

**RESSOURCES ÉNERGÉTIQUES DES  
BASSINS SÉDIMENTAIRES**

**GROUPE DE RECHERCHE**

**INRS**  
UNIVERSITÉ DE QUÉBEC



**Simulation géostatistique de la conductivité thermique : application à une  
région de la communauté métropolitaine de Montréal**

**RAPPORT FINAL**

**Par**

**Lorenzo Perozzi,**

**Jasmin Raymond,**

**Simon Asselin,**

**Erwan Gloaguen,**

**Michel Malo**

**et**

**Carl Bégin**

**Mars 2016 – Québec**

**R1663**

Institut national de la recherche scientifique – Centre Eau Terre Environnement, 490 de la Couronne, Québec, Qc, G1K 9A9

Téléphone : (418) 654-2535 ; Télécopieur : (418) 654-2600

© INRS, Centre - Eau Terre Environnement, 2015  
Dépôt légal, Bibliothèque nationale du Québec  
Dépôt légal, Bibliothèque et archives Canada  
ISBN : 978-2-89146-860-2

## Résumé

Des essais de conductivité thermique, appelés tests de réponse thermique (TRT), sont couramment utilisés pour mesurer la conductivité thermique du sous-sol par la circulation d'un fluide dans un échangeur de chaleur. Ce type d'essai est réalisé à l'échelle d'un site pour la conception d'un seul système dédié à un bâtiment commercial incluant plusieurs forages et est trop dispendieux pour les systèmes résidentiels. Une méthode pour adéquatement extrapoler la conductivité thermique entre les points de mesure a été développée afin d'étendre les évaluations ponctuelles procurées par les tests de réponse thermique à l'ensemble d'une zone urbaine.

De plus, dans ce travail, les essais d'injection de chaleur ont été réalisés avec des câbles chauffants. Cette méthode d'essai est moins dispendieuse qu'un test conventionnel puisque l'appareil est opéré avec une source de basse puissance et permet d'identifier la conductivité thermique selon les couches de matériaux géologiques. Quatre tests ont été réalisés dans une région au nord de la communauté métropolitaine de Montréal dans des forages installés par Marmott Énergies, afin de mesurer la conductivité thermique du roc avec dix à quinze points de mesure par forage. Dix échantillons d'affleurements ont aussi fait l'objet de mesures de la conductivité thermique en laboratoire pour compléter les mesures des forages.

Des simulations géostatistiques ont été effectuées en fonction des unités thermostratigraphiques afin de déterminer la distribution spatiale et l'incertitude de la conductivité thermique au niveau du roc pour une région de 350 km<sup>2</sup>. Les résultats obtenus avec les simulations séquentielles gaussiennes sont présentés sous la forme d'une application web interactive afin d'identifier la conductivité thermique du roc. L'application peut être utilisée pour faciliter le dimensionnement des systèmes de pompes à chaleur géothermique pour les bâtiments résidentiels.



## Table de matières

<b>Résumé .....</b>	<b>2</b>
<b>Table de matières.....</b>	<b>4</b>
<b>Liste des figures.....</b>	<b>4</b>
<b>Liste des tableaux.....</b>	<b>4</b>
<b>1 Introduction.....</b>	<b>6</b>
<b>2 Méthodologie .....</b>	<b>8</b>
<b>2.1 Essais de conductivité thermique en forage avec un câble chauffant .....</b>	<b>8</b>
<b>2.2 Essais de conductivité thermique en laboratoire.....</b>	<b>8</b>
<b>2.3 Simulations géostatistiques de la conductivité thermique .....</b>	<b>9</b>
2.3.1 Les simulations séquentielles gaussiennes .....	9
2.3.2 Application à une région au nord de la communauté métropolitaine de Montréal .....	10
<b>3 Résultats.....</b>	<b>14</b>
<b>4 Conclusions.....</b>	<b>18</b>
<b>5 Références.....</b>	<b>20</b>

## Liste des figures

FIGURE 1: SCHÉMA DU FONCTIONNEMENT DE L'ALGORITHME SGS. ....	11
FIGURE 2: DISTRIBUTION SPATIALE DES DONNÉES UTILISÉES POUR LES SIMULATIONS SGS. ....	12
FIGURE 3: RÉALISATION STOCHASTIQUE. ....	15
FIGURE 4: MOYENNE DES RÉALISATIONS. ....	16
FIGURE 5: ÉCART-TYPE DES RÉALISATIONS. ....	17

## Liste des tableaux

TABLEAU 1: DONNÉES UTILISÉES POUR LES SIMULATIONS GÉOSTATISTIQUES .....	10
TABLEAU 2: MOYENNE ET ÉCART-TYPE DES DISTRIBUTIONS DES UNITÉS THERMOSTRATIGRAPHIQUES DANS LA ZONE D'ÉTUDE .....	11



