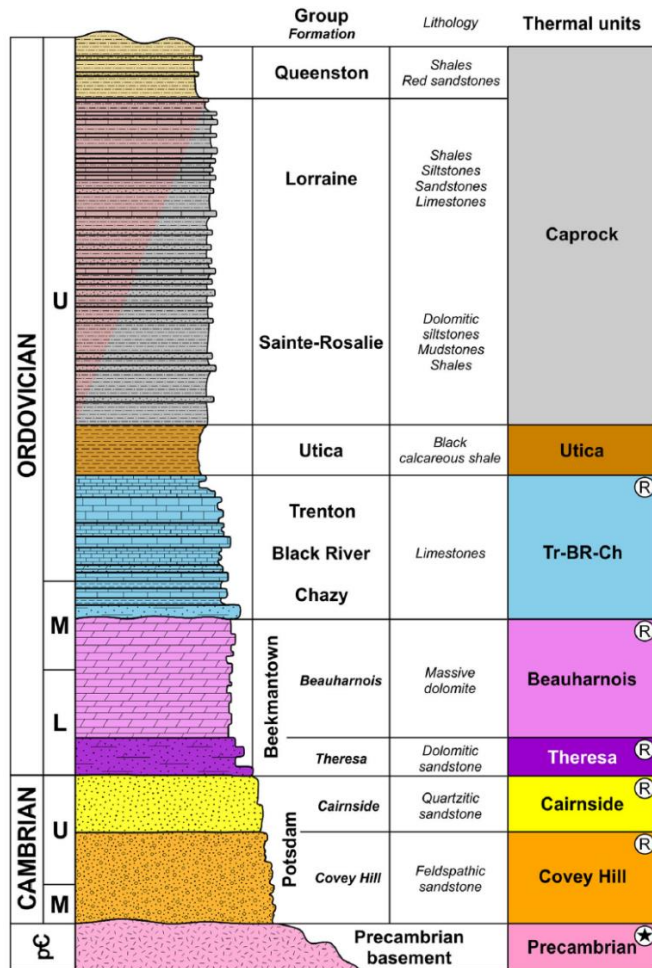


Figure 4: Colonne stratigraphique du bassin sédimentaire des BTSL. R : potentiel pour réservoir hydrothermal. Étoile : potentiel pour réservoir EGS. Modifiée de Comeau et al. (2012) et Bédard et al. (2018).

2.2.1. Propriétés thermiques

Un aspect primordial dans l'évaluation des ressources géothermiques profondes est la caractérisation des propriétés thermiques des roches des unités géologiques. En effet, il faut tout d'abord estimer et extrapoler la température du sous-sol en profondeur en fonction des informations disponibles afin d'estimer les ressources géothermiques d'un bassin sédimentaire et les zones géologiques à cibler pour d'éventuels projets d'exploitation. C'est dans cette optique que des études récentes ont été conduites pour le bassin sédimentaire des BTSL (Minea et Majorowicz, 2011 ; Majorowicz et Minea, 2012 ; Bédard *et al.*, 2016 ; Bédard *et al.*, 2018 ; Nasr *et al.*, 2018).

Les travaux de Bédard *et al.* (2016) ont permis la construction d'un modèle 3D de la température au sein du bassin sédimentaire des BTSL et l'estimation de ses ressources géothermiques. Pour ce faire, les données de températures enregistrées en fond de puits (*bottom-hole temperature, BHT*) d'anciens forages pétroliers et gaziers dans le bassin sédimentaire (Figure 5) ont été compilées, puis corrigées en considérant l'effet des opérations de forage en utilisant la correction de Harrison (Harrison *et al.*, 1983) et des variations paléoclimatiques. La conductivité thermique et la constante de génération de chaleur interne effective des différentes unités géologiques du bassin sédimentaire ont également été estimées par Bédard *et al.*, (2016 ; 2018), ce qui a permis d'interpoler le flux de chaleur en surface sur la totalité du territoire (Figure 5) et d'ainsi extrapoler la température en profondeur en tout point du modèle 3D du bassin sédimentaire. Bédard *et al.*, (2016) ont identifié trois principales anomalies thermiques positives au sein du bassin sédimentaire : *Sud du Lac St-Pierre, Sud-Est de Bécancour et Rive-Sud de Montréal* (Figure 5). Selon le scénario « pessimiste » présenté en Figure 5, ces anomalies positives auraient des valeurs de flux de chaleur estimées comprises entre 65 et 80 mW m⁻². D'après le modèle 3D de température proposé par Bédard *et al.*, (2016), les températures de plus de 120 °C y sont atteintes à environ 4 000 mètres de profondeur. Une plus forte anomalie semble se démarquer des deux autres ; celle de la *Rive-Sud de Montréal*.

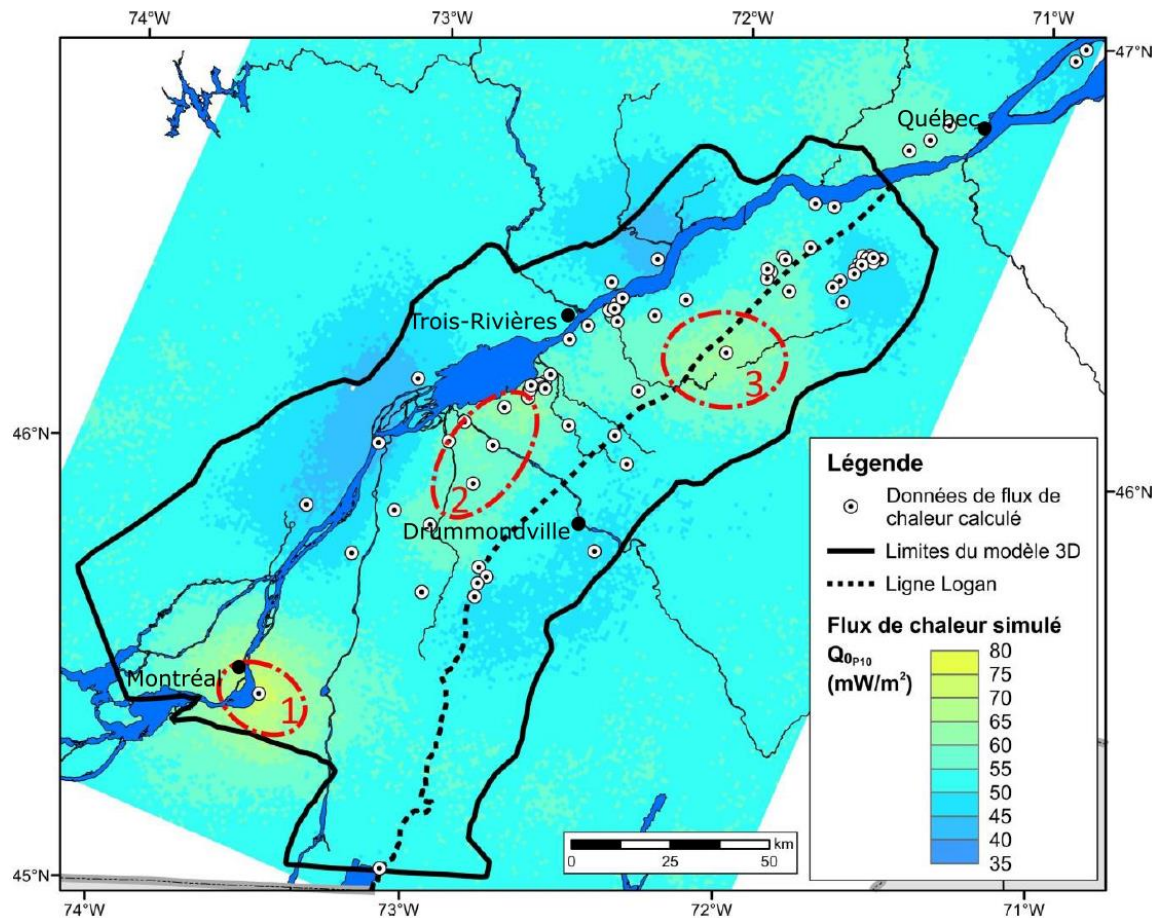


Figure 5 : Flux de chaleur en surface dans la région du bassin des BTSL selon le scénario pessimiste des travaux de Bédard et al., (2016). Les points blancs montrent les données utilisées pour la simulation du flux de chaleur en surface. Les ellipses rouges indiquent les anomalies positives de flux de chaleur en surface. 1 : Rive-Sud de Montréal ; 2 : Sud du lac St-Pierre ; 3 : Sud-est de Bécancour. (Bédard et al., 2016).

