

Cartographie de la conductivité thermique des Basses-Terres du Saint-Laurent

Karine Bédard, Félix-Antoine Comeau, Jasmin Raymond, Erwan Gloaguen (INRS)
Guillaume Comeau, Emmanuelle Millet, Stefan Foy (SNC-Lavalin)

Mai 2018

Rapport INRS — R1789

Table des matières

Avant-propos.....	2	Diagraphies – Théorie λ_{roc}	14
Mise en garde.....	2	Diagraphies – λ_{roc} par unité thermique.....	15
Mise en contexte.....	3	Comparaison et qualité de λ_{roc} des différentes sources.....	16
Problématique.....	3	Simulation de λ_{roc} sur le territoire – Théorie.....	17
Objectifs.....	3	Simulation de λ_{roc} sur le territoire des BTSL – Paramètres.....	18
Géologie générale – Localisation.....	4	Simulation de λ_{roc} sur le territoire des BTSL – Résultats.....	19
Géologie générale – Stratigraphie.....	5	Simulation de λ_{roc} sur le territoire des BTSL – Incertitude.....	21
Source des données de conductivité thermique (λ).....	6	Simulation de λ_{roc} dans la région de Montréal – Paramètres.....	23
TRT – Théorie.....	7	Simulation de λ_{roc} dans la région de Montréal – Résultats.....	24
TRT – Source des données.....	8	Simulation de λ_{roc} dans la région de Montréal – Incertitude.....	26
TRT – Conductivité thermique des dépôts meubles (λ_{DM}).....	9	Utilisation des résultats.....	28
TRT – Conductivité thermique du roc (λ_{roc}).....	10	Exemple de carte d'épaisseur des dépôts meubles.....	29
Échantillons – Théorie λ_{roc}	12	Conclusions et perspectives.....	30
Échantillons – λ_{roc} par unité thermique.....	13	Remerciements.....	30
		Références.....	31

Avant-propos

Ce projet de recherche est issu d'une collaboration entre le Centre Eau Terre Environnement de l'Institut national de la recherche scientifique (INRS) et SNC-Lavalin Québec réalisée dans le cadre d'une Subvention d'engagement partenarial (SEP) du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG).

Mise en garde

Les cartes de conductivité thermiques produites dans ce projet ont été produites à l'échelle de la région des Basses-Terres du Saint-Laurent et de la grande région de Montréal. Elles doivent donc être utilisées avec prudence et en connaissance des limites associées à une évaluation régionale qui peut différer d'une évaluation locale de la conductivité thermique.

© INRS, Centre - Eau Terre Environnement, 2018

Tous droits réservés

ISBN : 978-2-89146-903-6 (version électronique)

Dépôt légal - Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2018

Dépôt légal - Bibliothèque et Archives Canada, 2018

Mise en contexte

Une réduction des émissions de gaz à effet de serre serait accélérée au Canada par une augmentation du taux de pénétration des systèmes de pompes à chaleur géothermique dans le marché du chauffage et de la climatisation. Après l'Ontario, le deuxième marché le plus important pour les pompes à chaleur géothermique canadiennes se situe au Québec (CCÉG, 2012). La région occupée par le bassin sédimentaire des Basses-Terres du Saint-Laurent (BTSL) constitue la zone la plus densément peuplée de la province. Cette région s'étend sur une vingtaine de kilomètres de part et d'autre du fleuve Saint-Laurent, entre Québec et Montréal.

SNC-Lavalin est une entreprise d'ingénierie et de construction qui effectue différents projets d'efficacité énergétique dans les bâtiments. L'entreprise a également une division Environnement et géosciences qui possède une expertise au niveau du sous-sol et de la gestion environnementale des eaux souterraines. Cette dernière division vise l'amélioration de ses services en efficacité énergétique des bâtiments, notamment en ce qui a trait au marché des pompes à chaleur géothermique.

Problématique

Le développement du marché des pompes à chaleur géothermique implique l'évaluation de la distribution de la conductivité thermique du sous-sol peu profond (< 150 m) afin d'améliorer les études de pré faisabilité visant l'installation d'un système de pompes à chaleur géothermique. En l'absence de données, un test de réponse thermique (TRT) est effectué (Raymond *et al.*, 2011). Ces tests sont dispendieux et conduisent les propriétaires de bâtiments à parfois renoncer à l'installation d'un système géothermique.

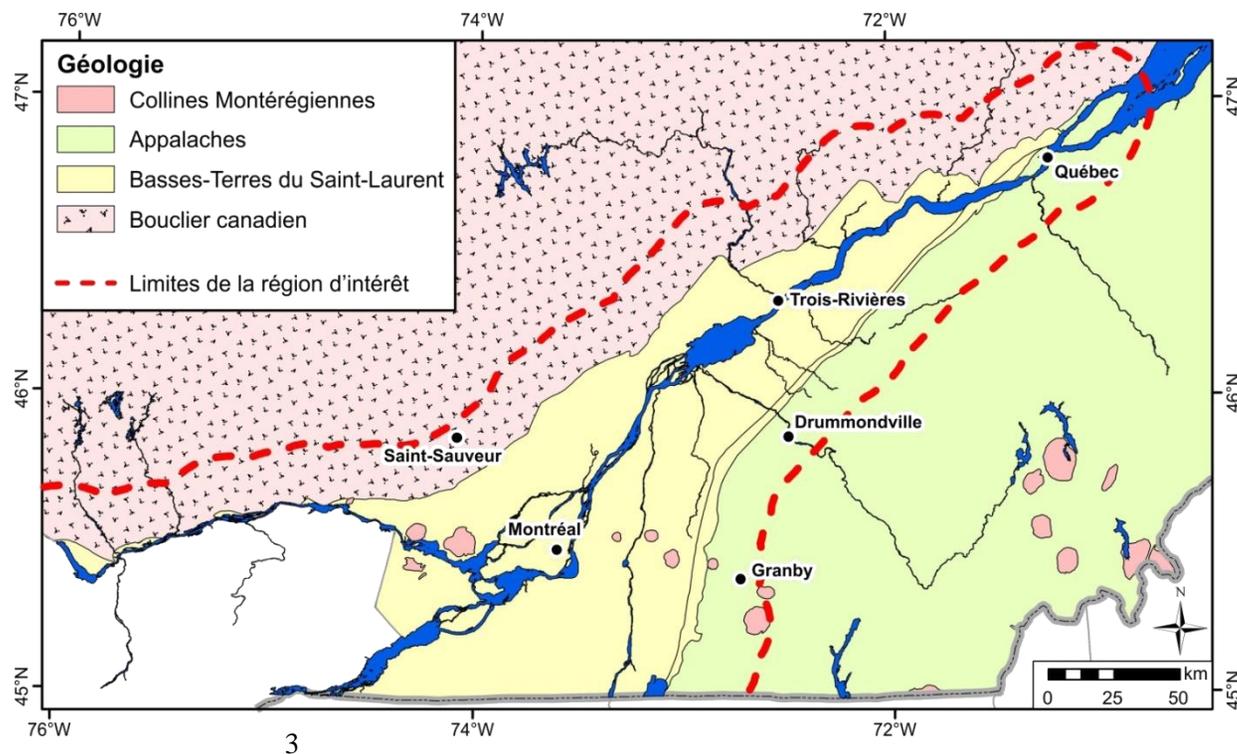
L'incertitude associée au dimensionnement des échangeurs de chaleur géothermique serait réduite avec une meilleure connaissance des propriétés thermiques du sous-sol, ce qui permettrait de mieux évaluer le coût d'installation des systèmes et d'augmenter la compétitivité du marché de la géothermie. Des études locales ont déjà été réalisées (ex. Talbot Poulin *et al.*, 2013; Perozzi *et al.*, 2016) mais aucune n'existe à l'échelle du bassin.

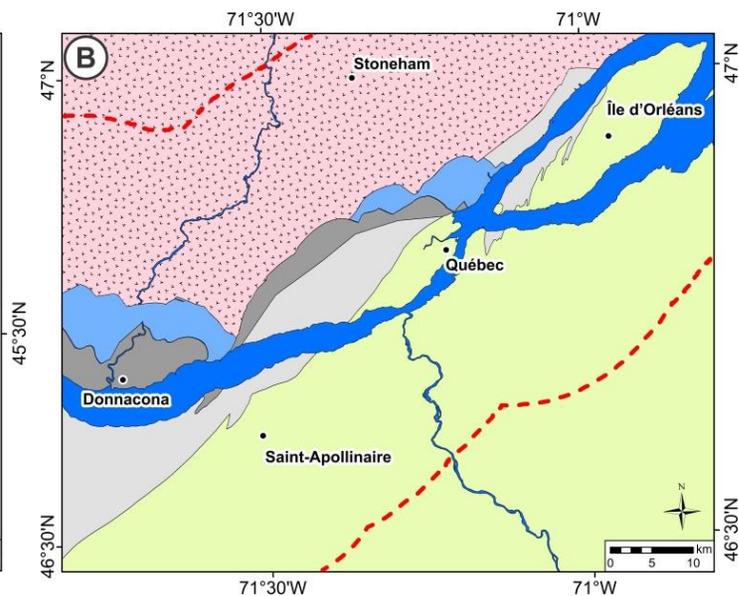
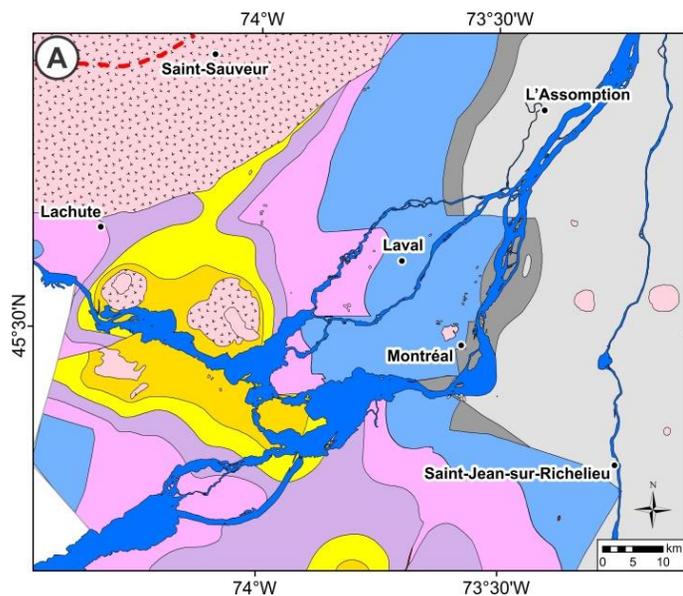
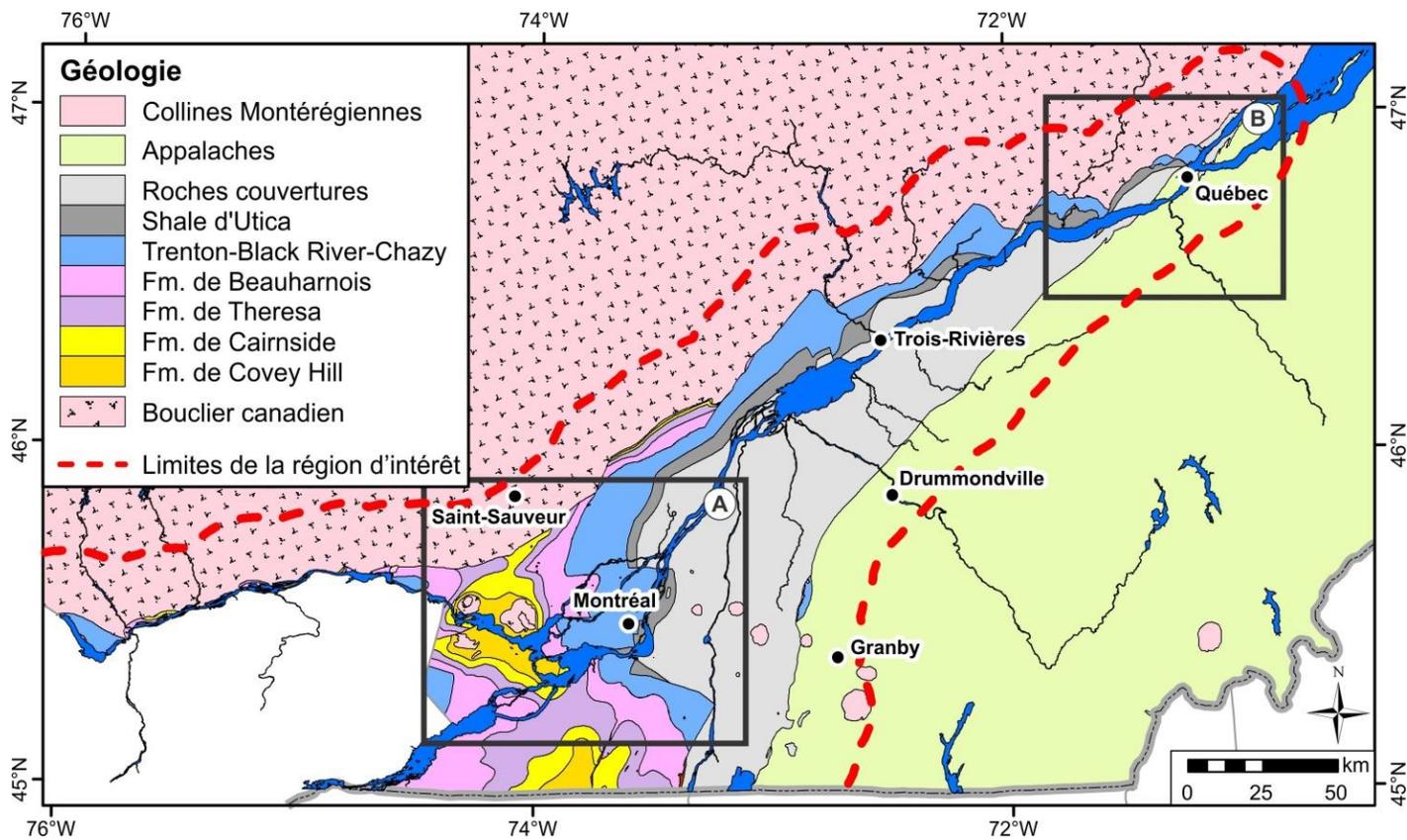
Le défi est de déterminer efficacement la conductivité thermique du sous-sol au niveau d'un site de construction pressenti. Toutefois, aux profondeurs ciblées par les systèmes de pompes à chaleur géothermique (< 150 m), le sous-sol est constitué de deux grandes entités : 1) les dépôts meubles et ; 2) le roc. Une méthodologie doit donc être adaptée à cette réalité afin d'évaluer le mieux possible la distribution en surface de la conductivité thermique en fonction des différentes sources de données disponibles.

Objectifs

L'objectif de ce projet est de cartographier la conductivité thermique du roc près de la surface sur l'ensemble du territoire du bassin sédimentaire des BTSL à l'aide de données de conductivité thermique provenant de différentes sources : de TRT, d'échantillons de roches et de diagraphies géophysiques. Cette compilation vise à améliorer la couverture des données de conductivité thermique existantes sur le territoire et à réduire les incertitudes. Pour ce faire, la distribution spatiale de la conductivité thermique en fonction de la géologie ainsi que son incertitude sont déterminées à l'aide de simulations géostatistiques. Les limites de la région d'intérêt sont définies à 20 km de distance du bassin des BTSL au Québec.