## 1 Introduction

L'utilisation de l'énergie géothermique exige une estimation fiable du risque d'échec en ce qui concerne l'exploration et le développement des réservoirs géothermiques, tant pour la géothermie profonde que pour la géothermie superficielle. Le risque d'échec principal en géothermie superficielle est relié à l'incertitude sur la conductivité thermique des matériaux géologiques. Une estimation erronée de la conductivité thermique peut entraîner une mauvaise évaluation de la longueur des échangeurs de chaleur qui suffiront au besoin énergétique d'un bâtiment (Bernier 2000). Les échangeurs de chaleur étant la partie la plus dispendieuse d'un système géothermique, l'estimation de la conductivité thermique du sous-sol a une incidence directe sur les performances du système et sur la rentabilité d'une entreprise qui fournit l'énergie géothermique à ses clients comme Marmott Énergies.

En effet, Marmott Énergies est une entreprise qui fournit de l'énergie géothermique à l'aide d'infrastructures qu'elle installe chez ses clients. Pour ce faire, l'entreprise conçoit, installe, exploite et entretient, à ses frais, des systèmes géothermiques résidentiels. En contrepartie, les clients de l'entreprise versent une redevance mensuelle compétitive. Bien qu'elle intervienne sur l'ensemble du territoire québécois, à cette étape de son développement l'entreprise vise majoritairement le marché résidentiel de la Communauté métropolitaine de Montréal dont le sous-sol est principalement constitué de calcaires, dolomies et shales des groupes de Trenton, Black River, Chazy et Beekmantown. La distribution spatiale de la conductivité thermique de ces matériaux demeure méconnue.

L'utilisation des simulations géostatistiques s'avère être un outil qui permet à la fois d'estimer la distribution spatiale des conductivités thermiques, mais aussi d'en quantifier leur incertitude. Par conséquent, la longueur des échangeurs de chaleur peut être évaluée avec plus de précision et les coûts d'installation des systèmes peuvent être mieux optimisés.

La méthode développée dans ce projet servira d'exemple à Marmott Énergies qui désire prendre de l'expansion vers d'autres villes du Québec. Le projet, réalisé dans le cadre d'une subvention d'engagement partenarial pour les universités (SEP) du conseil de recherches en

sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG), s'inscrit dans l'axe de recherche *Gestion intégrée des ressources hydriques et minérales et aménagement du territoire*, un axe identifié comme étant stratégique pour le Centre Eau Terre Environnement de l'INRS.



## 2 Méthodologie

### 2.1 Essais de conductivité thermique en forage avec un câble chauffant

Typiquement, les méthodes pour inférer la conductivité thermique impliquent l'utilisation de tests de réponse thermique (TRT) (Ghelin 2002; Raymond et al. 2011; Rainieri et al. 2011; Pasquier 2015). Les appareils pour effectuer ces tests sont généralement encombrants et requièrent une source de haute puissance.

Récemment, une nouvelle méthode de TRT qui emploie une source de faible puissance et qui permet d'estimer la conductivité thermique à différentes profondeurs a été développée (Raymond et al. 2010; Raymond & Lamarche 2014; Raymond et al. 2015).

L'idée derrière cette méthode est de combiner les sondes de mesure avec les câbles chauffants utilisés dans les puits d'exploration et de les adapter afin d'être utilisées dans les échangeurs de chaleur avant leur mise en service. Les sondes peuvent fournir une mesure de la conductivité thermique en utilisant une source de basse puissance. Cependant les tests doivent être répétés à différentes profondeurs. Pour des forages de 150 m de longueur, cette méthode prévoit d'utiliser des sections de câbles chauffants et non chauffants installées dans les échangeurs de chaleur. Dans le cadre de ce projet, comme la longueur moyenne des forages effectués est de 45 m, des câbles chauffants continus ont été utilisés.

### 2.2 Essais de conductivité thermique en laboratoire

Pour compléter les mesures en forage, quelques échantillons provenant d'affleurements dans la région d'étude ont été analysés en laboratoire avec l'appareil TCi de C-Therm pour mesurer la conductivité thermique (C-Therm TCi, C-Therm Technologies Ltd., Fredericton, Canada). Cet appareil utilise la technique de la source plane transitoire modifiée. Un capteur et réflecteur thermique unilatéral émet une source de chaleur constante et passagère sur l'échantillon. La conductivité et l'effusivité thermiques sont mesurées directement et rapidement, offrant un aperçu d'ensemble détaillé des caractéristiques thermiques de l'échantillon.