Une grille de sélection de sites géothermiques a été également conçue par Richard et al., (2016), qui met en évidence les secteurs les plus propices au développement de la géothermie profonde au Québec. Au sein du bassin sédimentaire des BTSL, cinq sites ont été identifiés et analysés selon des critères reposant sur la qualité de la ressource, ainsi que sur des aspects techniques, économiques puis sociétaux (Figure 6). Parmi ces cinq sites :

- Arthabaska (1) et L'Érable (3) correspondent à l'anomalie Sud-Est de Bécancour mise en évidence par Bédard et al., (2016) ;

- *Brossard (5)* correspond à l'anomalie appelée *Rive-Sud de Montréal*
- *Maskoutains (2)* est à proximité de l'anomalie *Sud du lac St-Pierre* (Figure 6).

Au regard de cette grille de sélection réalisée par Richard *et al.*, (2016), les sites *Arthabaska (1)*, *L'Érable (3)* et *Brossard (5)* se démarquent de par leurs valeurs de température élevées, leurs caractéristiques lithologiques favorables, la disponibilité de ressources en eau, ainsi que la présence d'infrastructures facilitant la mise en place d'un éventuel projet d'exploitation au niveau du site. Le site de *Brossard (5)* apparaît comme un site particulièrement prometteur au regard du marché pour l'utilisation de la chaleur en raison de sa proximité avec la région métropolitaine de Montréal, la plus peuplée de la province du Québec. L'*anomalie de Brossard* fait donc l'objet d'un grand intérêt dans l'exploration et l'implémentation de projets pilotes pour l'exploitation des systèmes géothermiques profonds.

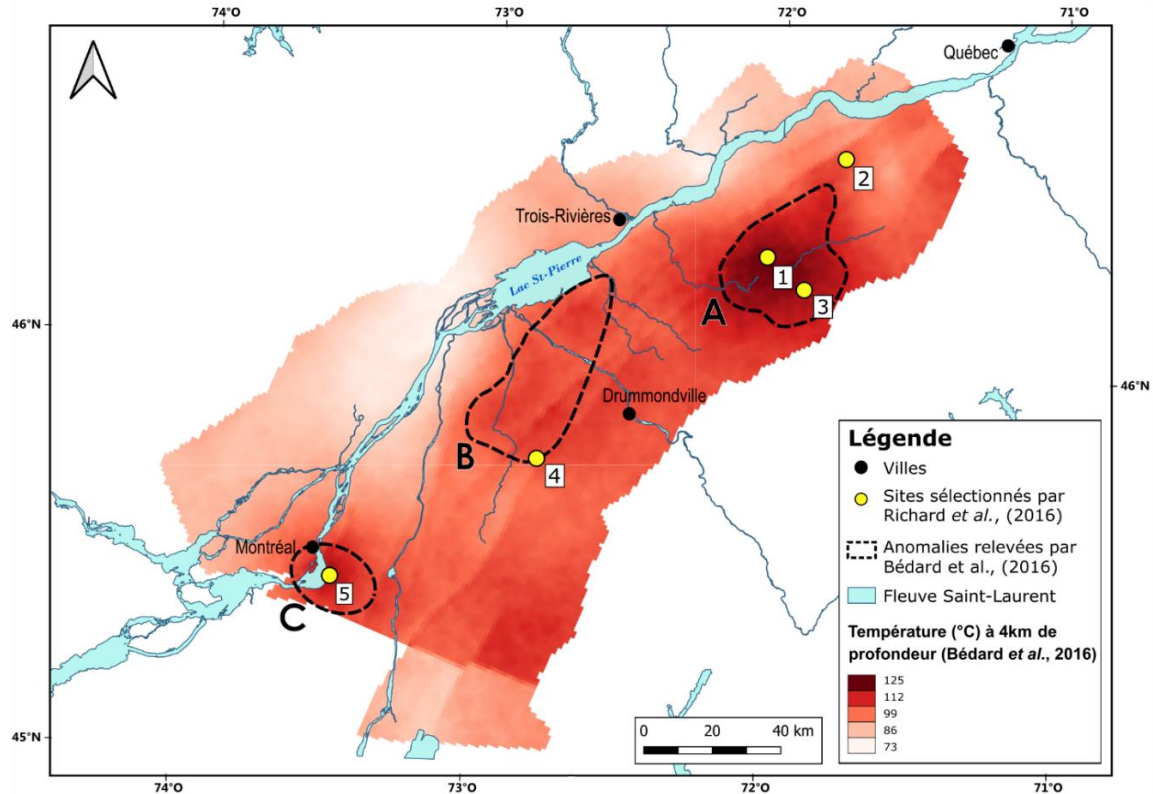


Figure 6 : Localisation des sites et anomalies déterminés par Richard et al., (2016) et Bédard et al., (2016) sur fond de carte des températures à 4km de profondeur dans la région du bassin sédimentaire des BTSL (à partir des données de Bédard et al., 2016). 1 : Arthabaska; 2 : Lotbinière; 3 : L'Érable; 4 : Maskoutains; 5 : Brossard. A : Sud-est de Bécancour; B : Sud du lac St-Pierre; C : Rive Sud de Montréal.

2.2.2. Propriétés hydrauliques des unités réservoirs

Un des aspects majeurs pour l'évaluation du potentiel d'un système géothermique à boucle ouverte est l'estimation des propriétés hydrauliques des unités réservoirs, ce qui consiste à en estimer la perméabilité, la porosité et la fracturation présentes dans les roches qui les composent. De nombreuses études ont ainsi été conduites sur le Groupe de Potsdam (Schmerber, 1971; Sanford et Arnott, 2010) et ses propriétés de réservoir pétrolier (Héroux et al., 1976). Plus récemment, la perméabilité et la porosité de cette unité ont été étudiées plus en détails à l'aide d'observations sur affleurements, carottes de forage et lames minces (Grenier, 2014; Gauchat, 2017). Grenier (2014) a mis en

évidence les unités les plus poreuses du groupe : l'unité intermédiaire de la Formation de Covey Hill avec 1 à 8 % de porosité et la Formation de Cairnside (3 à 4 %). On remarque une grande variabilité des valeurs de porosité avec des variations allant jusqu'à 7 %. Gauchat (2017) suggère que le taux de fracturation est faible dans les grès profonds du Potsdam et que les pores et les fractures de la roche sont remplies par des ciments et de la matrice. D'après ces résultats, une exploitation économique des grès de base du Groupe de Potsdam nécessiterait le développement d'un système géothermique ouvrages par stimulation hydraulique, thermique et/ou chimique du réservoir (Figure 2).