Avec cette cartographie, SNC-Lavalin pourra anticiper les conditions géologiques favorables aux systèmes géothermiques et cibler les marchés propices.





Géologie générale – Localisation

La région ciblée par ce projet de recherche consiste principalement au bassin sédimentaire des BTSL. Le Bouclier canadien et la chaîne des Appalaches assurent respectivement le contact nord-ouest et sud-est du bassin des BTSL.

La succession sédimentaire du bassin des BTSL repose en discordance sur les roches précambriennes du Bouclier canadien au nord-ouest et est chevauchée par la chaîne des Appalaches au sud-est. De la base vers le sommet, on retrouve une succession de dépôts silico-clastiques, dolomitiques, calcaires, puis silico-clastiques à grains fins. La colonne stratigraphique de la succession sédimentaire est présentée à la page suivante.

L'ensemble de la succession sédimentaire est présente en surface et les unités géologiques les plus âgées sont localisées au nord-ouest vers les roches précambriennes du Bouclier canadien. Les roches sont généralement de plus en plus jeunes vers la chaîne des Appalaches au sud-est. Il est à noter que les unités à la base de la succession sédimentaire n'affleurent que dans la région de Montréal (unités géologiques allant du Covey Hill au Beauharnois).

Dans le cadre de cette étude, l'ensemble des roches du bassin des BTSL, des Appalaches et du Bouclier canadien situées en surface ou sous les dépôts meubles constituent ce que l'on appelle « roc ».

Les limites des agrandissements ci-contre représentant les régions de Montréal (A) et de Québec (B) sont les mêmes tout le long du rapport.

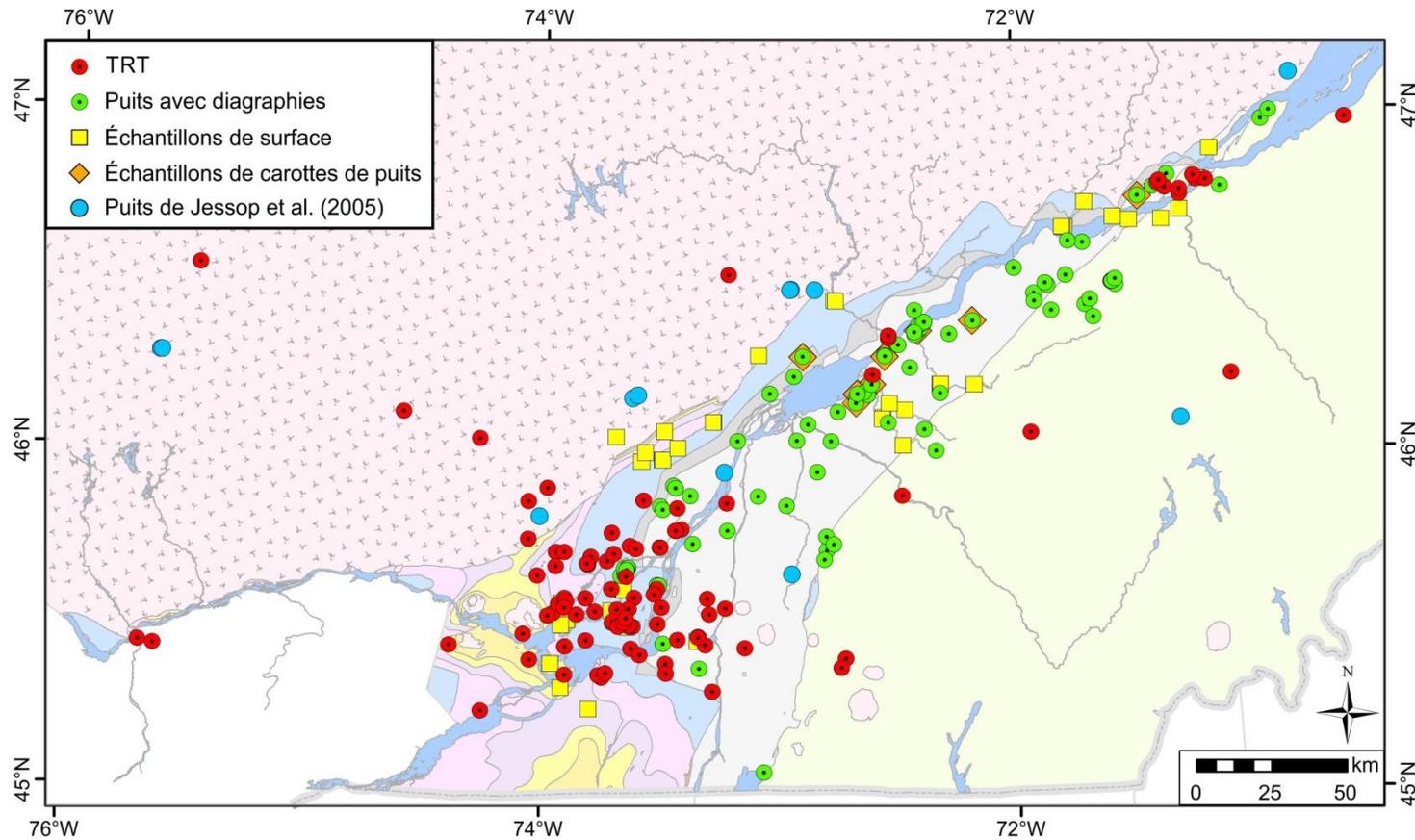
		Groupe Formation	Lithologie	Unité thermique	
ORDOVICIEN	S	Queenston	Shales Grès rouges	Couverture	
		Lorraine	Shales Siltstones Grès Calcaires		
		Sainte-Rosalie	Siltstones dolomitiques Mudstones Shales		
			Shale d'Utica	Shales noirs calcareux	Utica
			Trenton	Calcaires	Tr-BR-Ch
			Black River		
			Chazy		
		M	Beekmantown	Dolomies massives	Beauharnois
		I		Grès dolomitiques	Theresa
		Potsdam	Grès quartzitiques	Cairnside	
			Grès feldspathiques Conglomérats	Covey Hill	
CAMBRIEN	S				
	M				
pC		Bouclier canadien		Précambrien	

Géologie générale – Stratigraphie

Sept unités thermiques sont définies pour le bassin sédimentaire des BTSL en se basant sur la lithostratigraphie standardisée du bassin (Comeau *et al.*, 2013) ainsi que deux unités supplémentaires, représentant respectivement le Bouclier canadien (Précambrien) et la chaîne des Appalaches (Appalaches). Les unités thermiques sont définies comme des couches de roches continues ayant des propriétés thermiques similaires. Du sommet vers la base, les unités thermiques sont :

1. **Appalaches**, regroupe toutes les unités géologiques indifférenciées de la chaîne des Appalaches (non montrée sur la colonne stratigraphique) ;
2. **Couverture**, regroupe les groupes de Lorraine, Sainte-Rosalie et Queenston qui sont composées de siltstones, shales, grès à grains fins et calcaires ;
3. **Utica**, composé de shales noirs calcaires ;
4. Trenton, Black River et Chazy (**Tr-BR-Ch**), composés de calcaires plus ou moins argileux. Comme leurs lithologies sont semblables, ces trois groupes sont regroupés en une seule unité thermique ;
5. **Beauharnois**, composé de dolomies massives ;
6. **Theresa**, composé de dolomies gréseuses et de grès dolomitiques ;
7. **Cairnside**, composé de grès quartzitiques ;
8. **Covey Hill**, composé de grès feldspathiques ;
9. **Précambrien (PC)**, composé de toutes les unités géologiques indifférenciées du Bouclier canadien, principalement des roches métamorphiques.

Figure modifiée de Comeau *et al.* (2013); Bédard *et al.* (2017).



Source des données de conductivité thermique (λ)

Les données de la conductivité thermique λ utilisées dans le cadre de cette étude sont éparpillées et distribuées de façon hétérogène sur le territoire d'intérêt. De plus, les données sont de trois types différents :

TRT

Les données provenant de 97 rapports de TRT, dont les forages atteignent le roc, ont été utilisées pour la caractérisation de la conductivité thermique du roc. La majorité des TRT est concentrée dans les régions de Montréal et de Québec. Ailleurs, la distribution est plus hétérogène.

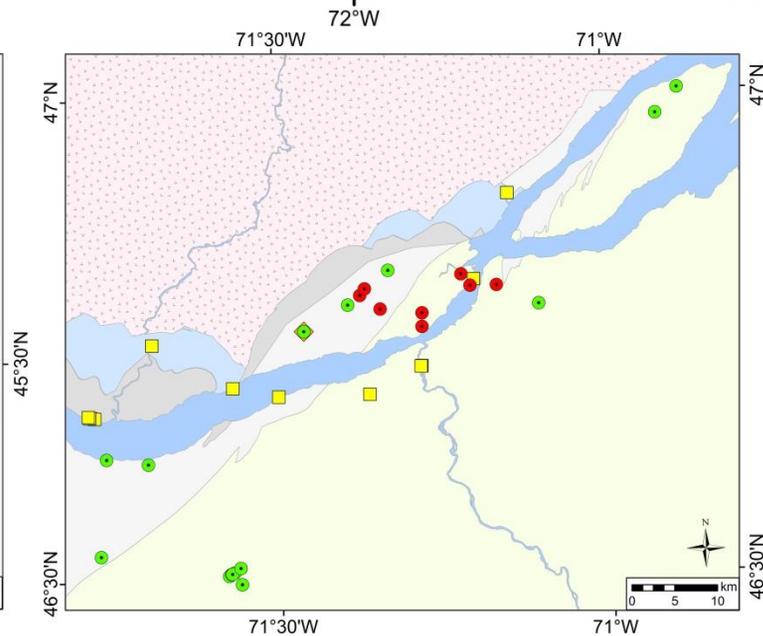
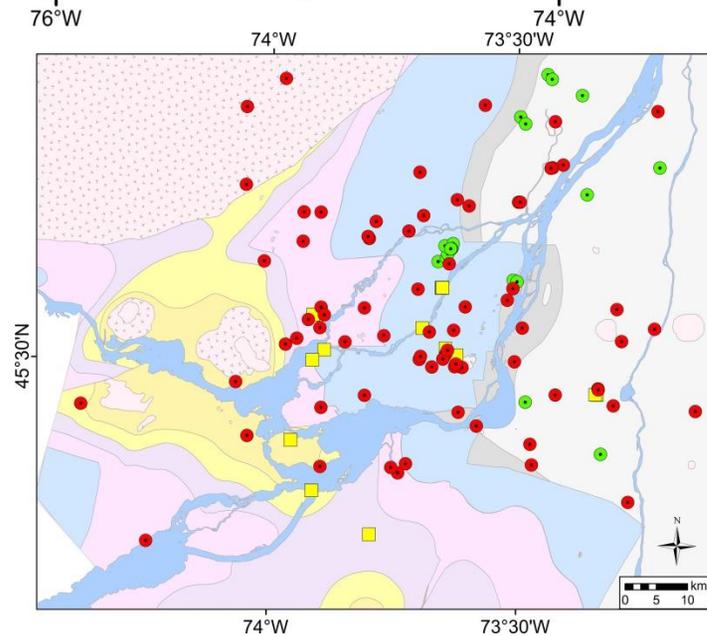
Échantillons

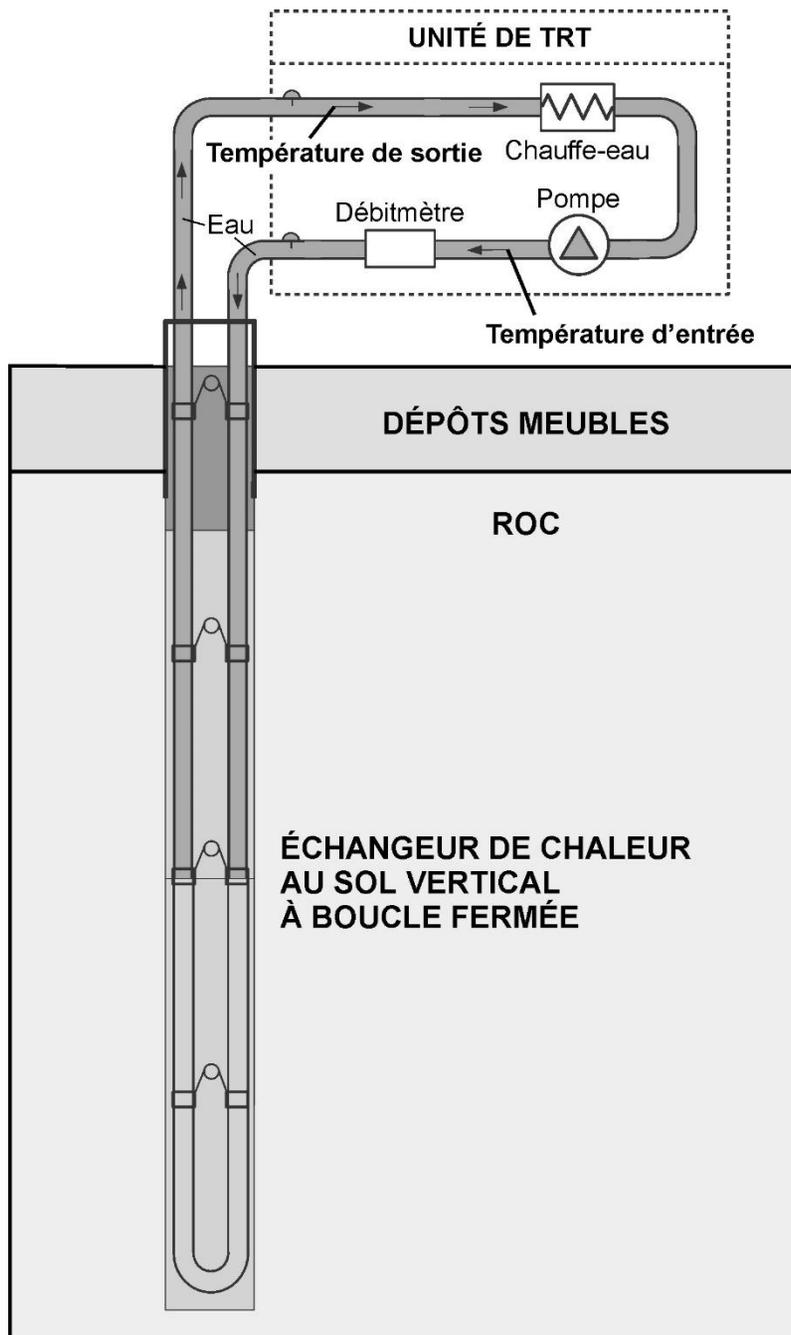
102 mesures de la conductivité thermique réalisées en laboratoire sur des échantillons de roche des unités thermiques du roc.

- 73 échantillons de roche recueillis en affleurement (Asselin, 2016; Jaziri, 2016; Nasr, 2016) ;
- 29 échantillons de carottes de forage (Nasr, 2016) ;
- 18 sites provenant d'une revue de littérature faisant la compilation des données de conductivité thermique (Jessop *et al.*, 2005).

Diagraphies

91 anciens puits d'exploration pétrolière et gazière ayant des enregistrements de diagraphies géophysiques ont été interprétés afin de calculer la conductivité thermique en continu en profondeur (Nasr, 2016). Les résultats de cette interprétation ont été utilisés dans cette étude.