Le Tableau 1 résume les propriétés des données mesurées dans les forages et sur les affleurements. Il est important de souligner que pour les forages, la valeur de conductivité thermique représente une moyenne des valeurs mesurées au niveau du roc, tandis que les mesures de laboratoire sont faites sur des affleurements de surface. On utilise ces données pour effectuer des simulations géostatistiques de la conductivité thermique et produire des cartes 2D des valeurs du roc. La conductivité thermique réelle peut cependant être influencée par l'épaisseur des dépôts meubles qui recouvrent le roc.

## 2.3 Simulations géostatistiques de la conductivité thermique

### 2.3.1 Les simulations séquentielles gaussiennes

Au cours des 20 dernières années, les algorithmes de simulation stochastique sont devenus populaires pour générer des modèles numériques qui permettent de représenter l'hétérogénéité de la sous-surface (Dubrule 1989; Caers 2005; Doyen 2007). L'idée de base est de générer plusieurs modèles qui imitent la variabilité spatiale attendue dans le réservoir.

Un algorithme de simulation très largement employé est connu sous le nom de simulation séquentielle gaussienne (SGS). Il permet de générer des réalisations gaussiennes continues de la variable d'intérêt (Journel & Huijbregts 1978; Goovaerts 1997). Vogt et al. (2010) ont utilisé cette approche pour réduire les incertitudes sur la température dans un réservoir géothermique profond.

L'idée de base de l'algorithme SGS est illustrée dans la Figure 1. On assume qu'on connaît deux valeurs de conductivité thermique  $x_1$  et  $x_2$ . On choisit, de façon aléatoire, le prochain pixel à simuler ( $x_6$ ) (1). On calcule l'estimateur ( $x_i^{sk}$ ) et la variance ( $\sigma_i^{sk}$ ) par krigeage (2) en utilisant les données statiques et les données simulées aux étapes précédentes. On tire une valeur aléatoire parmi la distribution gaussienne définie à l'étape précédente (3). La valeur simulée est assignée au pixel et incorporée aux valeurs simulées précédemment, afin de calculer une nouvelle distribution de krigeage (4). On revient à (1) pour simuler le prochain pixel et on exécute l'algorithme jusqu'à ce que tous les pixels soient simulés. L'étape (4) de l'algorithme

est fondamentale pour s'assurer que les réalisations soient spatialement corrélées. Plusieurs réalisations équiprobables peuvent être simulées en modifiant aléatoirement le chemin de visite des pixels et en changeant le générateur de nombres aléatoires.

Tableau 1: Données utilisées pour les simulations géostatistiques

Latitude	Longitude	Conductivité thermique (W/mK)	Unité thermostratigraphique	
45.519249	-73.652824	2.10	T-BR-C <sup>1</sup>	Affleurement
45.519249	-73.652824	2.22	T-BR-C	Affleurement
45.547637	-73.696752	2.90	T-BR-C	Affleurement
45.60307	-73.656963	2.90	T-BR-C	Affleurement
45.604803	-73.659649	3.15	T-BR-C	Affleurement
45.605735	-73.661411	2.31	T-BR-C	Affleurement
45.60307	-73.656963	2.60	T-BR-C	Affleurement
45.602381	-73.658056	2.93	T-BR-C	Affleurement
45.50964	-73.627682	2.24	T-BR-C	Affleurement
45.604803	-73.659649	2.16	T-BR-C	Affleurement
45.511454	-73.6518	2.39	T-BR-C	Forage
45.504581	-73.65772	2.39	T-BR-C	Forage
45.516988	-73.648486	2.81	T-BR-C	Forage
45.527392	-73.855424	4.20	Beauharnois	Forage

<sup>1</sup> T-BR-C : Trenton – Black River – Chazy

### 2.3.2 Application à une région au nord de la communauté métropolitaine de Montréal

Des travaux récents de laboratoire ont été réalisés pour évaluer le potentiel géothermique des Basses-Terres du Saint-Laurent (BTSL) (Sirois et al. 2015; Nasr et al. 2015). Les résultats ont montré que les unités géologiques des BTSL peuvent être regroupées en unités thermostratigraphiques semblables selon leur potentiel géothermique. Dans la zone à l'étude, on retrouve deux de ces unités thermostratigraphiques : l'unité composée des groupes de Trenton, Black River et Chazy réunis (T-BR-C), et l'unité constituée de la Formation de

Beauharnois (Figure 2).

L'objectif du projet était de produire une carte de la conductivité thermique au niveau du roc. On a ainsi appliqué l'algorithme SGS avec les données de conductivité thermique mesurées lors des essais dans les forages et sur les affleurements. Étant donné la faible couverture spatiale de ces données (Figure 2), des points supplémentaires ont été simulés en utilisant la distribution (moyenne et variance) des conductivités thermiques mesurées pour les deux unités thermostratigraphiques présentes dans la zone d'étude (Figure 2).