Les autres unités géologiques constituant le bassin sédimentaire des BTSL ont également fait l'objet d'études visant à en déterminer les valeurs de porosité et perméabilité. C'est le cas notamment des travaux de Tran Ngoc *et al.*, (2014) qui montrent que les unités sédimentaires du bassin des BTSL ont des porosités moyenne et médiane qui varient entre 1 et 6 %, excepté dans le cas de la Formation Theresa qui aurait une porosité médiane de 0.4 %. Tran Ngoc *et al.*, (2014) soulignent également les différences significatives entre les valeurs de perméabilité verticale et de perméabilité horizontale dans les deux directions au sein de chaque formation. Une grande partie de la porosité matricielle présente dans les unités dolomitiques du Groupe de Beekmantown a été colmatée par un ciment de quartz et de calcite (Chi *et al.*, 2000). Par ailleurs, ces faciès dolomitiques présentent une porosité secondaire contrôlée par les fractures suite à une dissolution tardive de la calcite le long de ces dernières (Bertrand *et al.*, 2003). Les propriétés réservoirs locales de ces dolomies font du Groupe de Beekmantown une cible potentielle pour le développement d'un système géothermique à boucle ouverte (Figure 2).

Ces études ont souvent pour méthode de caractériser les propriétés hydrauliques des unités géologiques selon des moyennes généralisées sur la totalité de ces unités. Or, les intervalles de confiance calculés démontrent bien une grande variabilité spatiale de ces paramètres au sein du bassin sédimentaire des BTSL.

3. Problématique

Les travaux antérieurs permettent de mettre en évidence la présence de potentielles anomalies thermiques au sein du bassin sédimentaire des BTSL. Cependant, les résultats de ces études n'ont depuis pas été vérifiés ou renforcés par l'utilisation de nouvelles données. Par exemple, la correction apportée aux mesures de BHT vis-à-vis des effets de la circulation de boue lors des forages prend seulement en compte la profondeur de la mesure (Harrison *et al.*, 1983) et néglige le temps écoulé entre la fin des opérations de forage et le moment de la mesure. De plus, des questions peuvent être soulevées concernant la fiabilité et le nombre de mesures de BHT qui ont été utilisées pour déterminer le flux de chaleur en surface et ainsi détecter les potentielles anomalies. La carte représentée en Figure 7 illustre bien le caractère épars et irrégulier de la répartition des données de puits d'exploration pétrolière et gazière sur l'ensemble du bassin sédimentaire des BTSL. Par exemple, dans le cas particulier de la zone de Brossard, la présence d'une anomalie a été déterminée à partir d'une seule et unique donnée de BHT et qui, par ailleurs, pourrait être erronée (mal mesurée, mal retranscrite, etc.). Bédard *et al.*, (2016) ont choisi d'utiliser un modèle 3D simplifié du bassin sédimentaire des BTSL en ne considérant qu'une seule valeur de conductivité thermique pour chacune des unités géologiques. Or, l'article de Raymond *et al.*, (2019) montre la variation spatiale de la

conductivité thermique au sein d'une même unité. De plus, les données de conductivité thermique utilisées par Bédard *et al.*, (2016) proviennent principalement d'échantillons très ponctuels prélevés dans les unités géologiques, ce qui n'est pas idéal d'un point de vue de la représentativité de ces unités. Tout cela induit une forte incertitude liée à l'existence des anomalies qui peuvent avoir été causées par une mauvaise estimation des paramètres thermiques tels que la température en fond de puits et la conductivité thermique.

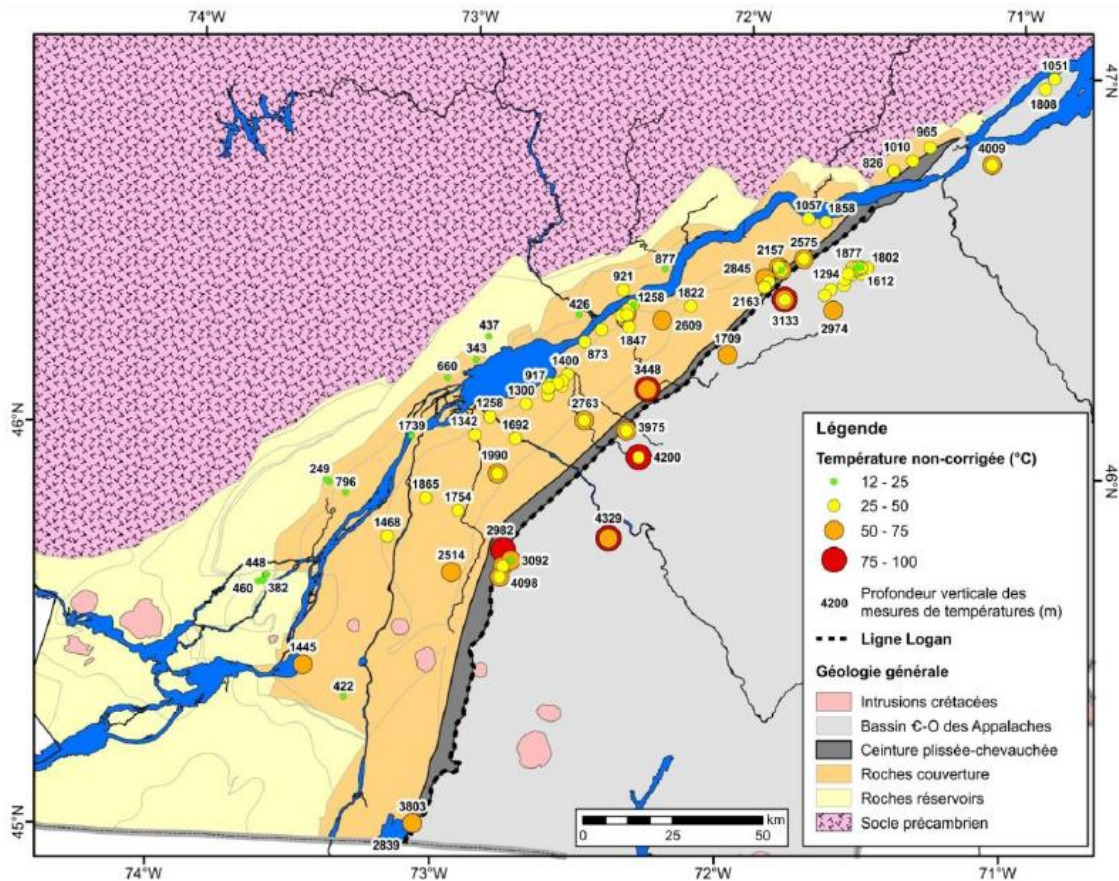


Figure 7 : Carte de la localisation des mesures de température dans les puits du bassin des BTSL. (Bédard *et al.*, 2016)

Au-delà du fait que l'existence de certaines des anomalies géothermiques au sein du bassin sédimentaire des BTSL est incertaine, leur provenance est toute aussi inconnue.

Dans le cas où les résultats d'un projet de démonstration dans ces zones se montreraient convaincants, connaître l'origine géologique de ces anomalies thermiques permettrait de trouver d'autres sites ou bassins sédimentaires ayant un contexte géologique analogue afin d'y appliquer les résultats d'un tel projet.