TRT – Théorie

Le TRT consiste en une série de mesures qui s'étalent sur plusieurs jours et qui permettent d'évaluer de façon *in-situ* la conductivité thermique globale du sous-sol et la température en conditions non perturbées.

La figure ci-contre montre l'installation standard d'une unité de TRT, dans laquelle un liquide circule dans une boucle fermée installée dans un échangeur de chaleur au sol vertical. Le liquide est chauffé en surface et perturbe ainsi la température ambiante du sous-sol lors de la circulation dans l'échangeur de chaleur. La température du liquide à l'entrée et à la sortie de l'échangeur de chaleur au sol ainsi que les débits sont mesurés et ces données sont utilisées pour estimer la conductivité thermique globale du sous-sol à l'aide d'équations souvent basées sur le modèle de source de chaleur linéique infinie (Raymond *et al.*, 2011).

La conductivité thermique calculée est la conductivité thermique effective de l'ensemble des matériaux géologiques rencontrés le long de l'échangeur de chaleur au sol. Tel que montré à la figure ci-contre, les matériaux géologiques rencontrés par l'échangeur de chaleur au sol peuvent être de deux types : 1) des dépôts meubles et 2) du roc. L'échangeur de chaleur peut traverser l'un ou l'autre de ces matériaux ou, la plupart des temps, une séquence de dépôts meubles suivie du roc en profondeur. Donc, la conductivité thermique effective estimée correspond à une moyenne de la conductivité thermique des deux matériaux géologiques pondérée par leur épaisseur respective par rapport à la longueur totale de l'échangeur de chaleur au sol de l'unité du TRT, telle que montrée par l'équation ci-dessous.

$$\lambda_{\text{TRT}} = \frac{(\lambda_{\text{roc}} \cdot e_{\text{roc}}) + (\lambda_{\text{DM}} \cdot e_{\text{DM}})}{e_{\text{TRT}}}$$

λ_{TRT} = conductivité thermique du TRT (W/m·K)

e_{TRT} = longueur du TRT (m)

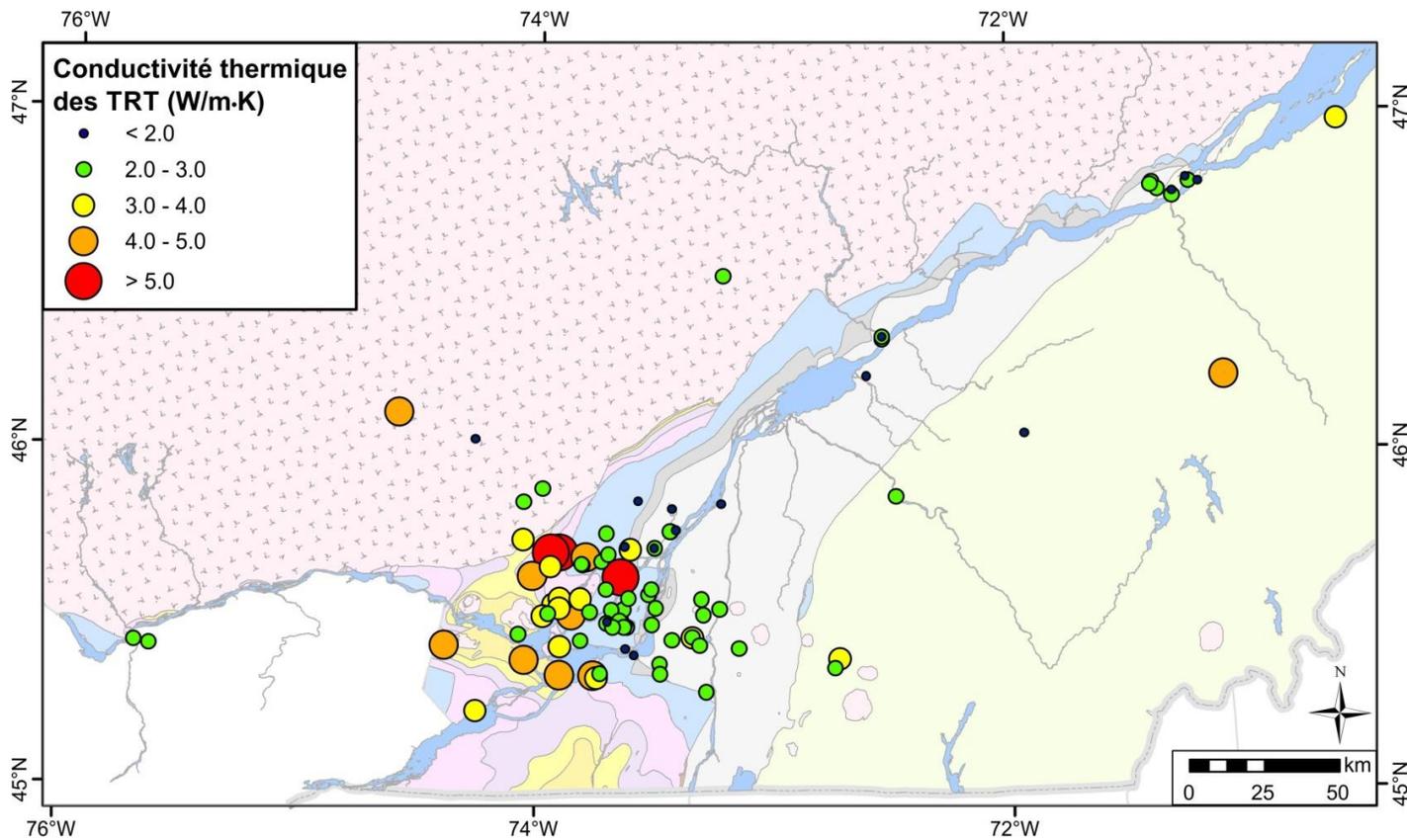
λ_{DM} = conductivité thermique des dépôts meubles (W/m·K)

e_{DM} = épaisseur des dépôts meubles (m)

λ_{roc} = conductivité thermique du roc (W/m·K)

e_{roc} = épaisseur de roc (m)

Figure adaptée de Pasquier (2018).



TRT – Source des données

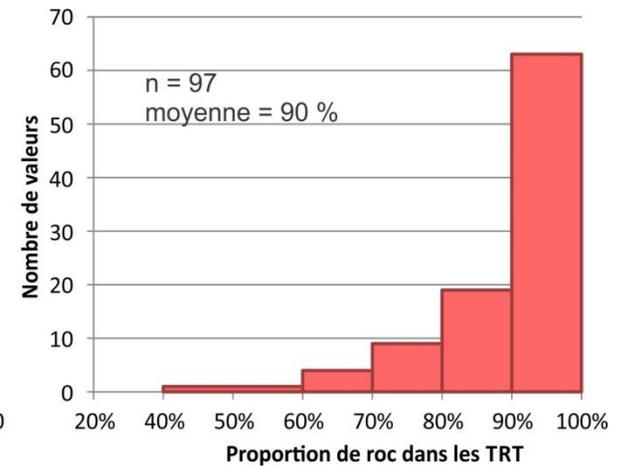
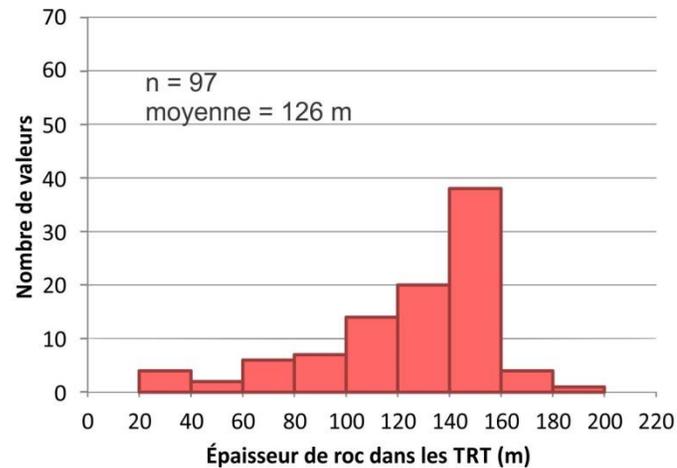
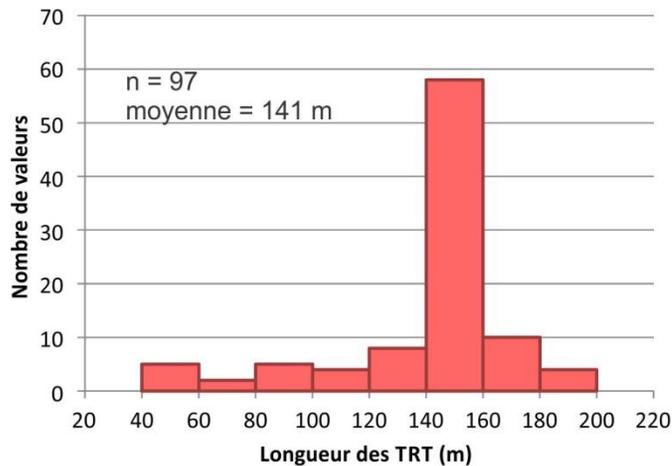
106 rapports de TRT ont été compilés à partir des données des entreprises et organismes suivants :

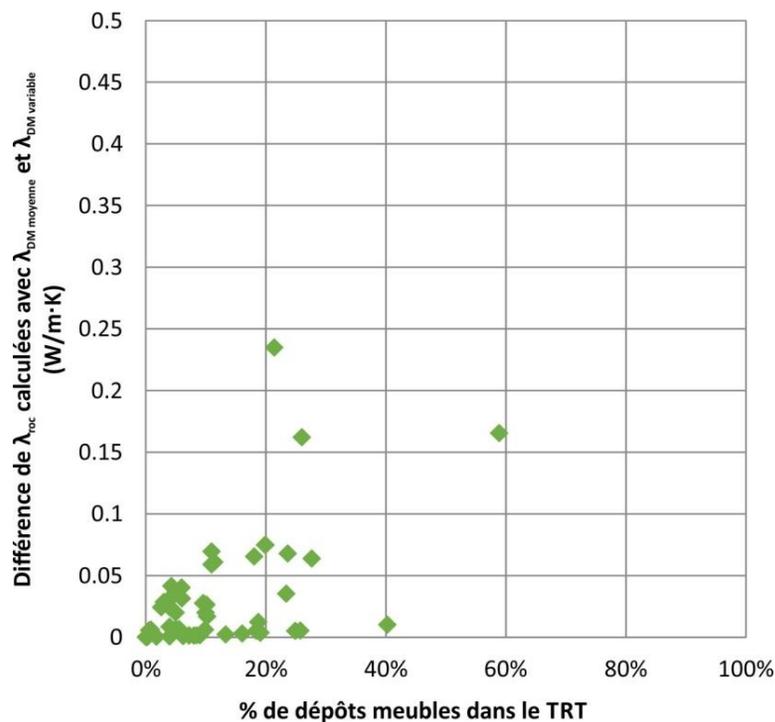
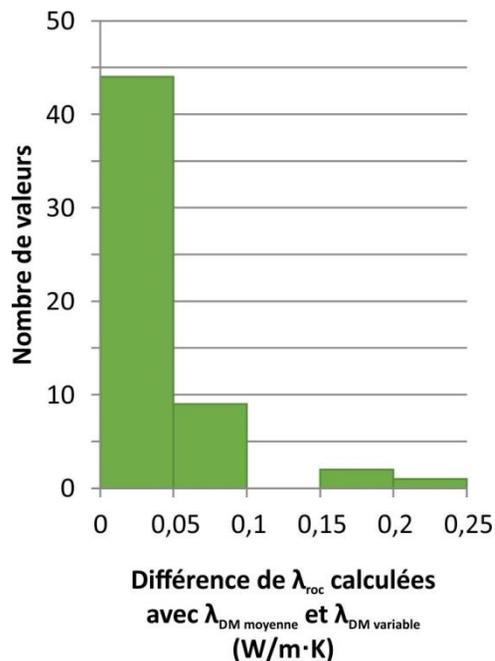
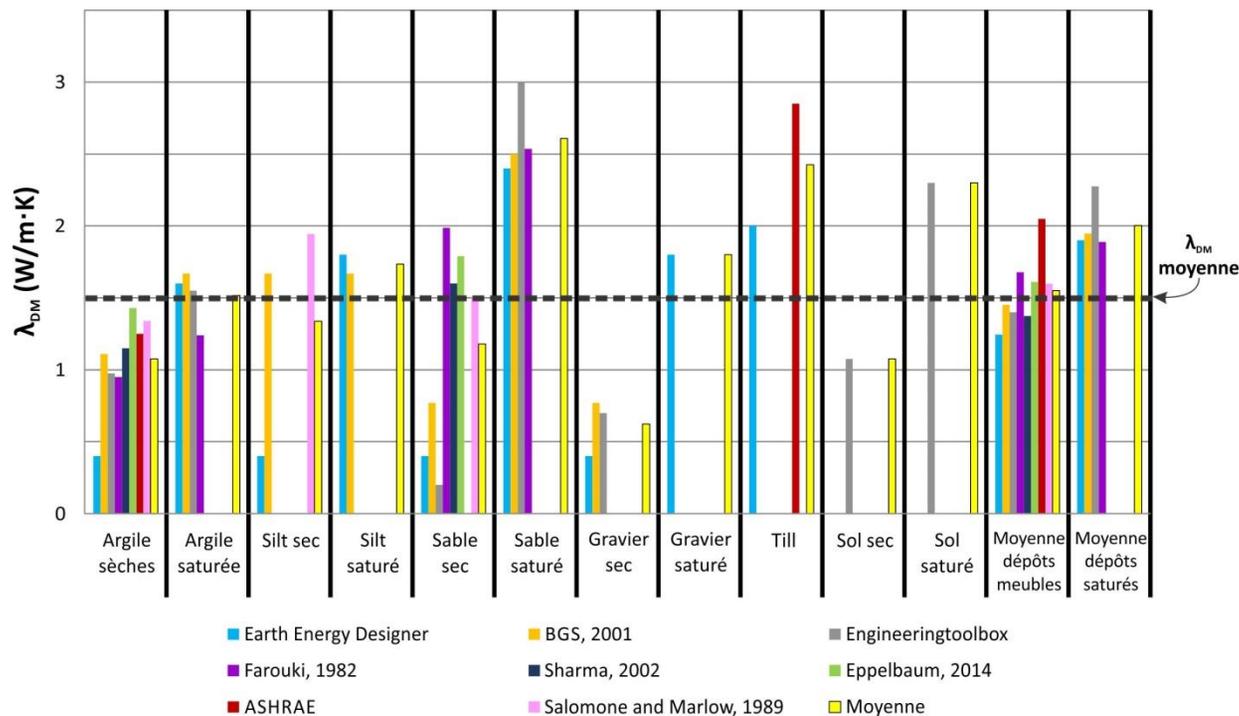
- Beaudoin-Hurens ;
- Richelieu Hydrogéologie ;
- Akonovia ;
- SNC-Lavalin ;
- INRS.

9 TRT ont été ignorés car : 5 TRT n'atteignent pas le roc ; 3 TRT sont trop éloignés des BTSL pour être considérés ; 1 TRT n'a pas d'information sur les matériaux géologiques rencontrés.

Finalement, 97 TRT ont été considérés dans la présente étude, avec des longueurs variant entre 45 et 185 m et une longueur moyenne de 141 m.