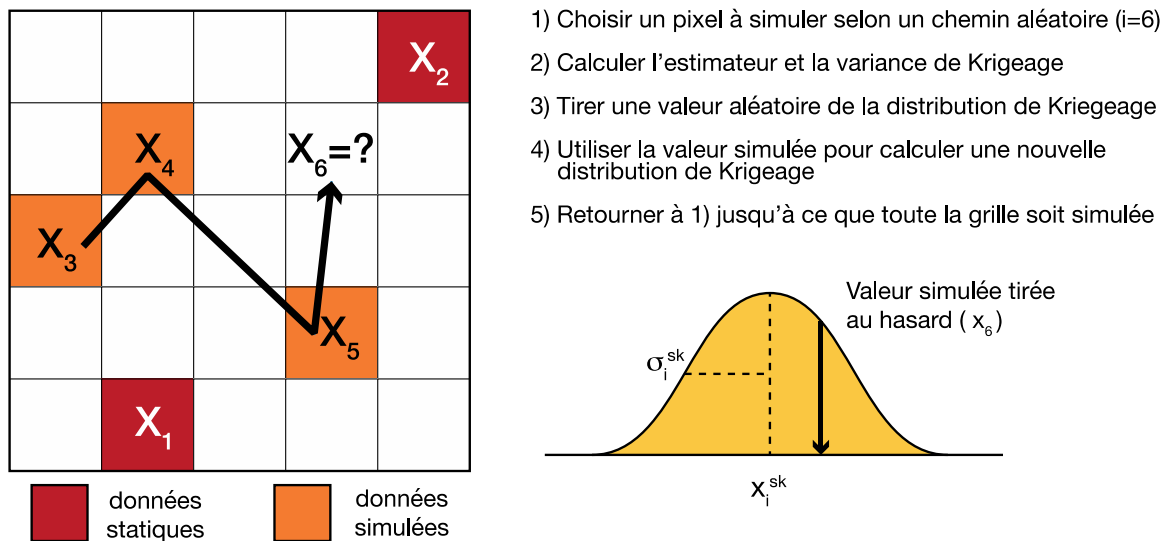


Figure 1: Schéma du fonctionnement de l'algorithme SGS.

Tableau 2: Moyenne et écart-type des distributions des unités thermostratigraphiques dans la zone d'étude

Unité thermo.	N	Conductivité thermique (W/mK)	
		Moyenne ( $\mu$ )	Écart-type ( $\sigma$ )
Trenton, Black River, Chazy	23	2.67	0.44
Beauharnois	6	3.40	0.55

Le Tableau 2 résume les propriétés des distributions des valeurs de conductivité thermique pour les unités thermostratigraphiques de T-BR-C et de Beauharnois.