Jusqu'ici, les travaux menés sur le potentiel géothermique du bassin sédimentaire des BTSL consistaient à des études généralisées sur l'ensemble du bassin, considérant un potentiel réservoir constant pour chaque unité géologique. Cependant, les propriétés réservoirs des unités géologiques du bassin sédimentaire des BTSL varient grandement latéralement. Aucune étude au cas par cas des différentes anomalies n'a été réalisée, ce qui signifie que la variabilité de ces propriétés réservoirs n'a encore jamais été prise compte. Prendre en compte la complexité du système naturel étudié est indispensable au regard de l'utilisation de systèmes géothermiques à boucle ouverte, étant donné leur dépendance aux conditions hydrogéologiques du réservoir ciblé.

Les études antérieures menées sur le potentiel géothermique du bassin sédimentaire des BTSL ont, jusqu'à présent, porté sur le potentiel de génération d'électricité à partir de systèmes géothermiques profonds. Or, ces travaux démontrent que les réservoirs potentiellement producteurs d'électricité sont situés à grande profondeur (quatre à cinq km minimum) et qu'ils nécessiteraient une stimulation conséquente du réservoir (Figure 2). Au regard du prix compétitif de l'hydroélectricité du Québec, l'exploitation de ces ressources profondes se montrerait très peu rentable. En revanche, peu de travaux ont été entrepris concernant la production de chaleur à partir de ressources situées à des profondeurs intermédiaires.

4. Objectifs

Ce travail a pour but de faire avancer l'état des connaissances plus spécifiquement à l'échelle du site qu'à l'échelle du bassin sédimentaire, comme il a été réalisé auparavant, afin d'identifier les possibilités de projets pilotes d'exploration des ressources géothermiques dans le bassin sédimentaire des BTSL. La production de chaleur directe avec des ressources géothermiques de profondeur intermédiaire est particulièrement visée. Ces travaux porteront ainsi sur des ressources théoriquement situées entre un et trois km de profondeur, dont la gamme de température varie de 40 à 80 °C. Pour cela, ce projet a deux objectifs principaux qui sont énoncés ici puis développés dans les sections suivantes. Tout d'abord, il consistera en la réévaluation de l'aspect thermique du bassin sédimentaire des BTSL, c'est-à-dire de confirmer ou d'infirmer la présence d'anomalies géothermiques et en particulier le cas de l'anomalie de *Brossard*. Pour cela, les données seront réévaluées en utilisant d'autres méthodes de correction, des nouvelles données tirées de forages moins profonds, ainsi qu'en faisant varier les paramètres thermiques en fonction d'un intervalle de confiance. Ensuite, ce travail se focalisera sur une caractérisation plus ciblée, à l'échelle de l'anomalie, en y évaluant le potentiel géothermique des systèmes à boucle ouverte et systèmes à boucle fermée. Pour cela, on évaluera les gammes de températures possibles des différentes zones réservoirs de chacune des anomalies (boucle ouverte) et de celles en fond de puits (boucle fermée).

4.1. Objectifs généraux :

- Réévaluation du potentiel thermique du bassin sédimentaire des BTSL : confirmer ou non l'existence d'anomalies géothermiques et particulièrement dans le secteur de Brossard.
- Caractérisation à l'échelle du site : évaluer les gammes de températures possibles en fond de puits et dans les différentes zones réservoirs de chacune des anomalies.

4.2. Sous-objectifs :

- Réévaluer les anomalies de flux de chaleur des divers sites d'intérêt des BTSL mentionnés dans le rapport Richard *et al.*, (2016) considérant la variation spatiale des valeurs de conductivité thermique présentée dans le travail de Raymond *et al.*, (2019) et d'autre(s) méthode(s) de correction de la température (Waples et Ramly, 2001) afin de comparer les résultats à ceux de Bédard *et al.*, (2016).
- Réévaluer le flux de chaleur dans le secteur de Brossard afin de le comparer aux résultats de Bédard *et al.*, (2016) :
 - À partir des données de puits des forages A157 et A263 (Figure 8).
 - À partir des données de TRT disponibles au sein du bassin sédimentaire des BTSL (Figure 8).

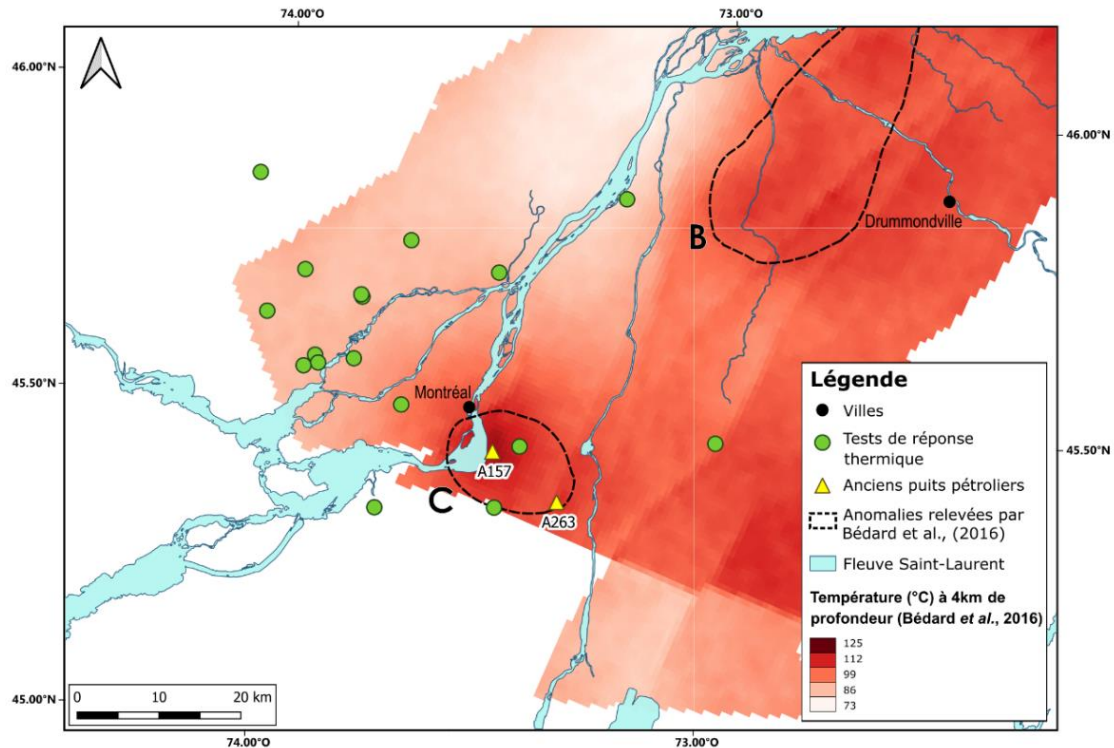


Figure 8 : Carte de la localisation des puits A157 et A263, ainsi que des données de TRT de la zone. (à partir des données de Bédard et al., 2016).

- Identifier les zones réservoirs, les propriétés hydrauliques anticipées et les moyens de stimulation envisageable au sein de chaque anomalie potentielle mentionnée par Richard *et al.*, (2016).
- Déterminer les gammes de température probables des zones réservoirs en fonction des paramètres thermiques.
- Émettre des hypothèses quant à l'origine géologique des anomalies.
- Suggérer des méthodes d'exploitation par systèmes géothermiques avec boucle ouverte ou fermée adaptée au contexte de chacune des anomalies.