L'épaisseur de roc rencontrée lors de ces TRT varie de 36 à 183 m, avec une moyenne de 126 m. Le roc représente entre 41 % et 100 % de l'épaisseur des TRT, avec une moyenne de 90 %.





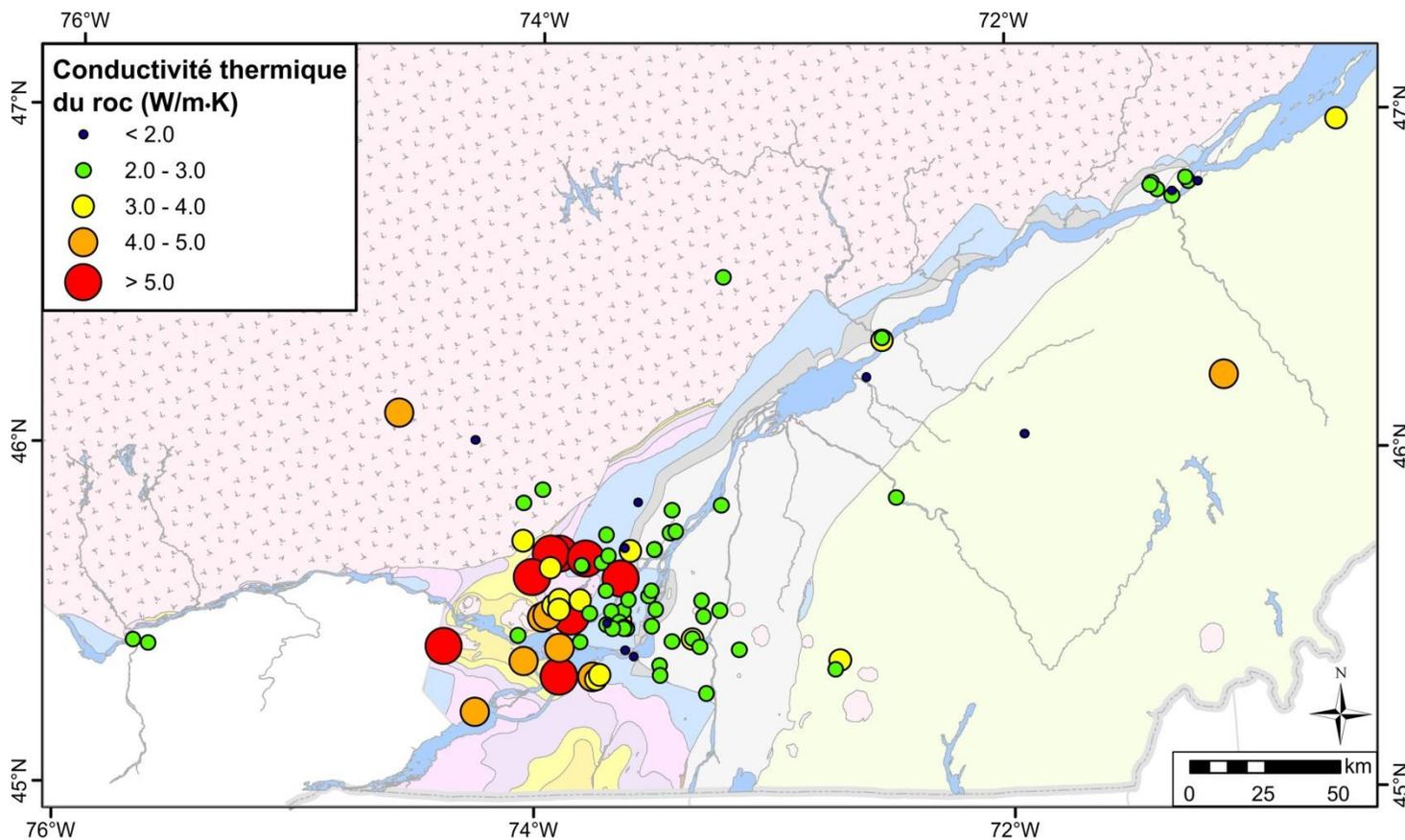
TRT – Conductivité thermique des dépôts meubles (λ_{DM})

La conductivité thermique λ résultant d'un TRT est une moyenne pondérée de la conductivité thermique de chacun des matériaux géologiques rencontrés le long du forage. Comme la présente étude se concentre essentiellement sur l'évaluation de la conductivité thermique du roc, la part des dépôts meubles dans la valeur de la conductivité thermique obtenue du TRT doit premièrement être évaluée.

Les dépôts meubles se déclinent en différents types de matériaux géologiques ayant des valeurs de conductivité thermique distinctes. La littérature scientifique montre une grande variabilité des valeurs de la conductivité thermique des mêmes types de dépôts meubles, telle que le montre la figure du haut.

Les rapports de TRT qui ont une description de la lithologie en profondeur ont été utilisés à des fins de comparaison entre deux méthodologies de calcul : 1) en considérant une valeur de conductivité thermique variable en fonction du type de dépôt meuble, et 2) en utilisant une valeur moyenne pour l'ensemble des dépôts meubles. La comparaison entre ces deux méthodes ne montre pas de différence significative dans le résultat du calcul de la conductivité thermique du roc.

Sur la figure inférieure gauche, une différence d'au plus 0,25 W/m·K est notée entre les deux méthodes de calcul, la majorité des données se retrouvant sous le seuil de 0,1 W/m·K de différence. La figure inférieure droite montre que la différence augmente avec la proportion de dépôts meubles. Cependant, comme la plupart des TRT ont une proportion de roc de plus de 90 %, il a été jugé raisonnable d'utiliser une valeur de conductivité thermique moyenne pour les dépôts meubles. La conductivité thermique choisie de 1,5 W/m·K correspond à la moyenne des valeurs de conductivité thermique de la figure du haut.



TRT – Conductivité thermique du roc (λ_{roc})

Comme la valeur de conductivité thermique obtenue d'un TRT est une moyenne pondérée entre les dépôts meubles et le roc présents, l'équation utilisée pour calculer la conductivité thermique du roc (λ_{roc}) est :

$$\lambda_{\text{roc}} = \frac{(\lambda_{\text{TRT}} \cdot e_{\text{TRT}}) - (\lambda_{\text{DM}} \cdot e_{\text{DM}})}{e_{\text{roc}}}$$

λ_{TRT} = conductivité thermique du TRT (W/m·K)

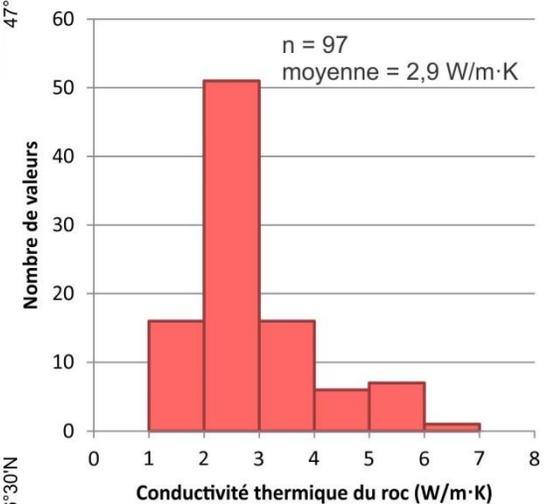
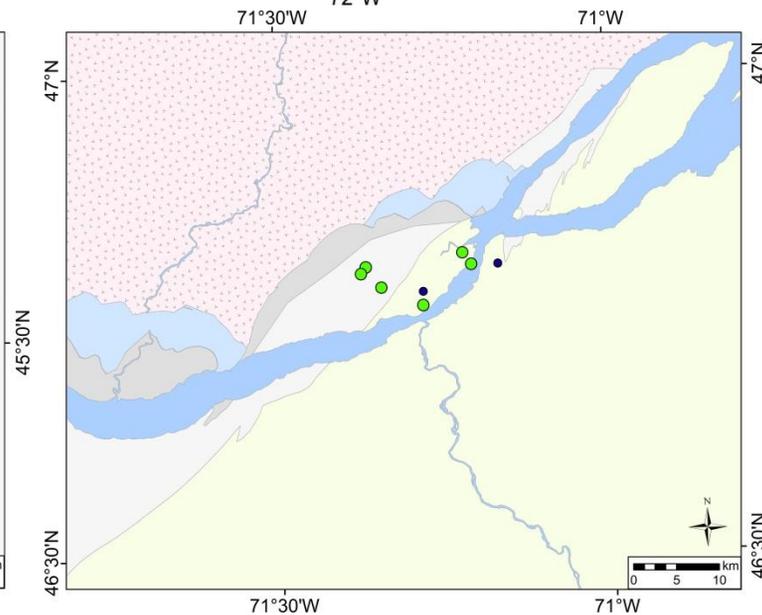
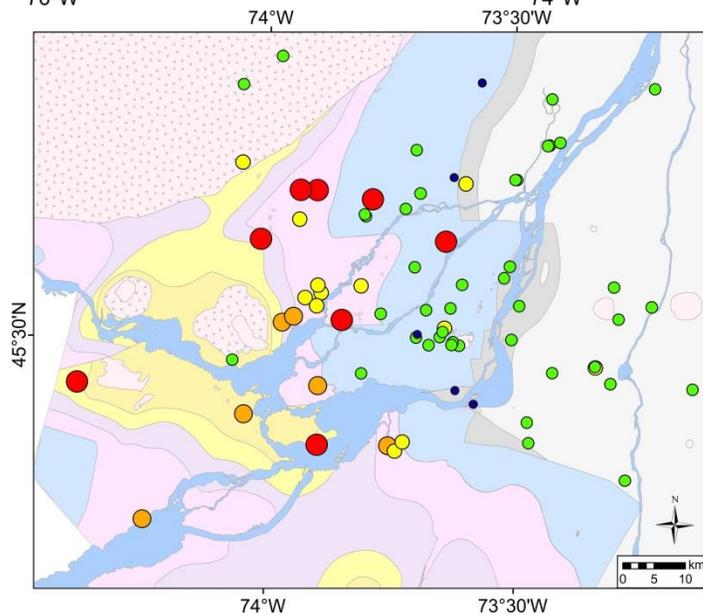
e_{TRT} = longueur du TRT (m)

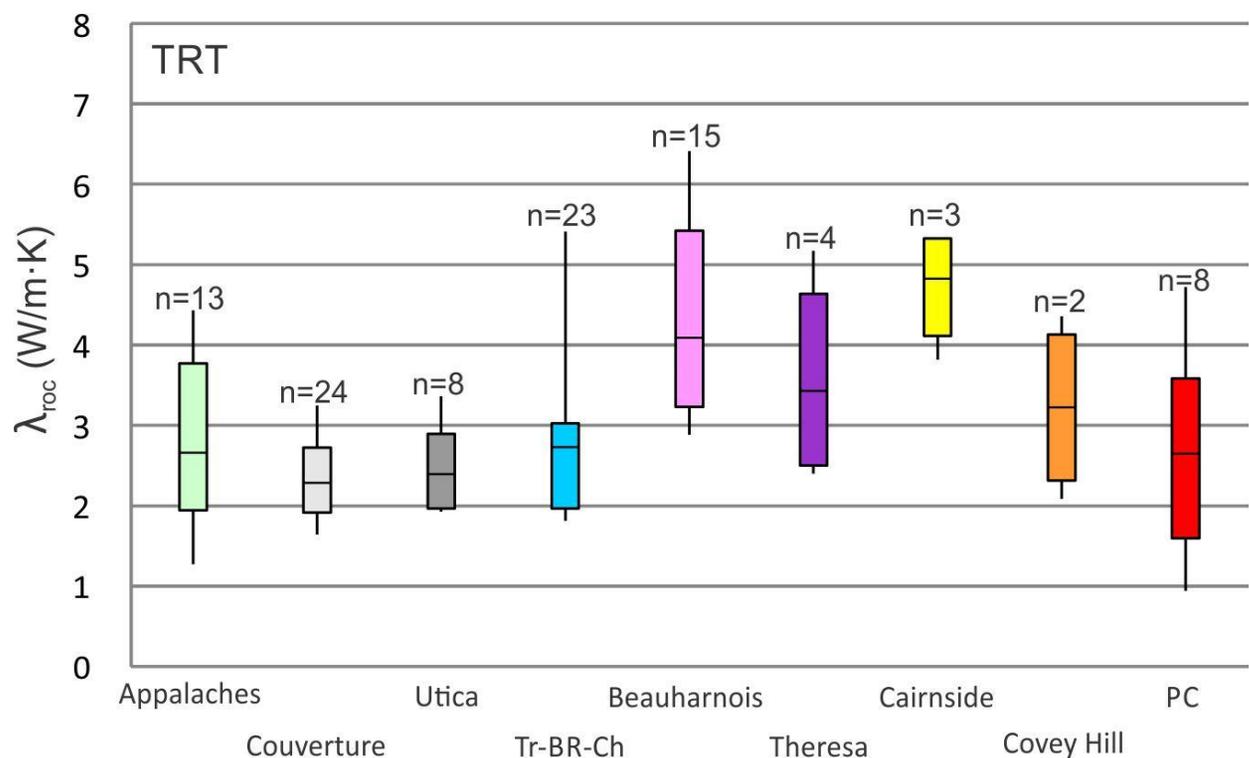
λ_{DM} = conductivité thermique des dépôts meubles (1,5 W/m·K)

e_{DM} = épaisseur des dépôts meubles (m)

e_{roc} = épaisseur de roc (m)

Les valeurs de conductivité thermique du roc calculées pour les TRT varient de 1,3 à 6,4 W/m·K, avec une moyenne de 2,9 W/m·K.

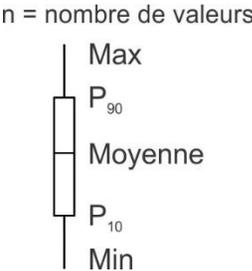




TRT – λ_{roc} par unité thermique

Comme il n'a pas été possible de déterminer si les TRT traversaient plus d'une unité thermique, il a été décidé de n'attribuer qu'une unité thermique aux TRT. Les TRT ont donc été classés en fonction de l'unité thermique correspondante en surface à partir de la carte géologique et la position géographique des TRT.

La distribution des valeurs de la conductivité thermique issues des TRT pour les différentes unités thermiques est montrée à la figure et au tableau ci-contre. P_{10} et P_{90} représentent le 10^e et le 90^e percentile de la distribution de la conductivité thermique.