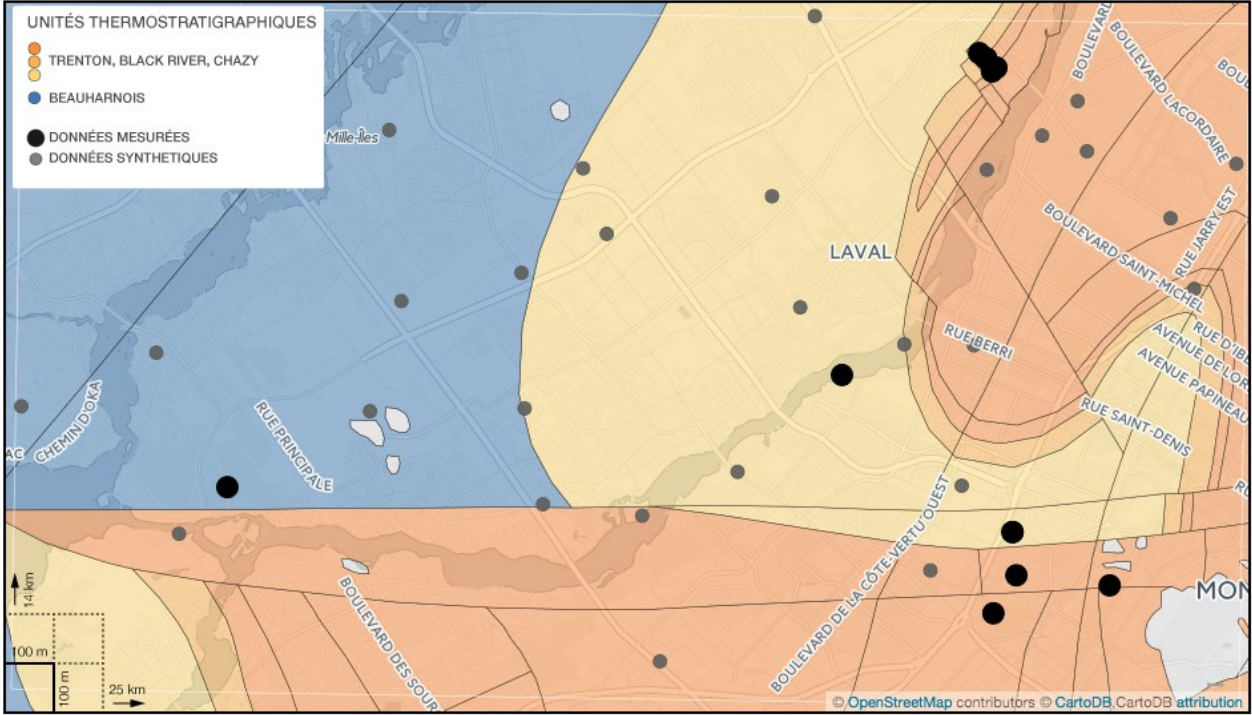
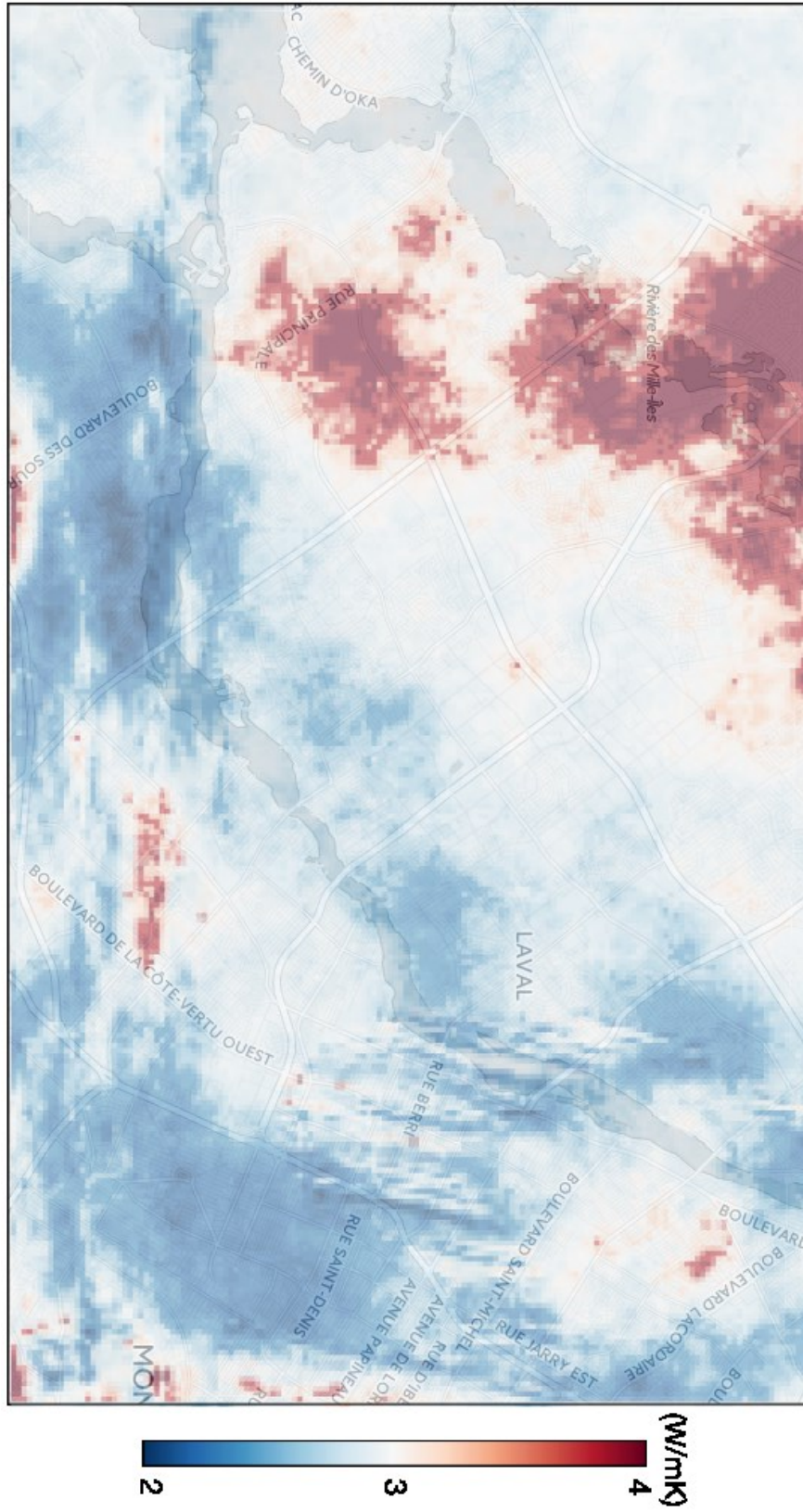


Figure 2: Distribution spatiale des données utilisées pour les simulations SGS.