5. Méthodologie

5.1. Evaluation du flux de chaleur

Le flux de chaleur terrestre, mesuré en watt par mètre carré ($W m^{-2}$), est la quantité de chaleur transmise à travers une unité de surface pendant une unité de temps. La chaleur étant considérée comme principalement transportée par conduction dans le sous-sol, le flux de chaleur en fond de puits est déterminé en utilisant la loi de Fourier via l'équation suivante :

$$Q_z = \lambda_e \left[\frac{\Delta T}{\Delta z} \right] * 1000 \quad (1)$$

Q_z : flux de chaleur en profondeur ($mW m^{-2}$)

λ_e : conductivité thermique effective ($W m^{-1} K^{-1}$)

$\left[\frac{\Delta T}{\Delta z} \right]$: gradient géothermique ($^{\circ}C m^{-1}$)

Le flux de chaleur en surface est calculé en utilisant la relation suivante (ex : Roy et al., 1968; Jessop, 1990; Jaupart et Mareschal, 2011; Bédard et al., 2016) :

$$Q_0 = Q_z + \left(\frac{A_e * z_{sed}}{2 * 1000} \right) \quad (2)$$

Q_0 : flux de chaleur en surface ($mW m^{-2}$)

Q_z : flux de chaleur en profondeur ($mW m^{-2}$)

A_e : constante de génération de chaleur interne effective ($\mu W m^{-3}$)

z_{sed} : épaisseur des roches sédimentaires entre la surface et la mesure BHT

5.2. Méthodes de correction des températures de fond de puits

Dans le travail de Bédard *et al.*, (2016), la méthode utilisée pour corriger les données de températures de fond de puits est la méthode Harrison. Cette correction est une méthode empirique utilisée pour des profondeurs entre 914 et 3932 mètres qui met en relation la profondeur de la mesure et la température selon l'équation suivante (Harrison *et al.*, 1983) :

$$T_C = T_{BHT} + \Delta T \quad (3)$$

T_C : température corrigée (°C)

T_{BHT} : température mesurée en fond de puit (°C)

ΔT : correction de température (°C)

$$\Delta T = -16.51 + (1.827 \times 10^{-2}z) - (2.345 \times 10^{-6}z^2) \quad (4)$$

ΔT : correction de température à ajouter à la température mesurée (°C)

z : profondeur (m)

Cette méthode ne prend pas en compte le temps écoulé entre la fin des opérations de forage et le moment de la mesure de température. Une autre méthode a été développée par Waples et Ramly (2001) afin de considérer ce paramètre temps :

$$T_C = T_0 + f(T_{BHT} - T_0) \quad (5)$$

T_C : température corrigée (°C)

T_0 : température de surface non perturbée (°C)

f : facteur de correction

T_{BHT} : température mesurée en fond de puit (°C)

$$f = \frac{-0.1462 \times \ln(t) + 1.699}{0.572 \times z^{0.075}} \quad (6)$$

f : facteur de correction

t : temps depuis la fin du forage (h)

z : profondeur (m)

Cette dernière méthode de correction (Waples et Ramly, 2001) sera donc appliquée aux mesures de BHT des forages tel que réalisé par Gascuel *et al.*, (2020), au niveau de chaque site d'intérêt des BTSL mentionnés dans le rapport Richard *et al.*, (2016) ainsi que pour celles du secteur de Brossard (A157 et A263) afin d'y réévaluer le gradient de température. À partir de ce dernier, le flux de chaleur sera calculé en utilisant les équations (1) et (2).

5.3. Utilisation des données de TRT et corrections paléoclimatiques

Dans l'optique de réévaluer le flux de chaleur au niveau de l'*anomalie de Brossard*, ce travail prévoit d'utiliser de nouvelles données en plus de celles précédemment utilisées. En effet, des données de tests de réponse thermique (TRT) sont disponibles dans le secteur de Brossard (Figure 8). Les TRT sont des essais d'injection de chaleur réalisés dans des puits forés pour évaluer les paramètres thermiques du sous-sol avant la conception d'un système géothermique. Ces essais géothermiques permettent de mesurer de façon *in situ* la conductivité thermique effective et sa température. Malgré le caractère superficiel d'un TRT (~150 m), les données qu'il fournit permettent de calculer une estimation du flux de chaleur près de la surface en utilisant la Loi de Fourier via l'équation (1). En effet, grâce aux TRT, dans lesquels un profil de température est mesuré dans les échangeurs de chaleur, on peut obtenir le gradient géothermique au fond du

puits. Toutefois, le profil de température mesuré est de très faible profondeur en comparaison des anomalies de températures d'intérêt situées à plus d'un kilomètre de profondeur. Il est donc nécessaire d'extrapoler le gradient géothermique en profondeur afin d'obtenir les valeurs de températures profondes. Cependant, dans cette partie superficielle du sous-sol (150 m), le gradient géothermique n'est pas à l'équilibre. En effet, les changements climatiques en surface tels que les glaciations ou le réchauffement climatique actuel ont induit une baisse (ou une hausse) de température se propageant aujourd'hui encore dans le sous-sol. Afin d'éviter une sous-estimation (ou surestimation) des températures en profondeur après extrapolation du gradient, il est nécessaire de corriger celui-ci afin d'obtenir un gradient géothermique à l'équilibre. Pour cela, les températures mesurées dans le sous-sol doivent être corrigées des effets des différents événements climatiques passés et actuels afin de pouvoir correctement extrapoler la température à des profondeurs kilométriques, aux niveaux des anomalies positives (ex : Birch, 1948; Jessop, 1990; Jaupart et Mareschal, 2011; etc.). Les effets de ces différentes variations climatiques s'additionnent afin d'obtenir l'effet cumulatif global de la correction à apporter aux données (Jessop, 1971; Beck, 1977; Westaway et Younger, 2013). La première étape de ce travail consistera donc en une compilation des données historiques des variations de température de la région. À partir de ces données, il faut calculer la température à l'équilibre, corriger les effets paléoclimatiques en utilisant les équations suivantes, qui illustrent ici, le cas des corrections des anciennes périodes glaciaires du Canada (ex : Beck, 1977; Jessop, 1990; Jaupart et Mareschal, 2011; Bédard *et al.*, 2016) :

$$T_c = T_m + \Delta T \quad (7)$$

T_c : température non-perturbée (ou corrigée) (°C)

T_m : température mesurée (°C)

ΔT : correction de température (°C)

$$\Delta T = \sum_i (T_i) \times \left(\operatorname{erf} \left(\frac{z}{\sqrt{4\alpha t_{i_1}}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{z}{\sqrt{4\alpha t_{i_2}}} \right) \right) \quad (8)$$

ΔT : correction de température (°C)

T_i : variation moyenne de température entre la période glaciaire et aujourd'hui (5°C)

erf : fonction d'erreur

z : profondeur (m)

α : diffusivité thermique ($1,2 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)

t_{i_1} : fin de la période glaciaire (s)

t_{i_2} : début de la période glaciaire (s)

Une fois la température à l'équilibre, il est alors possible de calculer le gradient géothermique à l'équilibre qui servira finalement à réévaluer le flux de chaleur en surface et les températures en profondeur en prenant également en compte les valeurs de conductivité thermique obtenues grâce aux TRT.