λ	Appalaches	Couverture	Utica	Tr-BR-Ch	Beauharnois	Theresa	Cairnside	Covey Hill	PC
Moyenne	2,7	2,3	2,4	2,7	4,1	3,4	4,8	3,2	2,6
Minimum	1,3	1,6	1,9	1,8	2,9	2,4	3,8	2,1	0,9
P₁₀	1,9	1,9	2,0	2,0	3,2	2,5	4,1	2,3	1,6
Médiane	2,5	2,2	2,2	2,6	3,8	3,1	5,3	3,2	2,6
P₉₀	3,8	2,7	2,9	3,0	5,4	4,6	5,3	4,1	3,6
Maximum	4,4	3,2	3,4	5,4	6,4	5,2	5,3	4,4	4,7
Écart-type	0,87	0,37	0,46	0,85	0,95	1,23	0,87	1,60	1,08
Variance	0,76	0,14	0,21	0,73	0,91	1,52	0,76	2,58	1,16
Plage	3,2	1,6	1,4	3,6	3,5	2,8	1,5	2,3	3,8
Nombre de TRT	13	24	8	23	15	4	3	2	8



Barres divisées
Commission géologique du Canada à Calgary
(tiré de Nasr, 2016)



Plaque chauffante (C-Therm Technologies)

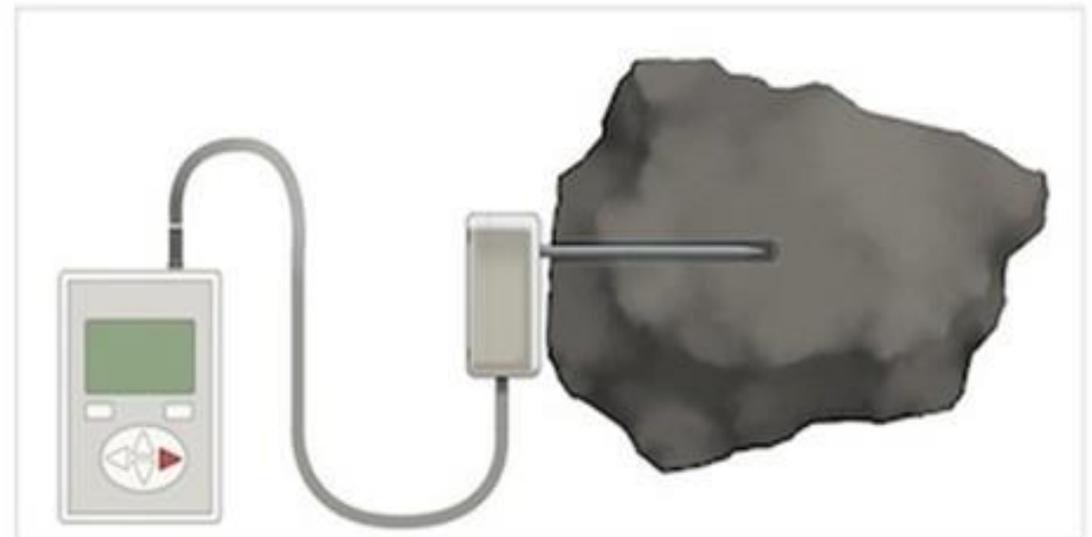
Échantillons – Théorie λ_{roc}

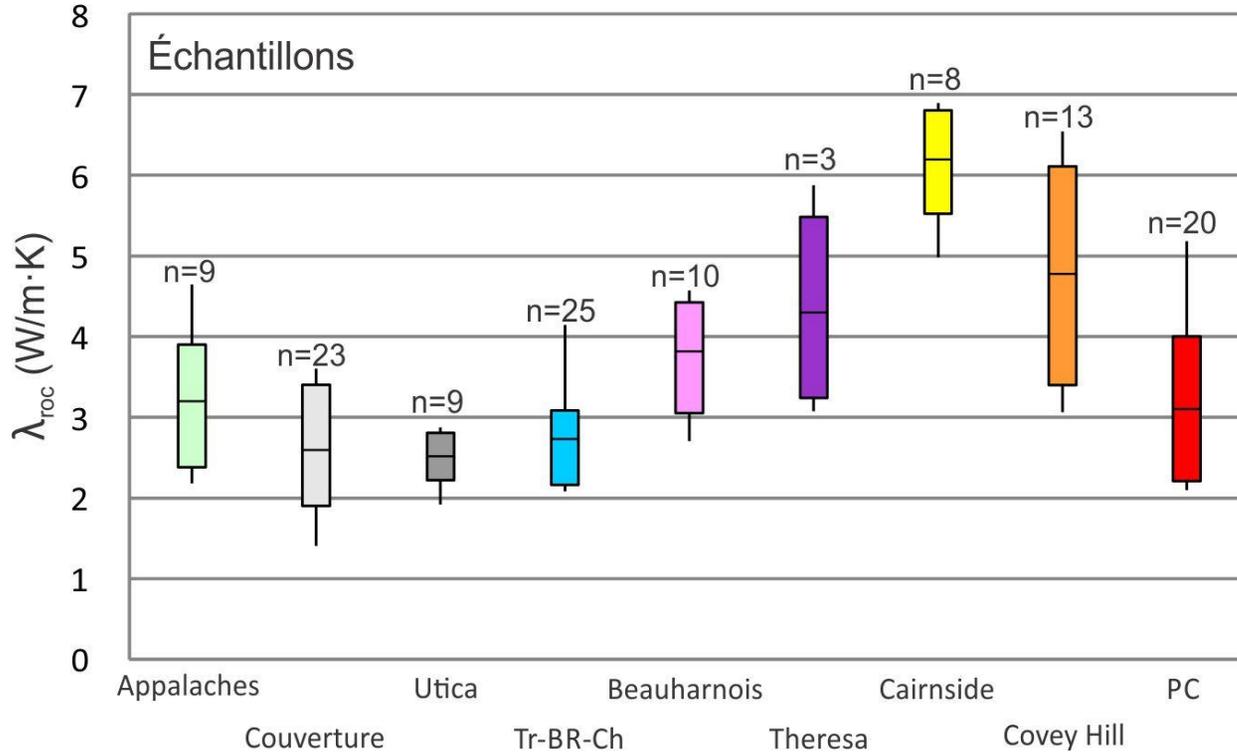
La conductivité thermique λ du roc a été mesurée en laboratoire sur des échantillons de roche prélevés sur le terrain.

Selon la source des données, différents instruments ont été utilisés :

- Pour les échantillons de roche recueillis en affleurement par Nasr (2016), la conductivité thermique a été mesurée à l'aide d'une sonde à aiguille ;
- Les échantillons de carottes de forage provenant de Nasr (2016) ainsi que les échantillons de roches recueillis en affleurement provenant d'Asselin (2016) et de Jaziri (2016) ont été analysés à l'aide de la méthode de la plaque chauffante transitoire et des barres divisées.

Sonde à aiguille (Decagon Devices)



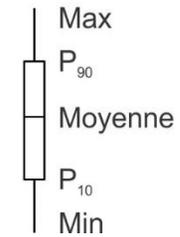


Échantillons – λ_{roc} par unité thermique

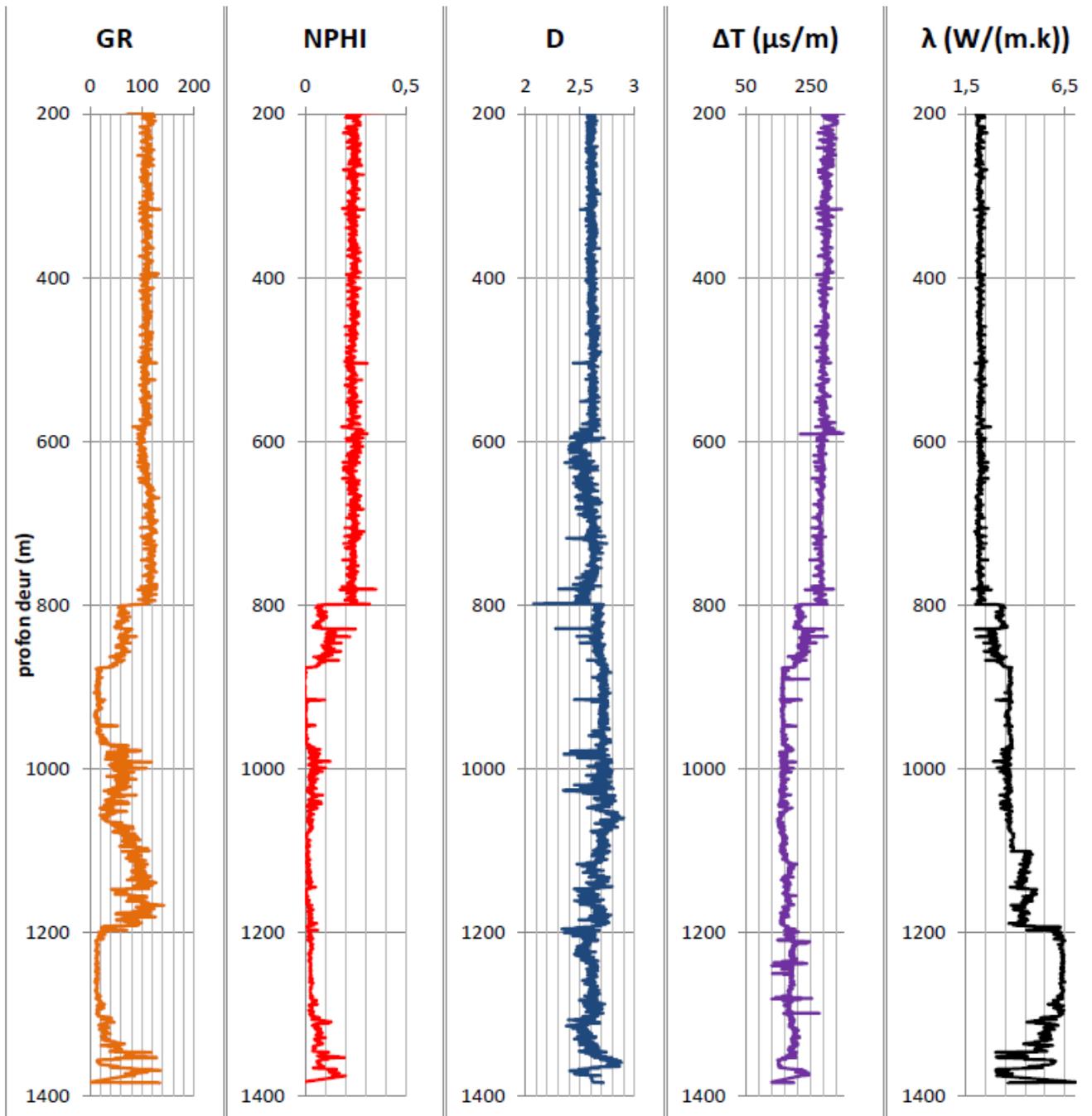
Les échantillons ont été classés selon l'unité thermique au sein de laquelle ils ont été prélevés.

La distribution de la conductivité thermique des échantillons pour les différentes unités thermiques est présentée à la figure et au tableau ci-contre. P_{10} et P_{90} représentent le 10^e et le 90^e percentile de la distribution de la conductivité thermique.

n = nombre de valeurs



λ	Appalaches	Couverture	Utica	Tr-BR-Ch	Beauharnois	Theresa	Cairnside	Covey Hill	PC
Moyenne	3,2	2,6	2,5	2,7	3,8	4,3	6,2	4,8	3,1
Minimum	2,2	1,4	1,9	2,1	2,7	3,1	5,0	3,1	2,1
P₁₀	2,4	1,9	2,2	2,2	3,1	3,2	5,5	3,4	2,2
Médiane	3,2	2,8	2,5	2,6	3,8	3,9	6,3	4,8	2,8
P₉₀	3,9	3,4	2,8	3,1	4,4	5,5	6,8	6,1	4,0
Maximum	4,7	3,6	2,9	4,2	4,6	5,9	6,9	6,6	5,2
Écart-type	0,76	0,61	0,31	0,45	0,61	1,44	0,60	1,22	0,82
Variance	0,57	0,37	0,09	0,20	0,38	2,06	0,37	1,49	0,67
Plage	2,5	2,2	1,0	2,1	1,9	2,8	1,9	3,5	3,1
Nombre de TRT	9	23	9	25	10	3	8	13	20



Diagraphies – Théorie λ_{roc}

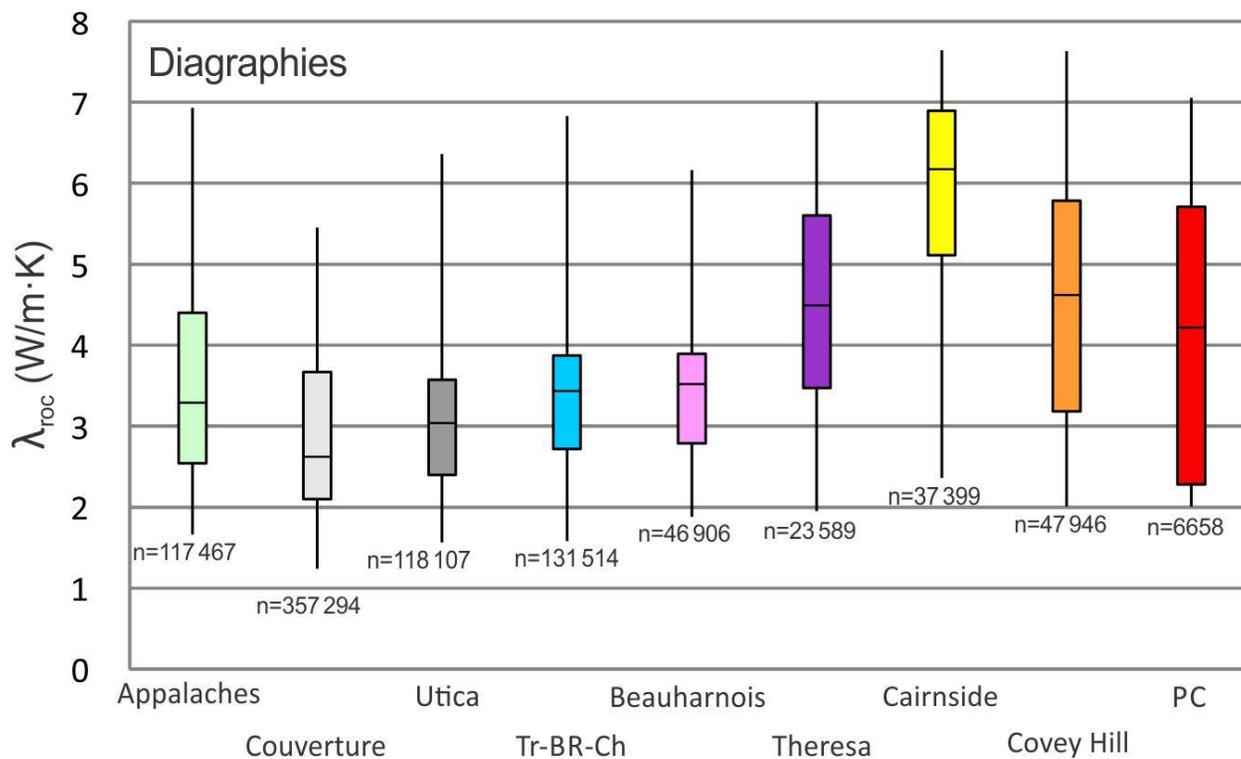
Une diagraphie est un enregistrement continu le long d'un puits (généralement une donnée acquise à chaque 30 cm) d'un paramètre physique de la roche. Il est ainsi possible d'enregistrer, à l'aide d'un instrument/sonde que l'on descend dans le puits, les variations de ces paramètres avec la profondeur.

Certains de ces paramètres physiques peuvent être combinés afin d'estimer la conductivité thermique. Il s'agit, entre autres, du rayonnement gamma (*gamma ray*, ou GR), de la porosité neutron (NPHI), de la densité (D), de la vitesse de propagation des ondes acoustiques P (ΔT), etc. La figure ci-contre montre un exemple de diagraphies utilisées pour calculer la conductivité thermique (λ) le long d'un ancien puits d'exploration pétrolière et gazière (Nasr, 2016).

Toutes les analyses de conductivité thermique à partir des diagraphies sont issues des travaux de Nasr (2016) et Nasr *et al.* (2018) et n'ont pas été modifiées.