### 3 Résultats

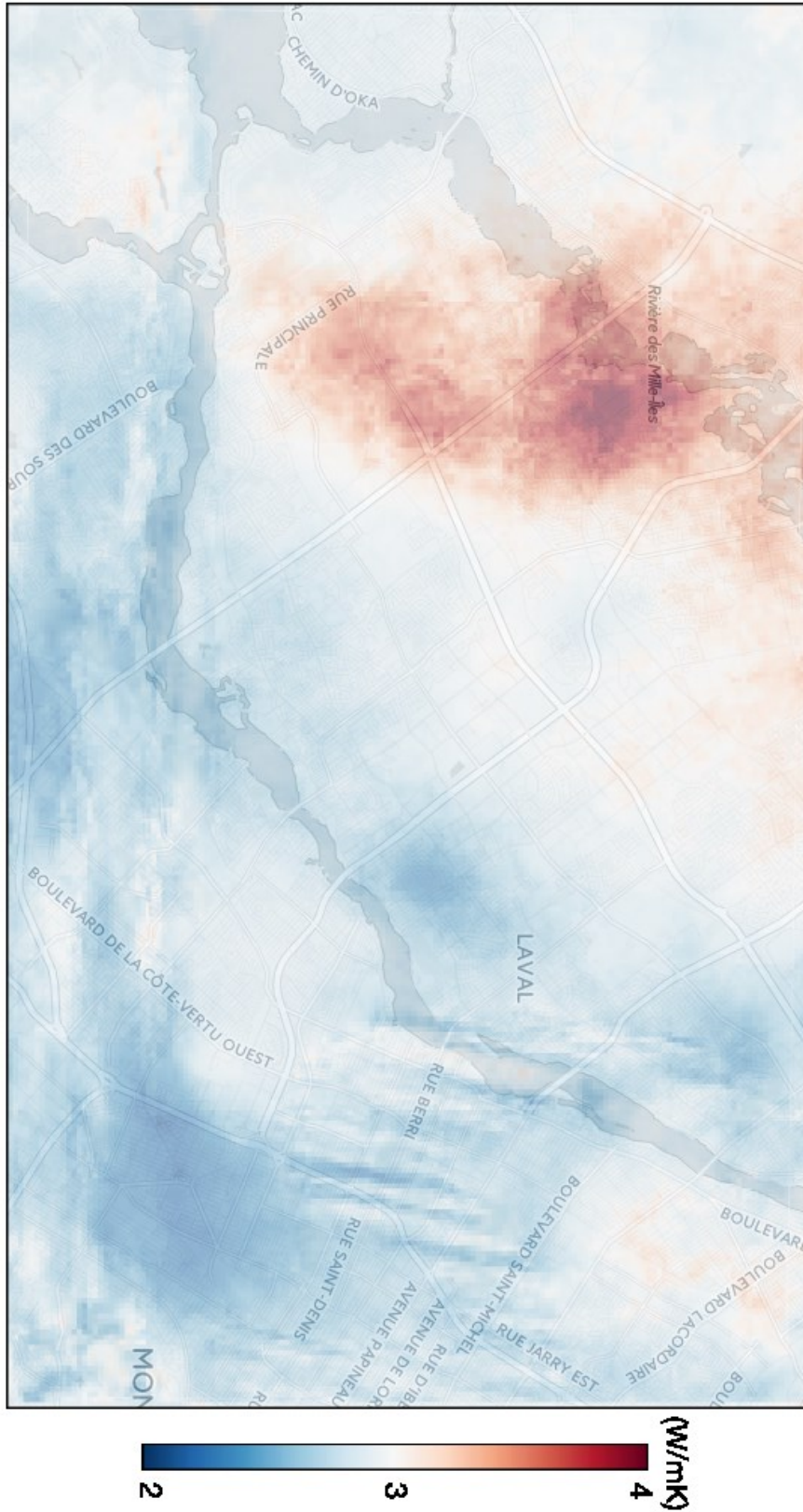
Les figures suivantes montrent le résultat des simulations de conductivité thermique en utilisant l'algorithme SGS. La zone d'étude a été divisée en 35000 pixels de 100 x 100 m chacun. Dix réalisations équiprobables ont été produites. La Figure 3 montre le résultat d'une réalisation tandis que la Figure 4 montre la moyenne des 10 réalisations. Sur les deux cartes, on peut remarquer que dans la région nord-ouest on retrouve des conductivités thermiques plus élevées ( $> 3$  W/mK). Cette zone est en effet associée à l'unité thermostratigraphique de Beauharnois qui a un potentiel géothermique plus élevé que l'unité de T-BR-C qui couvre le reste de la carte (Figure 2). Il est important de souligner que la moyenne des simulations lisse les valeurs; ces dernières sont en effet centrées autour de la moyenne en cachant les valeurs extrêmes. L'objectif des simulations stochastiques est de produire plusieurs réalisations équiprobables afin d'explorer les régions où l'on retrouve les valeurs de conductivité thermique les plus élevées, lesquelles sont les plus intéressantes pour le déploiement de la géothermie résidentielle, mais aussi d'évaluer la variabilité des valeurs. Pour cette raison, la carte des écarts-types (Figure 5) s'avère être un outil intéressant, car elle permet de quantifier l'incertitude liée à la conductivité thermique simulée.