5.4. Identification et optimisation des zones réservoirs

Comme énoncé dans les objectifs de ce travail, les zones réservoirs des différents sites d'anomalie doivent être identifiés afin d'y déterminer les gammes de températures envisageables pour l'implantation d'un système géothermique à boucle ouverte. Les

zones réservoirs potentielles sont des zones dans lesquelles la roche bénéficie de paramètres hydrauliques favorables à la circulation d'eau tels que des valeurs de porosité et de perméabilité élevées. Etant donné la variabilité spatiale de ces paramètres au sein de chaque unité géologique du bassin sédimentaire des BTSL, chaque site sera caractérisé séparément. Pour cela, chaque anomalie identifiée par Richard *et al.*, (2016) se verra associée le (ou les) puits forés dans un rayon de 15 km autour d'elle afin d'en extraire les informations jugées utiles à la détermination de zones réservoirs. Les informations en question pourront être des rapports de forage dans lesquels les zones productrices d'eau et/ou à perméabilité élevée ont été identifiées. Sinon, les zones réservoirs pourront être assimilées à celles ayant fait l'objet d'essai aux tiges ou « drill stem test » (DST). Les DST sont des essais réalisés dans les forages afin de déterminer la pression, la perméabilité et la capacité de production d'une formation considérée comme potentiel réservoir d'hydrocarbures. Ils consistent à isoler hydrauliquement la formation ciblée à l'aide d'obturateurs (ou packers) mis en place entre la tige et la paroi du forage afin de réaliser des essais de pompage/d'injection de fluide au sein de l'intervalle de test (Figure 9). Les formations ciblées par les DST sont donc les zones les plus probables de présenter des propriétés hydrauliques favorables à l'utilisation d'un système géothermique à boucle ouverte au sein d'une unité géologique. Ainsi, la zone jugée comme ayant le meilleur potentiel réservoir sera définie dans deux à trois unités géologiques différentes. Par la suite, ces zones potentiellement productrices feront l'objet d'une étude thermique présentée dans la section ci-après.

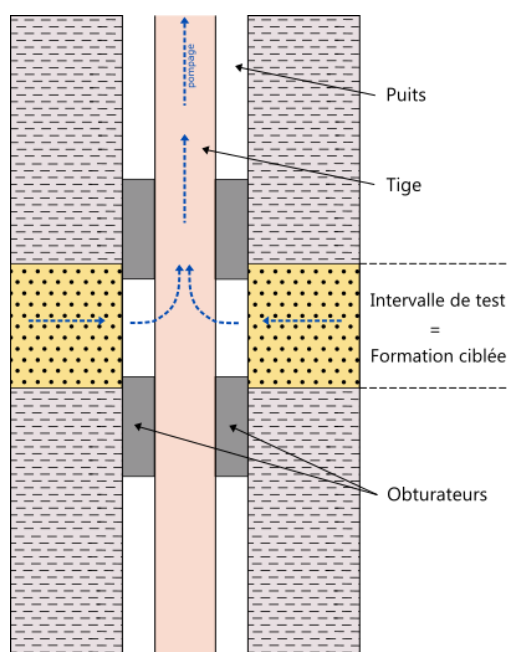


Figure 9: Schéma illustrant le principe de fonctionnement d'un DST (Drill stem test).

Les unités réservoirs potentielles pourraient présenter des valeurs de conductivité hydraulique insuffisantes (perméabilité naturelle initiale faible) pour une exploitation économique de la ressource. Afin de remédier à cela, le développement d'un système géothermique employant des techniques de stimulation pourrait être envisagé. En effet, ces méthodes ont pour but d'augmenter la conductivité hydraulique d'un réservoir dit « non-conventionnel » dont la porosité et la perméabilité initiales sont trop faibles pour en récupérer l'énergie géothermique (Figure 10). Ce travail apportera des suggestions quant aux types de stimulation envisageables (thermique, hydraulique ou chimique) selon la température et la nature des zones réservoirs ciblées (clastiques ou carbonatées). Afin de déterminer la faisabilité du développement d'un système géothermique à boucle ouverte au sein du bassin sédimentaire des BTSL, ce projet tentera d'estimer les gammes de conductivité hydraulique possibles de ces zones réservoirs après stimulation. Ces suggestions s'appuieront sur les informations disponibles dans la littérature concernant

les techniques de stimulation et sur les expériences et résultats acquis dans d'autres bassins sédimentaires considérés comme analogues à notre cas d'étude (exemple : le site de Soultz-sous-Forêts).

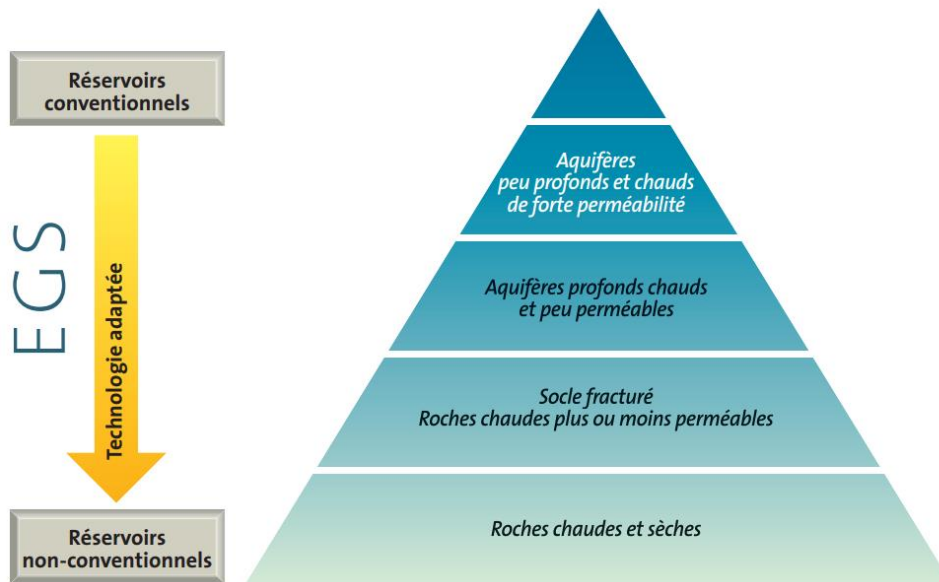


Figure 10: Schéma illustrant l'utilisation de système géothermique stimulé (EGS) selon les propriétés réservoirs de la roche pour l'optimisation de l'exploitation des ressources géothermiques. (Gentier, 2013 - BRGM).

5.5. Détermination des gammes de température possibles

Les gammes de température possibles dans les zones réservoirs seront déterminées de façon à tenir compte des variations spatiales des paramètres thermiques des unités géologiques au sein du bassin sédimentaire des BTSL tels que la conductivité thermique de la roche (Raymond *et al.*, 2019). Pour cela, chaque paramètre thermique impliqué dans le calcul de température en profondeur sera défini selon un intervalle de confiance considérant les valeurs maximums et minimums du paramètre dans l'unité géologique concernée. Ensuite, la température de la zone réservoir sera calculée en tenant compte de cet intervalle de confiance grâce à des simulations de Monte-Carlo réalisées via le logiciel @RISK de la série *Decision Tools Suite* développée par Palisade. La simulation

de Monte-Carlo est une méthode qui permettra l'estimation de la température en utilisant des nombres aléatoires piochés au sein de l'intervalle de confiance de chacun des paramètres thermiques. Faire varier ainsi ces paramètres permettra l'évaluation de la gamme de température possible pour chaque zone ciblée dans les unités géologiques, permettant ainsi l'évaluation du potentiel d'un système à boucle ouverte au niveau de chaque anomalie.

Dans le cas d'un système à boucle fermée, les zones productrices d'énergie thermique ne se limitent pas aux zones perméables. Ainsi, ce genre de système peut prétendre accéder aux plus grandes profondeurs des puits sans contrainte. Dans ce scénario, la gamme de température possible sera estimée en fond de puits, au niveau de la zone de mesure de BHT pour chacun des sites, et ce, de la même manière qu'expliqué précédemment.