Les diagraphies ont été utilisées pour définir la distribution statistique des données au sein de chacune des unités. En effet, les TRT et les échantillons ne permettent pas de définir de façon statistiquement fiable ces distributions en raison de leur nombre de données peu élevé et donc parce qu'ils ne représentent pas les unités dans leur ensemble. L'utilisation des diagraphies est donc primordiale afin de définir les paramètres des distributions à contraindre pour les simulations.

Tiré de Nasr (2016).

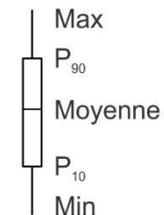


Diagraphies – λ_{roc} par unité thermique

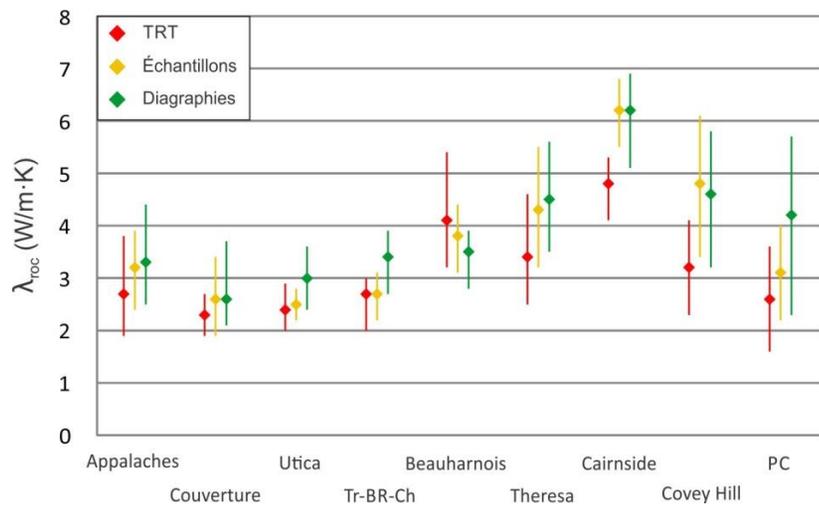
Les valeurs de la conductivité thermique λ issues des diagraphies (Nasr, 2016) ont été classées en fonction de l'unité thermique au sein de laquelle elles ont été enregistrées. Cette classification a été réalisée à l'aide de la réinterprétation du sommet des unités géologiques dans les puits réalisés par Comeau *et al.* (2013).

La distribution de la conductivité thermique pour les différentes unités thermiques est présentée à la figure et au tableau ci-contre. P_{10} et P_{90} représentent le 10^e et le 90^e percentile de la distribution de la conductivité thermique. Le nombre élevé de valeurs est dû au fait que les enregistrements des diagraphies se font à des intervalles de l'ordre du décimètre sur plusieurs centaines, voire milliers, de mètres dans chaque puits.

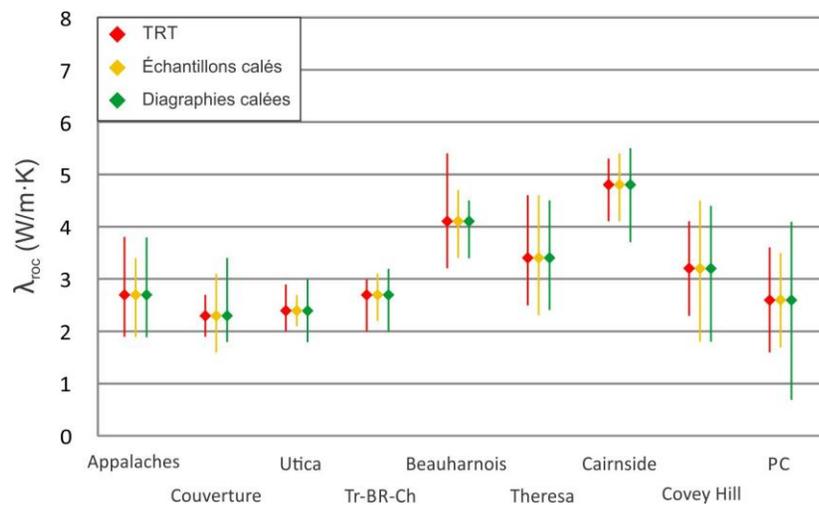
n = nombre de valeurs



λ	Appalaches	Couverture	Utica	Tr-BR-Ch	Beauharnois	Theresa	Cairnside	Covey Hill	PC
Moyenne	3,3	2,6	3,0	3,4	3,5	4,5	6,2	4,6	4,2
Minimum	1,7	1,2	1,6	1,6	1,9	2,0	2,4	2,0	2,0
P₁₀	2,5	2,1	2,4	2,7	2,8	3,5	5,1	3,2	2,3
Médiane	3,2	2,4	3,1	3,6	3,6	4,5	6,4	4,7	4,2
P₉₀	4,4	3,7	3,6	3,9	3,9	5,6	6,9	5,8	5,7
Maximum	6,9	5,4	6,4	6,8	6,2	7,0	7,6	7,6	7,1
Écart-type	0,66	0,60	0,47	0,53	0,53	0,94	0,75	0,94	1,20
Variance	0,43	0,36	0,22	0,28	0,29	0,89	0,56	0,88	1,43
Plage	5,3	4,2	4,8	5,2	4,3	5,0	5,3	5,6	5,0
Nombre de TRT	117 467	357 294	118 107	131 514	46 906	23 589	37 399	47 946	6 658



Unités thermiques	Différence de $\bar{\lambda}$ entre échantillons et TRT	Différence de $\bar{\lambda}$ entre diagraphies et TRT
Appalaches	-0,50	-0,63
Couverture	-0,34	-0,34
Utica	-0,13	-0,65
Tr-BR-Ch	-0,01	-0,71
Beauharnois	0,29	0,57
Theresa	-0,87	-1,06
Cairnside	-1,37	-1,35
Covey Hill	-1,56	-1,40
PC	-0,41	-1,57



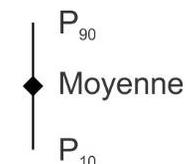
Comparaison et qualité de λ_{roc} des différentes sources

La comparaison de la distribution de la conductivité thermique λ au sein des différentes unités thermiques montre une variabilité selon la source des données (TRT, échantillons, diagraphies). Les valeurs de la conductivité thermique provenant des TRT sont généralement plus faibles que celles provenant des échantillons et des diagraphies (figure du haut).

Pour les échantillons, ceci s'explique par le fait que les intervalles plus friables, qui sont généralement plus argileux et qui ont une conductivité thermique plus faible, sont généralement négligés lors de l'échantillonnage, car ils sont plus difficiles à collecter. La conductivité thermique de l'ensemble de l'unité thermique s'avère alors surestimée en y analysant seulement les échantillons de lithologies plus dures. Comme le travail d'analyse des diagraphies a été calibré avec les échantillons, les valeurs de conductivité thermique issue des diagraphies sont aussi surestimées. Cette surestimation est plus importante dans les unités comportant une plus grande part d'intervalles argileux, telles que Couverture et Utica. Étant donné que la conductivité thermique issue des TRT est la moyenne d'un intervalle, elle est considérée comme plus représentative de l'ensemble de cet intervalle.

Comme cette étude vise à utiliser les TRT comme données de base pour l'évaluation de la conductivité thermique du roc, la moyenne des conductivités thermiques provenant des échantillons et des diagraphies a été contrainte en fonction de celles provenant des TRT. Les autres paramètres des distributions ont été conservés, car il a été jugé que la variance des échantillons et des diagraphies était réaliste en raison du nombre relativement élevé de valeurs. Ainsi, la moyenne des distributions provenant des échantillons et des diagraphies a été calée sur celles des TRT pour éliminer le décalage décrit plus haut. Pour ce faire, une différence constante positive ou négative a été appliquée à toutes les valeurs de conductivité thermique provenant des échantillons et des diagraphies en fonction de l'unité thermique (tableau au centre). Le résultat de ce calage est montré à la figure du bas. Ce sont ces données calées qui sont utilisées pour l'évaluation de la conductivité thermique des unités thermiques.

P_{10} et P_{90} représentent le 10^e et le 90^e percentile de l'échantillon.



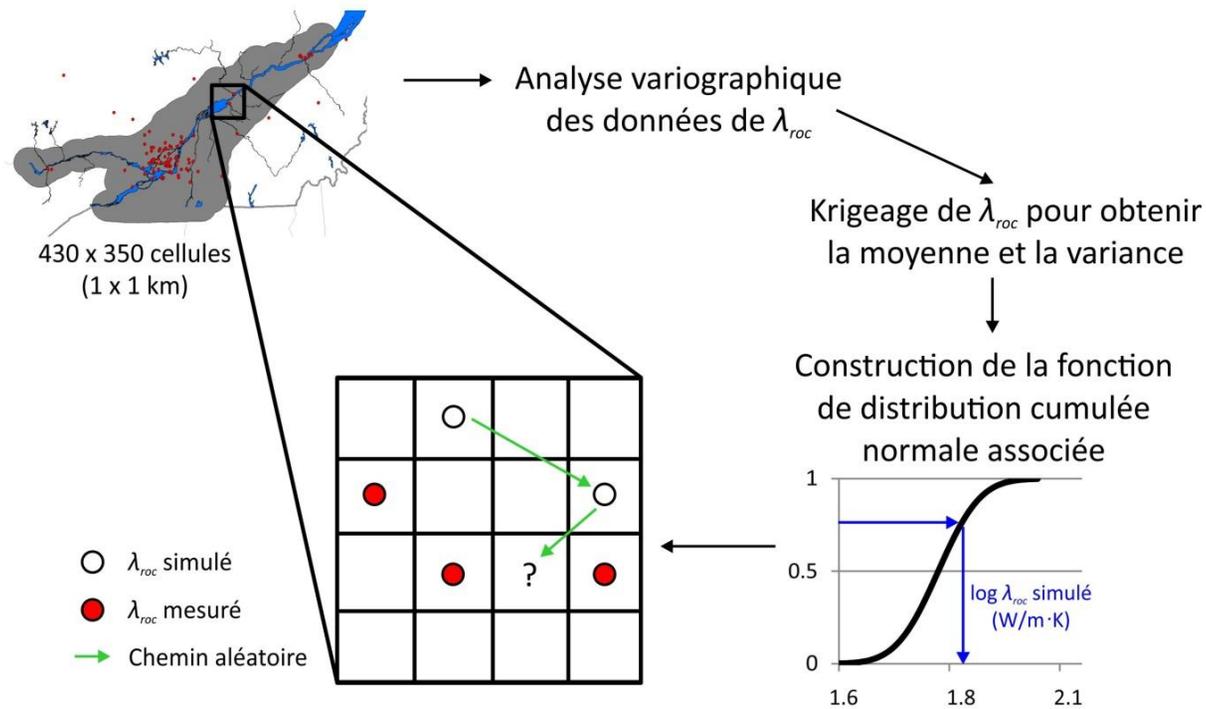
Simulation de λ_{roc} sur le territoire – Théorie

À partir des données ponctuelles de conductivité thermique du roc obtenues selon les TRT et des échantillons, la distribution de la conductivité thermique a été simulée pour l'ensemble du bassin des BTSL.

Afin de spatialiser les mesures de λ_{roc} sur toute la surface du modèle, des simulations séquentielles gaussiennes (SSG) ont été utilisées. Cette méthode est bien connue pour la simulation de propriétés continues (p. ex. λ_{roc}) et permet d'obtenir de multiples réalisations (Srivastava, 1994). Par le biais d'une analyse variographique, cette méthode tient compte de la corrélation spatiale des données entre elles (TRT et échantillons) et permet également la reproduction de l'histogramme des données, qui a été réalisée à l'aide des valeurs de conductivité thermique issues des diagraphies géophysiques.

Afin de respecter la théorie des SSG, les données de λ_{roc} sont normalisées et le variogramme expérimental est calculé dans l'espace des données normalisées. Le variogramme expérimental est ensuite modélisé par une fonction sphérique. Finalement, le variogramme, ainsi que les données de λ_{roc} , permettent de faire le calcul de la moyenne et de la variance conditionnelle en chaque point du maillage utilisé pour la simulation. Ainsi, cette distribution permet la construction d'une fonction de distribution cumulée normale pour laquelle une valeur entre 0 et 1 est choisie au hasard. La valeur correspondante de λ_{roc} est ensuite assignée à une cellule précédemment sélectionnée de la grille de simulation 2D dont l'espacement est de 1 km^2 . Une fois cette valeur attribuée, une autre cellule de la grille est sélectionnée en suivant un chemin aléatoire pour répéter le processus jusqu'à ce que toutes les cellules portent des valeurs de λ_{roc} simulées selon la méthodologie présentée à la figure ci-contre (Deutsch et Journel, 1997).

Grille de simulation du bassin des BTSL



Modifiée de Bédard *et al.* (2016).

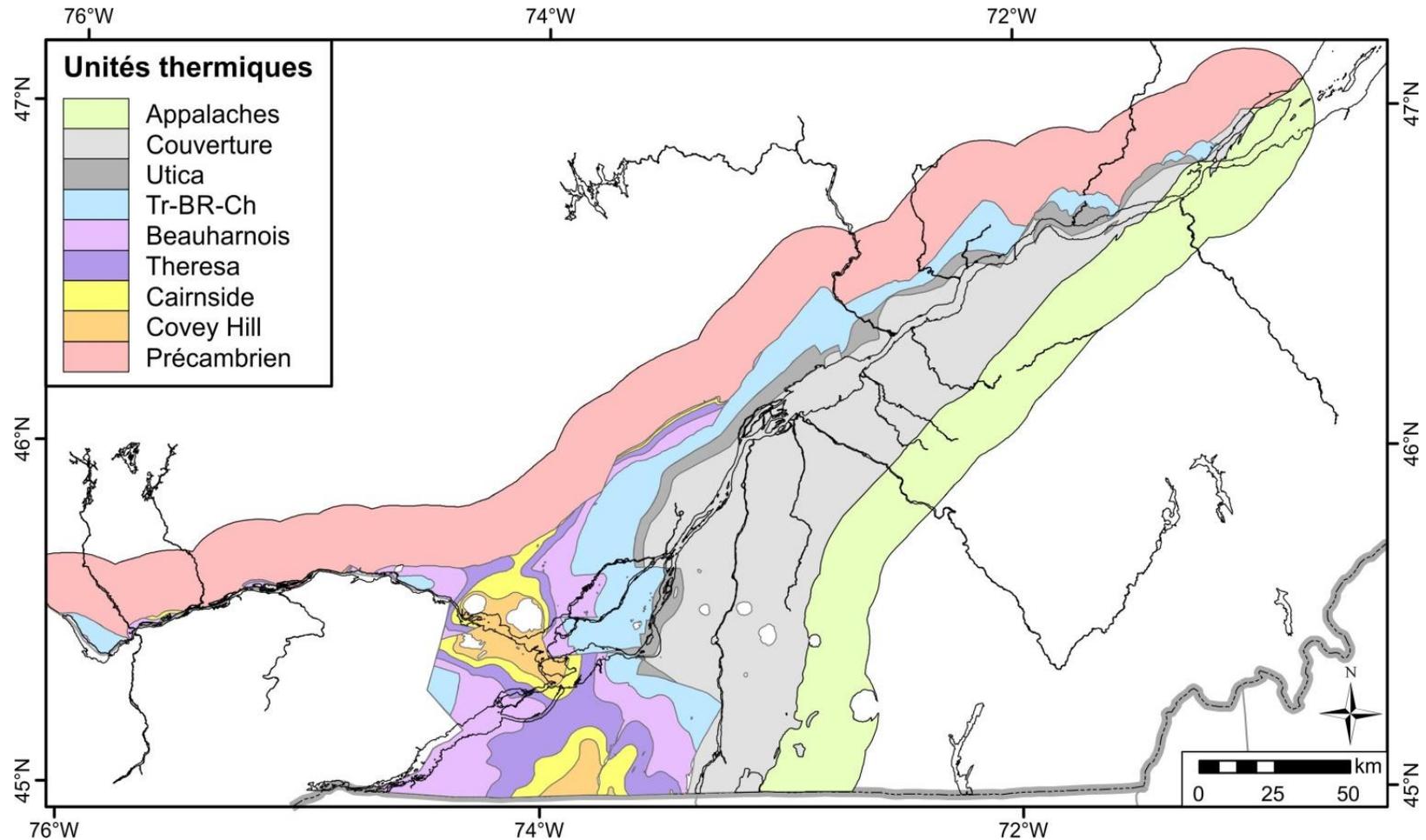
Simulation de λ_{roc} sur le territoire des BTSL – Paramètres

La conductivité thermique du roc a été simulée pour chacune des 9 unités thermiques montrées dans la figure ci-dessous. Par exemple, pour calculer la conductivité thermique de l'unité thermique Appalaches, seules les données de cette unité thermique ont été utilisées pour générer un variogramme sphérique afin de réaliser des SSG. Ainsi, 9 variogrammes sphériques ont été générés, puis 9 séquences de simulations ont été réalisées ; une pour chacune des unités.