Réalisation stochastique

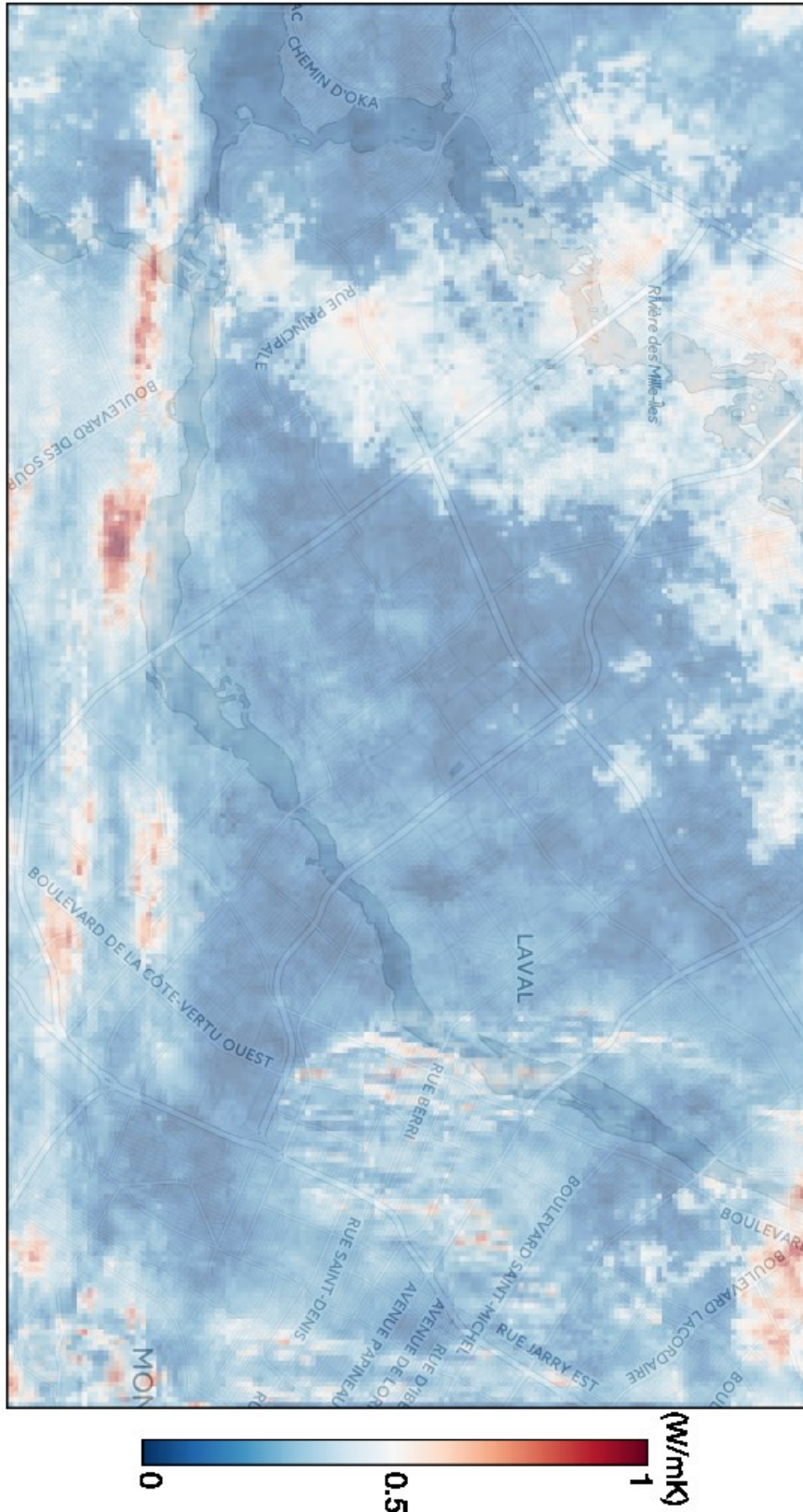
Figure 3: Réalisation stochastique.





**Moyenne des réalisations**

Figure 4: Moyenne des réalisations.



Écart-type des réalisations

Figure 5: Écart-type des réalisations.