5.6. Comparaison du BTSL avec des bassins sédimentaires analogues

Dans le but de comprendre pourquoi de telles anomalies semblent exister au sein du bassin sédimentaire des BTSL, ce travail tentera d'apporter une réponse quant à l'origine géologique de celles-ci. Pour cela, ce bassin sédimentaire sera comparé à d'autres à travers le monde où des études similaires ont été réalisées afin d'y développer des projets d'exploitation de la géothermie profonde (ex : Bassin Rhénan en Europe). En se documentant sur la provenance des anomalies thermiques dans ces bassins sédimentaires et sur leur géologie, il sera possible de proposer des hypothèses sur l'origine de celles comprises au sein du bassin sédimentaire des BTSL et notamment pour le cas de l'*anomalie de Brossard* (ex : circulation de fluides profonds, chambre magmatique/pluton granitique à proximité, croûte continentale amincie, etc.).

6. Échéancier

Le projet, débuté en janvier 2020, sera effectué sur une durée d'un an. Les différentes étapes à réaliser pour l'aboutissement de ce projet ont été réparties tout au long de l'année, le tout en intégrant la rédaction du mémoire à la session automne (Figure 11).

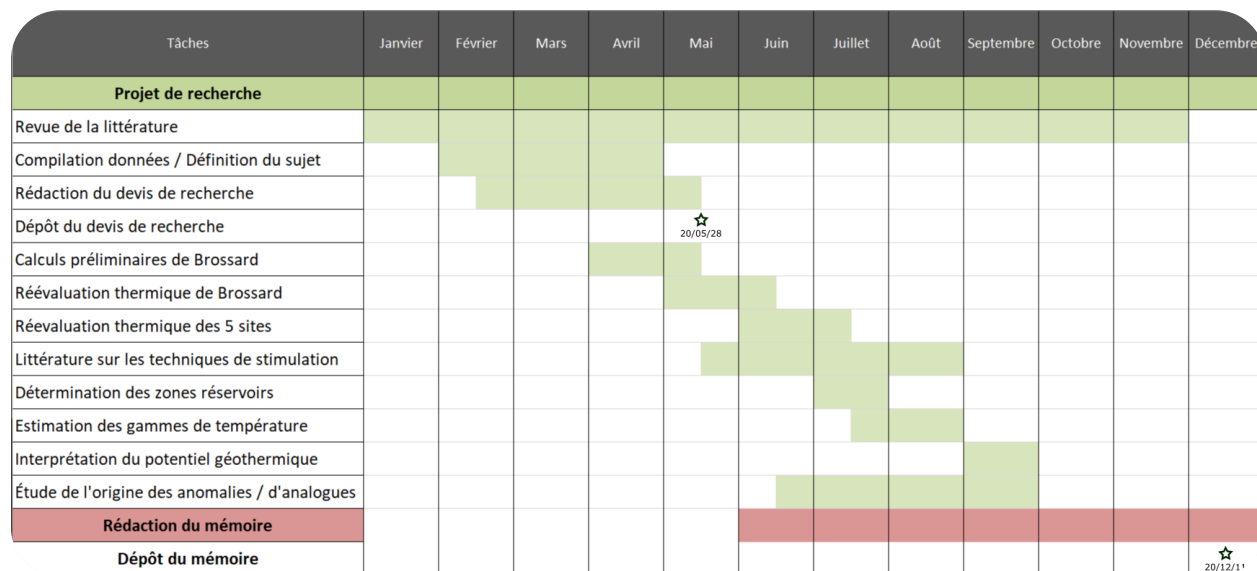


Figure 11: Échéancier - Planification des différentes étapes du projet.

7. Budget

Le projet de recherche nécessite le versement d'une bourse d'étude INRS, l'utilisation d'un ordinateur et de la série de logiciels *Decision Tools Suite*, ainsi qu'une éventuelle participation à un congrès scientifique afin d'y présenter les résultats du projet. Les coûts qu'impliquent ces postes budgétaires sont présentés dans le Tableau 1.

Frais	Montant	Source
Bourse INRS	5 540 \$/trimestre	FRQNT - Jasmin Raymond
Ordinateur	1 200 \$	FRQNT - Jasmin Raymond
Decision Tools Suite 8 Industrial - Student	117,66 \$	FRQNT - Jasmin Raymond
Congrès	700 \$	FRQNT - Jasmin Raymond

Tableau 1: Frais et sources de financement pour la réalisation du projet

8. Conclusion

Ce projet de recherche propose une étude approfondie du potentiel géothermique du bassin sédimentaire des BTSL par l'étude des principales anomalies thermiques qui y sont détectées. Les résultats apporteront des précisions quant au potentiel de production de chaleur directe au sein du bassin et des éléments de réponses vis-à-vis de la faisabilité d'un système à boucle ouverte. La portée de cette étude pourra aller jusqu'à donner des informations concrètes sur les zones à cibler et leur capacité de production pour de futurs projets pilotes visant à exploiter la ressource géothermique du bassin sédimentaire des BTSL. De tels projets pourraient permettre la création de réseaux de chauffage urbain alimentés par l'utilisation de chaleur géothermique mais aussi l'exploitation de la ressource pour un usage industriel au sein de la province de Québec. Par exemple, la ressource géothermique de profondeur intermédiaire (un à trois km) pourrait produire, à l'année, des températures idéales pour le chauffage de serres, permettant ainsi un approvisionnement alimentaire continu et une diminution du chauffage au gaz naturel. D'un point de vue personnel, réaliser ce travail me donne l'opportunité d'enrichir mes connaissances et mon expérience dans le domaine de l'exploration de la ressource géothermique. Il me tient à cœur de mener ce projet à terme car il me permet de participer concrètement au développement de l'énergie géothermique au Québec. Travailler sur ce projet me permet également de découvrir un nouvel environnement de travail au sein d'une équipe pluridisciplinaire et de développer mon sens de l'autonomie.

9. Références

- Bédard, K., Comeau, F.-A., Millet, E., Raymond, J., Malo, M., & Gloaguen, E. (2016). *Évaluation des ressources géothermiques du bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent*. Rapport de recherche 1659, Institut National de la Recherche Scientifique - Centre Eau Terre Environnement, Québec, 100 p. <http://espace.inrs.ca/4845/1/R001659.pdf>.
- Beck, A. E. (1977). Climatically perturbed temperature gradients and their effect on regional and continental heat-flow means. *Tectonophysics*, 41(1–3), 17–39.
- Bédard, K., Comeau, F.-A., Raymond, J., Malo, M., et Nasr, M. (2018). Geothermal Characterization of the St. Lawrence Lowlands Sedimentary Basin, Québec, Canada. *Natural Resources Research*, 27(4), 479–502.
- Bertrand, R., Chagnon, A., Malo, M., Duchaine, Y., Lavoie, D., et Savard, M. M. (2003). Sedimentologic, diagenetic and tectonic evolution of the Saint-Flavien gas reservoir at the structural front of the Quebec Appalachians. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 51(2), 126–154.
- Birch, A. F. (1948). The effects of Pleistocene climatic variations upon geothermal gradients. *American Journal of Science*, 246(12), 729–760.
- Castonguay, S., Dietrich, J., Lavoie, D., et Laliberté, J. Y. (2010). Structure and petroleum plays of the St. Lawrence Platform and Appalachians in southern Quebec: Insights from interpretation of MRNQ seismic reflection data. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 58(3), 219–234.
- Chi, G., Lavoie, D., et Salad Hersi, O. (2000). Dolostone units of the Beekmantown Group in the Montreal area, Quebec : diagenesis and constraints on timing of hydrocarbon activities. *Current Research*, 8 p.
- Comeau, F.-A., Bédard, K., et Malo, M. (2012). *Les régions de Nicolet et de Villeroy: état des connaissances pour la séquestration géologique du CO₂*. Rapport de recherche R1332 (INRSCO2-2012-V1.3), Institut National de la Recherche Scientifique – Centre Eau Terre Environnement, Québec, 52 p. <http://espace.inrs.ca/532/>
- Dietrich, J., Lavoie, D., Hannigan, P., Pinet, N., Castonguay, S., Giles, P., et Hamblin, A. (2011). Geological setting and resource potential of conventional petroleum plays in Paleozoic basins in Eastern Canada. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 59(1), 54–84.
- Gascuel, V., Bédard, K., Comeau, F. A., Raymond, J., & Malo, M. (2020). Geothermal resource assessment of remote sedimentary basins with sparse data: lessons learned from Anticosti Island, Canada. *Geothermal Energy*, 8(1), 1–32.