Comme le nombre de données pour chaque unité thermique est limité, il n'a pas été possible de déterminer de façon purement statistique les propriétés des variogrammes.

Ainsi, la portée et l'azimut ont été déterminés en fonction de la géométrie du bassin des BTSL. En effet, la séquence sédimentaire du bassin s'observe majoritairement dans la direction NO-SE. Les variogrammes pour chacune des unités thermiques sont tous anisotropes et ont les mêmes portées (respectivement 80 et 40 km) et azimuts (respectivement 45° et 315°). L'effet pépite a été établi à 10 % du plateau.

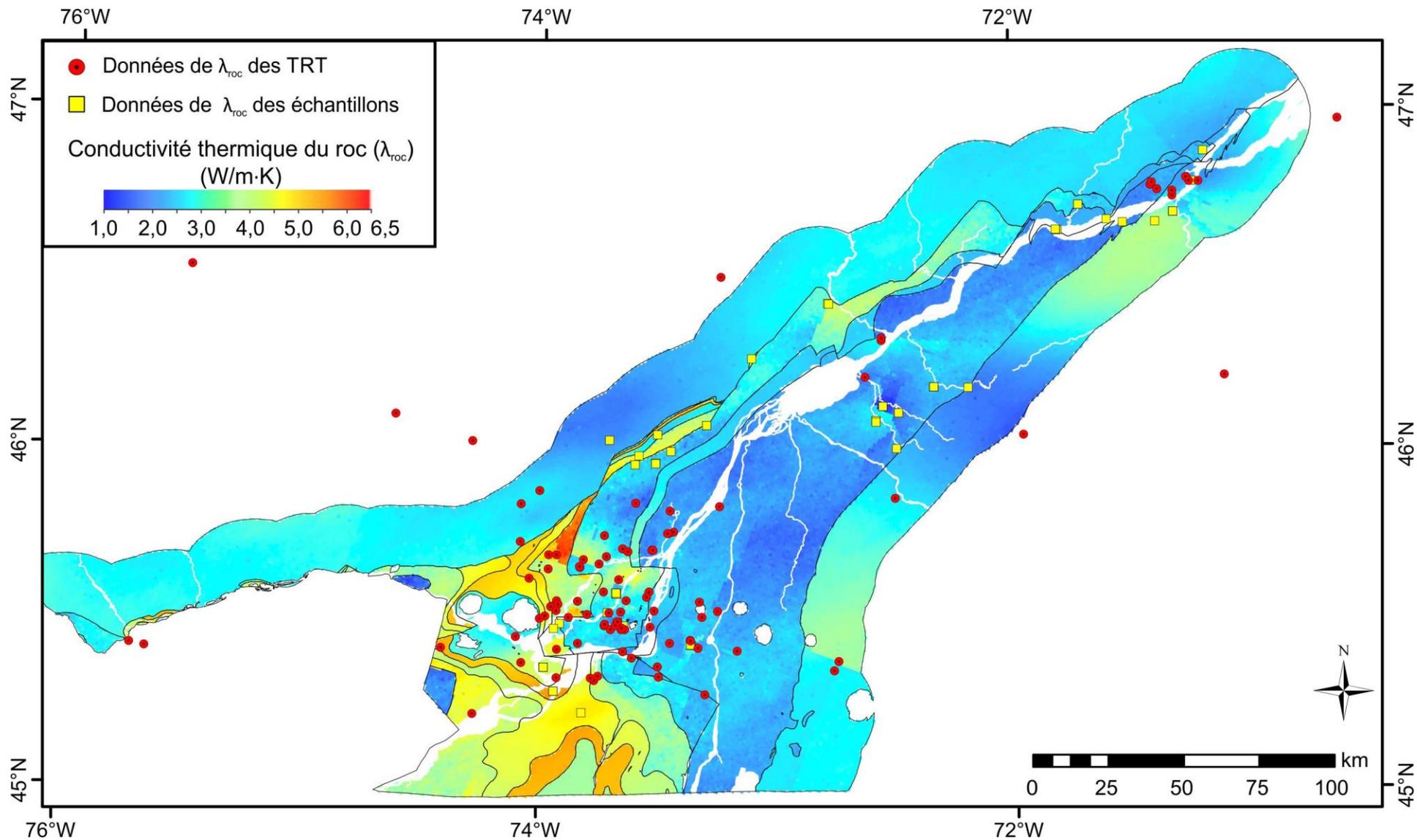
Enfin, les simulations ont été retournées dans l'espace original (non gaussien) par anamorphose gaussienne inverse. Afin de conserver tous les avantages des SSG (la représentation des valeurs extrêmes entre autres), mais de manière à induire un certain degré de lissage plus réaliste pour la représentation de la conductivité thermique de chaque unité thermique, la moyenne des simulations a été réalisée selon la méthode connue du *e-type* (Journel et Huijbregts, 1978).

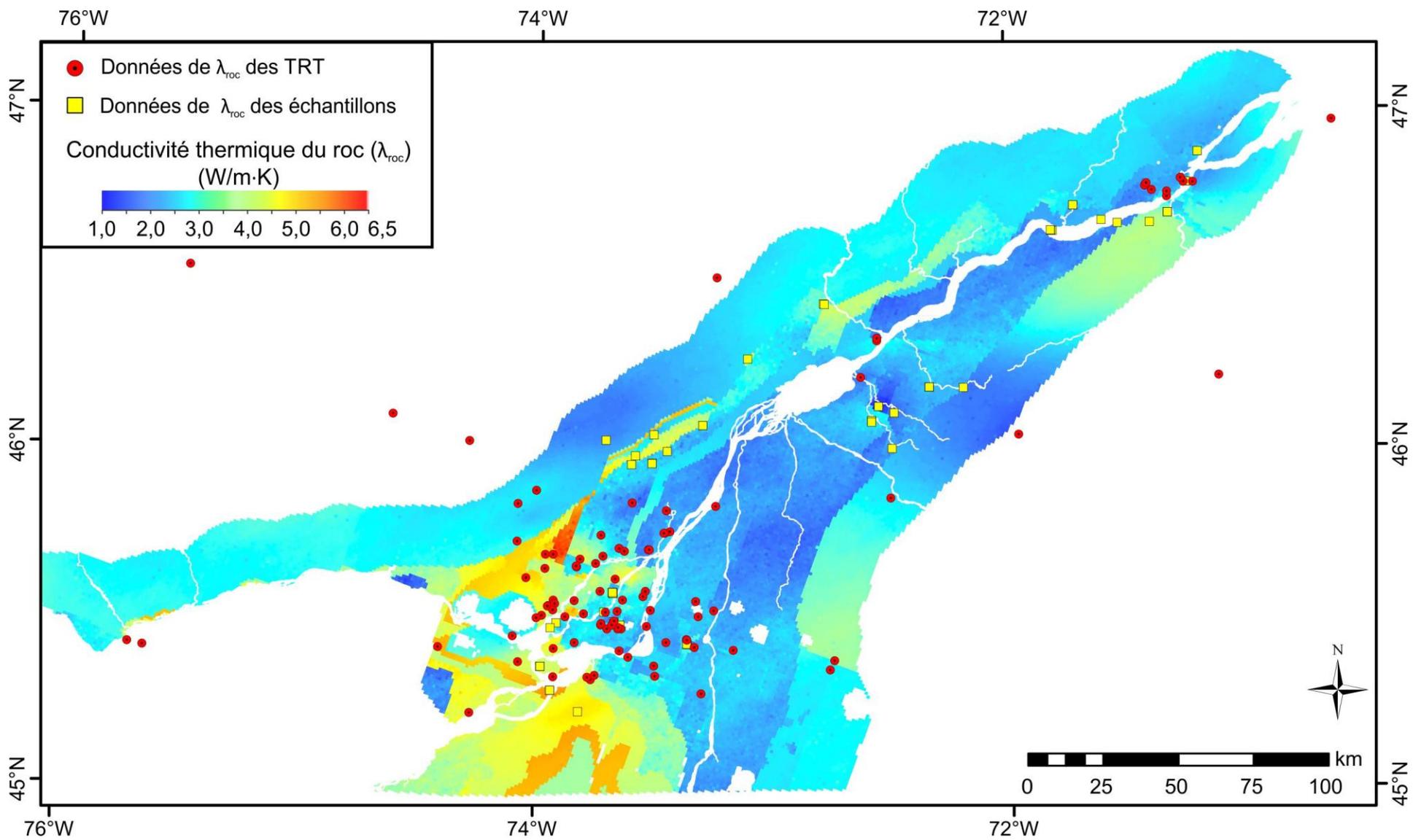


Simulation de λ_{roc} sur le territoire des BTSL – Résultats

La carte de la distribution de la conductivité thermique du roc en surface de tout le territoire du bassin des BTSL a été obtenue en fusionnant chacune des distributions réalisées au sein des neuf unités thermiques. En effet, la distribution de chacune des unités thermiques a été découpée séparément selon la carte géolo-

gique présentée à la page précédente. Ainsi, seules les zones des unités thermiques présentes en surface ont été conservées, telles que le montrent les limites des unités thermiques sur la carte ci-contre (lignes noires). De plus, il est à noter que cette carte de la distribution est la moyenne de 100 réalisations de λ_{roc} pour chacune des unités thermiques.