## 4 Conclusions

Ce travail a permis de produire des cartes 2D de la conductivité thermique du roc à partir de tests de réponse thermique innovateurs et en utilisant des simulations géostatistiques stochastiques pour extrapoler les résultats. Les cartes produites permettent de déterminer la distribution spatiale ainsi que d'évaluer l'incertitude de la conductivité thermique.

Lors de l'estimation de la longueur des échangeurs de chaleur, il faut tenir compte de l'épaisseur et de la conductivité thermique des dépôts meubles qui reposent sur le roc afin d'estimer une conductivité thermique globale. En effet, la conductivité thermique globale  $\lambda$  (W/mK) doit être pondérée selon la formule suivante :

$$\lambda = \lambda_{DM} \cdot \frac{e_{DM}}{L_{forage}} + \lambda_{ROC} \cdot \frac{e_{ROC}}{L_{forage}},$$

où  $e$  représente l'épaisseur (m),  $L$  la longueur (m) du forage et l'indice  $DM$  les dépôts meubles.

Une application web a été conçue afin de représenter les cartes 2D de conductivité thermique du roc de manière interactive. Cet outil facilite l'exploration des régions avec le plus grand potentiel géothermique et donc permet d'évaluer les coûts et les risques associés à l'installation et l'exploitation de nouveaux systèmes de pompes à chaleur géothermique pour le secteur résidentiel.

De plus, les cartes peuvent être facilement mises à jour au fur et à mesure que de nouveaux tests de réponse thermique seront effectués. Dans une vision à long terme, l'idée est d'intégrer de nouvelles mesures et les données existantes de TRT dans les simulations de conductivité thermique ce qui permettrait de :

- **réduire l'incertitude des simulations** : les nouveaux forages pourraient être effectués dans les régions où l'incertitude est plus élevée;
- **étendre la couverture spatiale des simulations** : l'intégration de mesures existantes de conductivité thermique à partir des mesures de TRT permettrait d'obtenir des

distributions de la conductivité thermique pour d'autres régions de la communauté métropolitaine de Montréal ou pour d'autres villes du Québec.

## 5 Références

- Bernier, M., 2000. Review of the cylindrical heat source method for the design and analysis of vertical ground-coupled heat pump systems. *Fourth International Conference on Heat Pumps in Cold Climates*.
- Caers, J., 2005. Petroleum Geostatistics. *SPE*.
- Doyen, P.M., 2007. Seismic Reservoir Characterization: An Earth Modelling Perspective. *EAGE*.
- Dubrule, O., 1989. A Review of Stochastic Models for Petroleum Reservoirs. In M. Armstrong, ed. *Quantitative Geology and Geostatistics*. Dordrecht: Springer Netherlands, pp. 493–506.
- Ghelin, S., 2002. *Thermal Response Test. Method Development and Evaluation*. Lulea University of Technology.
- Goovaerts, P., 1997. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*, Oxford University Press.
- Journel, A.G. & Huijbregts, C.J., 1978. *Mining Geostatistics*, New York: Academic Press.
- Nasr, M., Raymond, J. & Malo, M., 2015. Évaluation en laboratoire des caractéristiques thermiques du bassin sédimentaire des Basses-Terres du Saint-Laurent. *68<sup>th</sup> Canadian Geotechnical Conference and 7th Canadian Permafrost Conference*. Québec, pp. 1–8.
- Pasquier, P., 2015. Stochastic interpretation of thermal response test with TRT-SInterp. *Computers & Geosciences*, 75, pp.73–87.
- Rainieri, S., Bozzoli, F. & Pagliarini, G., 2011. Modeling approaches applied to the thermal response test: A critical review of the literature. *HVAC&R Research*, 17(6), pp.977–990.
- Raymond, J. et al., 2010. A Novel Thermal Response Test Using Heating Cables. *World Geothermal Congress*. Bali, Indonesia.
- Raymond, J. et al., 2011. A Review of Thermal Response Test Analysis Using Pumping Test Concepts. *Ground Water*, 49(6), pp.932–945.
- Raymond, J. & Lamarche, L., 2014. Development and numerical validation of a novel thermal response test with a low power source. *Geothermics*, 51, pp.434–444.
- Raymond, J., Lamarche, L. & Malo, M., 2015. Field demonstration of a first thermal response test with a low power source. *Applied Energy*, 147, pp.30–39.
- Sirois, C. et al., 2015. Mapping the geoexchange potential of the St. Lawrence Lowlands from thermal conductivity measurements of rocks samples. *Réunion conjointe AGC-AGU-AMC-*

UGC. Montréal.

Vogt, C. et al., 2010. Reducing temperature uncertainties by stochastic geothermal reservoir modelling. *Geophysical Journal International*, 181(1), pp.321–333.