- Gauchat, L. (2017). *Analyse de la fracturation et de la perméabilité des grès du Groupe de Potsdam face aux ressources géothermiques profondes*. Institut National de la Recherche Scientifique - Centre Eau Terre Environnement, Sciences de la Terre. Québec, Canada. M.Sc.
- Gentier, S. (2013). Les EGS : une méthode d'exploitation géothermique généralisée pour les températures de 130 à 180 °C. *Géosciences*, BRGM, 2013, pp.54-63.
- Grasby, S.E., Allen, D.M., Chen, Z., Ferguson, G., Jessop, A.M., Kelman, M., Ko, M., Majorowicz, J., Moore, M., Raymond, J., Therrien, R. (2011). *Geothermal energy resource potential of Canada*, Geological Survey Canada, Rapport 6914, 322 p.
- Grenier, J.-F. (2014). *Caractérisation pétrographique et pétrophysique du groupe de potsdam dans le forage A203, Basses-Terres du Saint Laurent*. Institut National de la Recherche Scientifique - Centre Eau Terre Environnement, Sciences de la Terre. Québec, Canada. M.Sc.
- Harrison, W. E., Luza, K. V, Prater, M. L., et Reddr, R. J. (1983). *Geothermal resource assessment in Oklahoma*. Oklahoma Geological Survey. Special paper 83-1. 42 p.
- Héroux, Y., Lapalme, R., et Chagnon, A. (1976). *Étude Conclusive des grès de base (Groupe Potsdam) des Basses-terres du Saint-Laurent*. (INRS-Pétrole).
- Jaupart, C., et Mareschal, J.-C. (2011). *Heat generation and transport in the Earth*, Cambridge University Press. Cambridge; New York. 464 p.
- Jessop, A. M. (1990). *Thermal geophysics* (Elsevier), Amsterdam, The Netherlands. 306 p.
- Jessop, A. M. (1971). The Distribution of Glacial Perturbation of Heat Flow in Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8(1), 162–166.
- Jessop, A. M., Allen, V. S., Bentkowski, W., Burgess, M., Drury, M., Judge, A. S., Lewis, T., Majorowicz, J., Mareschal, J.C., et Taylor, A. E. (2005). *The Canadian geothermal data compilation*, Geological Survey of Canada. 1–12.
- Konstantinovskaya, E. A, Rutqvist, J., et Malo, M. (2014). CO2 storage and potential fault instability in the St. Lawrence Lowlands sedimentary basin (Quebec, Canada): Insights from coupled reservoir-geomechanical modeling. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 22, 88–110.
- Konstantinovskaya, E. A., Rodriguez, D., Kirkwood, D., Harris, L. B., et Thériault, R. (2009). Effects of basement structure, sedimentation and erosion on thrust wedge geometry: An example from the Quebec Appalachians and analogue models. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 57(1), 34–62.

- Lo Russo, S., Taddia, G., et Verda, V. (2012). Development of the thermally affected zone (TAZ) around a groundwater heat pump (GWHP) system: A sensitivity analysis. *Geothermics*, 43, 66–74.
- Majorowicz, J., & Minea, V. (2012). Geothermal energy potential in the St-Lawrence River area, Québec. *Geothermics*, 43, 25–36.
- Minea, V., Majorowicz, J. (2011). Assessment of Enhanced Geothermal Systems Potential in Québec, Canada, *AAPG/SPE/SEG HEDBERG Research Conference Enhanced Geothermal Systems*, Napa, California, March 14-18.
- Muffler, L.J.P., (1976). Tectonic and hydrologic control of the nature and distribution of geothermal resources. *Proceedings of Second United Nations Symposium on the Development and use of Geothermal Resources*.
- Nasr, M. (2016). *Évaluation des propriétés thermiques de la séquence des Basses-Terres du Saint-Laurent : Mesures au laboratoire et approche diagaphique*. Institut National de la Recherche Scientifique – Centre Eau Terre Environnement, Sciences de la Terre. Québec, Canada. M.Sc.
- Nasr, M., Raymond, J., Malo, M., et Gloaguen, E. (2018). Geothermal potential of the St. Lawrence Lowlands sedimentary basin from well log analysis. *Geothermics*, 75(July 2017), 68–80.
- Raymond, J., Bédard, K., Comeau, F.-A., Gloaguen, E., Comeau, G., Millet, E., et Foy, S. (2019). A workflow for bedrock thermal conductivity map to help designing geothermal heat pump systems in the St. Lawrence Lowlands, Québec, Canada. *Science and Technology for the Built Environment*, 25(8), 963–979.
- Raymond, J., Malo, M., Comeau, F.-A., Bédard, K., Lefebvre, R., et Therrien, R. (2012). Assessing the geothermal potential of the St. Lawrence Lowlands sedimentary basin in Quebec, Canada. *39th IAH Congress, Niagara Falls, Canada*.
- Richard, M.-A., Comeau, F.-A., Bédard, K. et Malo, M. (2016). *Géothermie profonde : grille de sélection de sites géothermiques*. Rapport public IREQ-2016-0023, Institut de recherché d’Hydro-Québec, Varennes, 78 p.
- Roy, R. F., Blackwell, D. D., et Birch, F. (1968). Heat generation of plutonic rocks and continental heat flow provinces. *Earth and Planetary Science Letters*, 5(C), 1–12.
- Sanford, B. V, et Arnott, R. W. C. (2010). Stratigraphic and structural framework of the Potsdam Group in eastern Ontario, western Quebec, and northern New York State. *Geological Survey of Canada Bulletin, BU 597*, 83.

- Saull, V. A., Clark, T. H., Doig, R. P., et Butler, R. B. (1962). Terrestrial heat flow in the St. Lawrence lowland of Quebec. *Canadian Mining and Metallurgical Bulletin*, 65, 63–66.
- Schmerber, G. (1971). *Étude sédimentologique “Potsdam” - “Potsdam à Utica inclus” - “Kamouraska.”* (SOQUIP, Québec).
- Tran Ngoc, T. D., Lefebvre, R., Konstantinovskaya, E., et Malo, M. (2014). Characterization of deep saline aquifers in the Bécancour area, St. Lawrence Lowlands, Québec, Canada: Implications for CO₂ geological storage. *Environmental Earth Sciences*, 72(1), 119–146.
- Waples, D. W., et Ramly, M. (2001). A statistical method for correcting log-derived temperatures. *Petroleum Geoscience*, 7(3), 231–240.
- Westaway, R., et Younger, P. L. (2013). Accounting for palaeoclimate and topography: A rigorous approach to correction of the British geothermal dataset. *Geothermics*, 48, 31–51.
- Wilmarth, M., et Stimac, J. (2015). Power Density in Geothermal Fields. *Proceedings World Geothermal Congress, Melbourne, Australia, (April)*, 1–7.