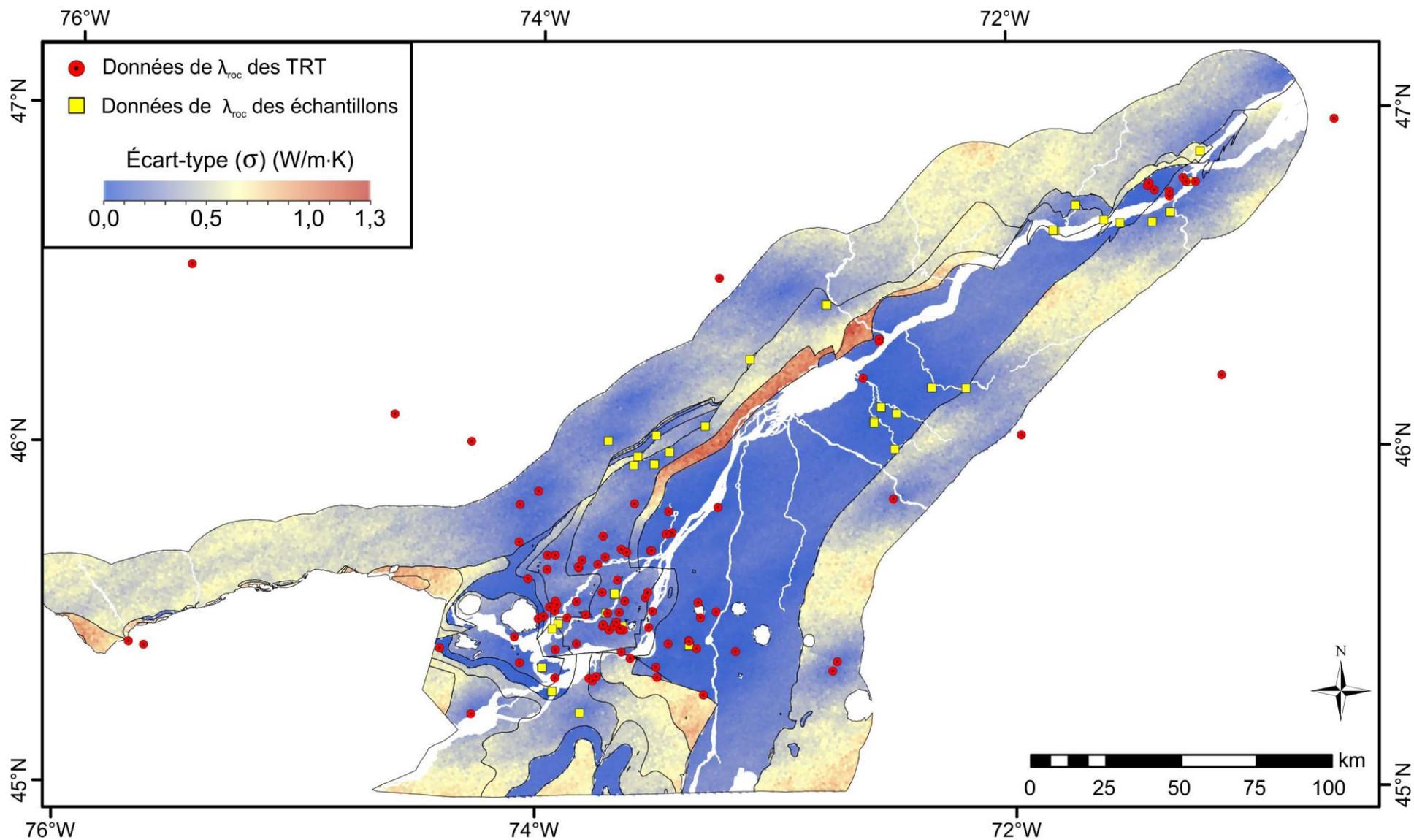


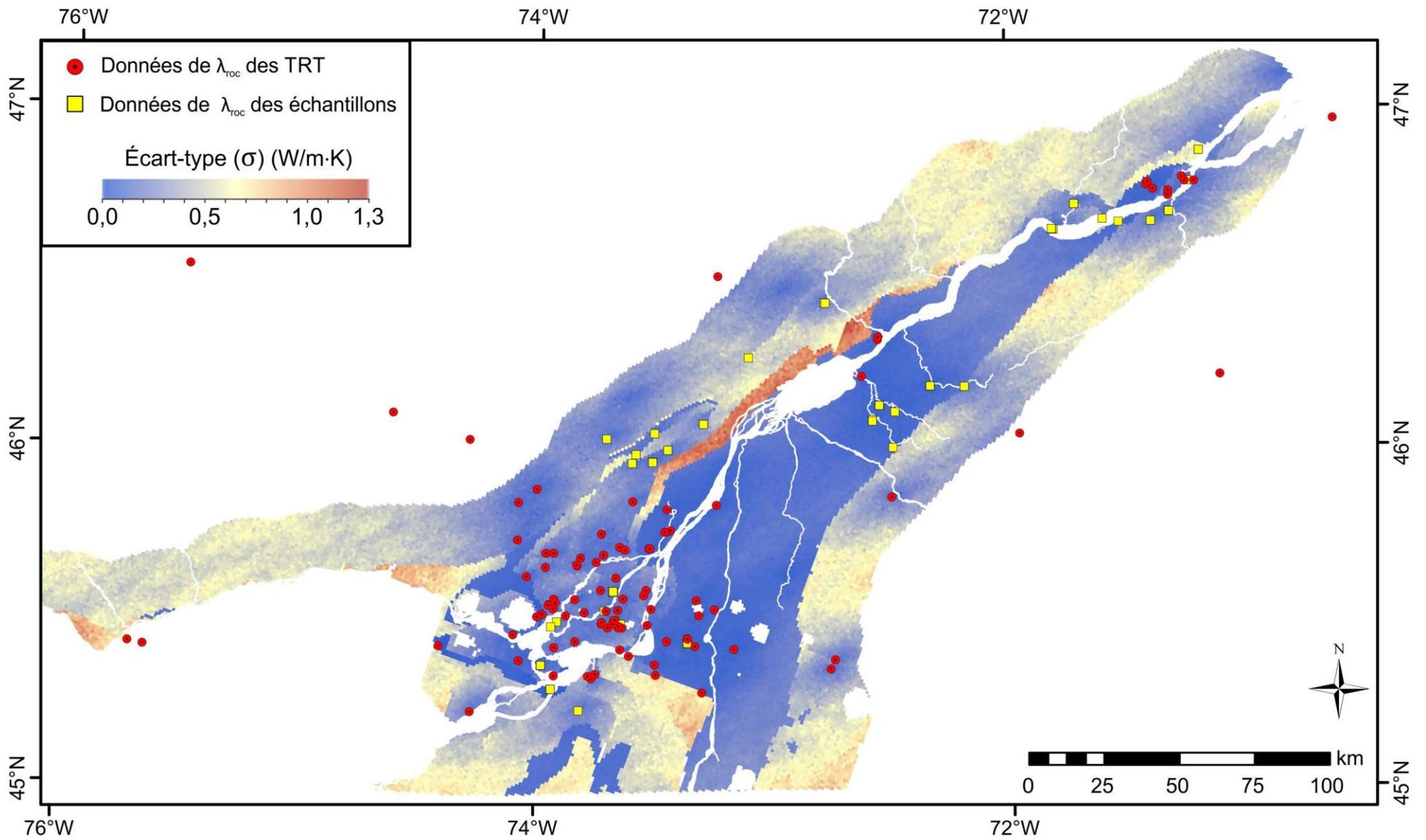


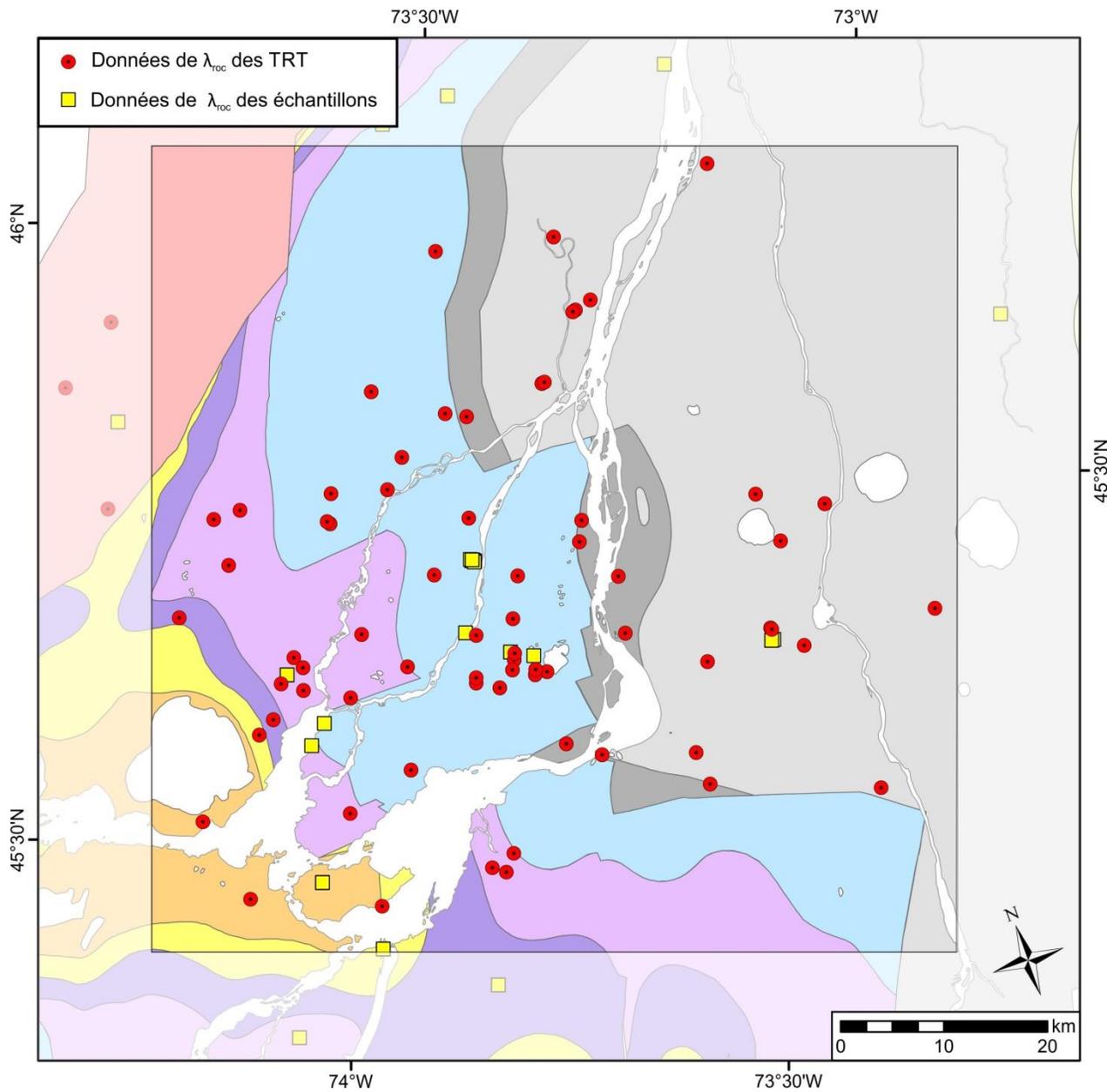
Simulation de λ_{roc} sur le territoire des BTSL – Incertitude

La carte de la distribution de l'écart-type de la conductivité thermique du roc en surface consiste à l'écart-type des 100 réalisations de λ_{roc} pour chacune des unités thermiques. Donc, plus l'écart-type est élevé, plus l'incertitude des résultats simulés est élevée. Comme montré par les paramètres des variogrammes, les

unités thermiques Couverture et Cairnside montrent l'incertitude la moins élevée, ce qui est visible sur la carte ci-dessous, où ces unités montrent des écarts-types faibles dans la plage de couleur bleu foncé pour l'ensemble de leur surface. Les zones où l'écart-type, et donc l'incertitude, est plus élevé correspondent aux régions les plus éloignées des données utilisées au sein de chaque unité.



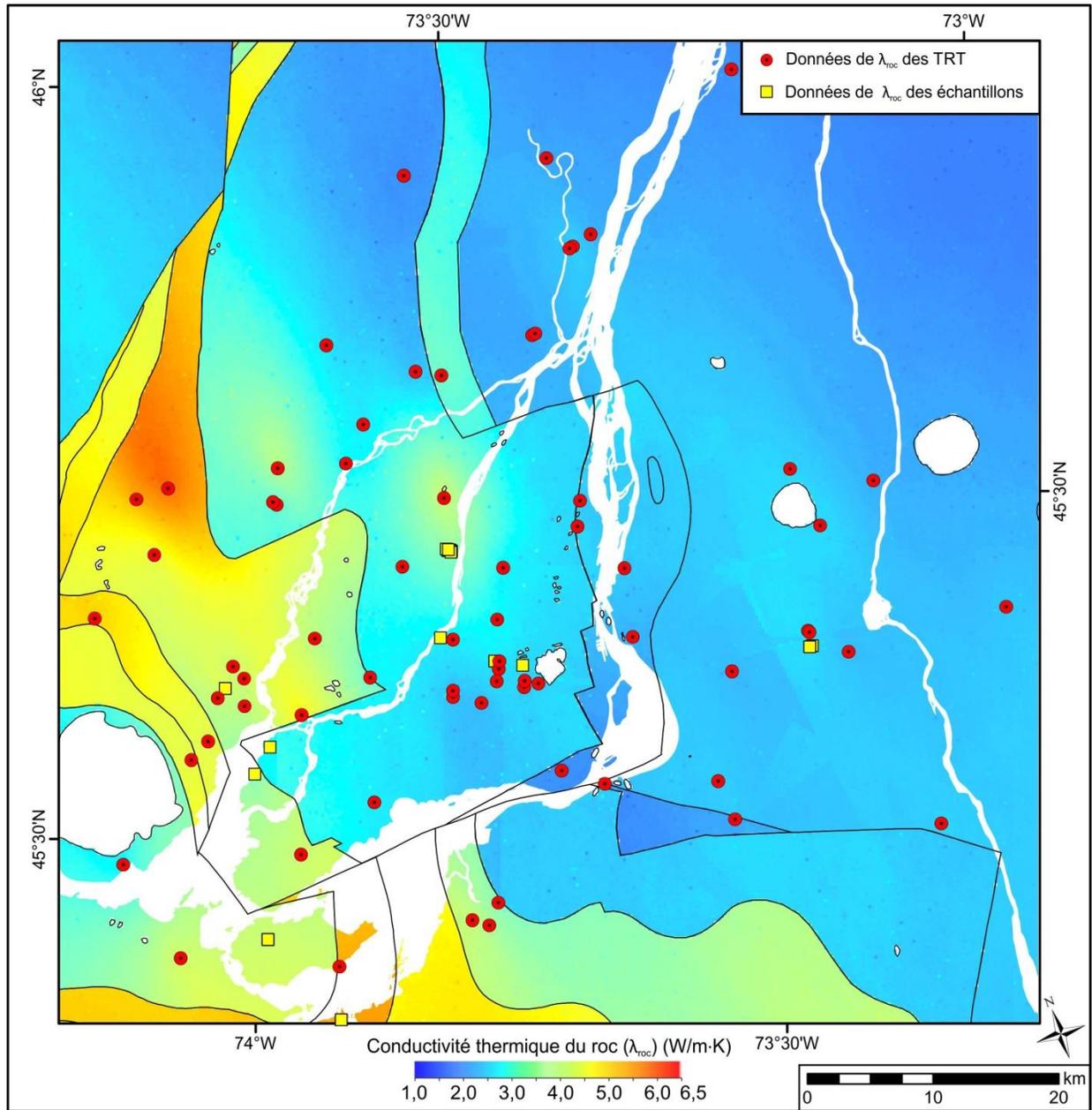




Simulation de λ_{roc} dans la région de Montréal – Paramètres

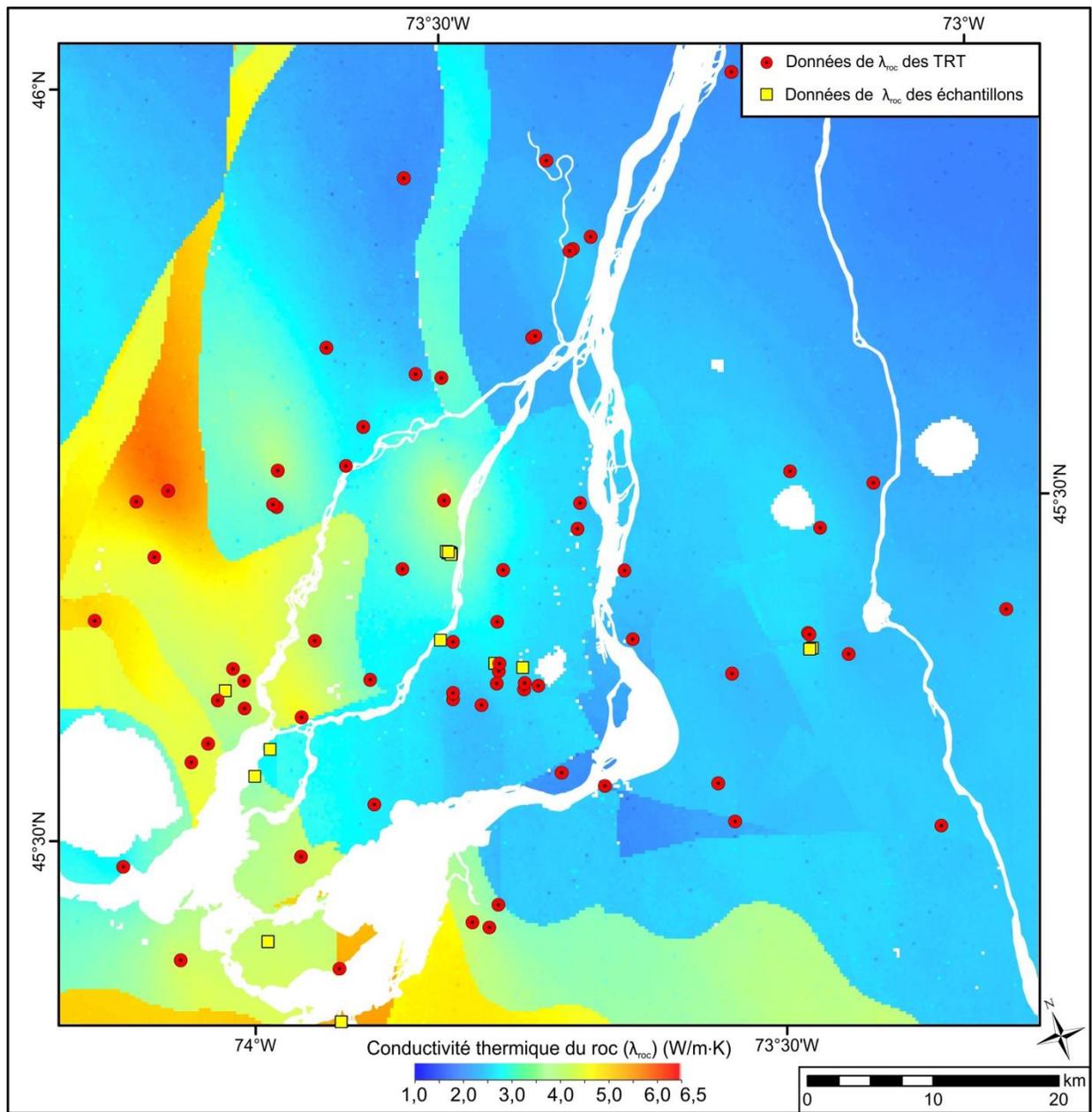
Une plus grande densité de données de conductivité thermique existe pour la région de Montréal. Ainsi, des simulations spécifiques à cette région ont été réalisées avec une résolution plus fine de 250 m.

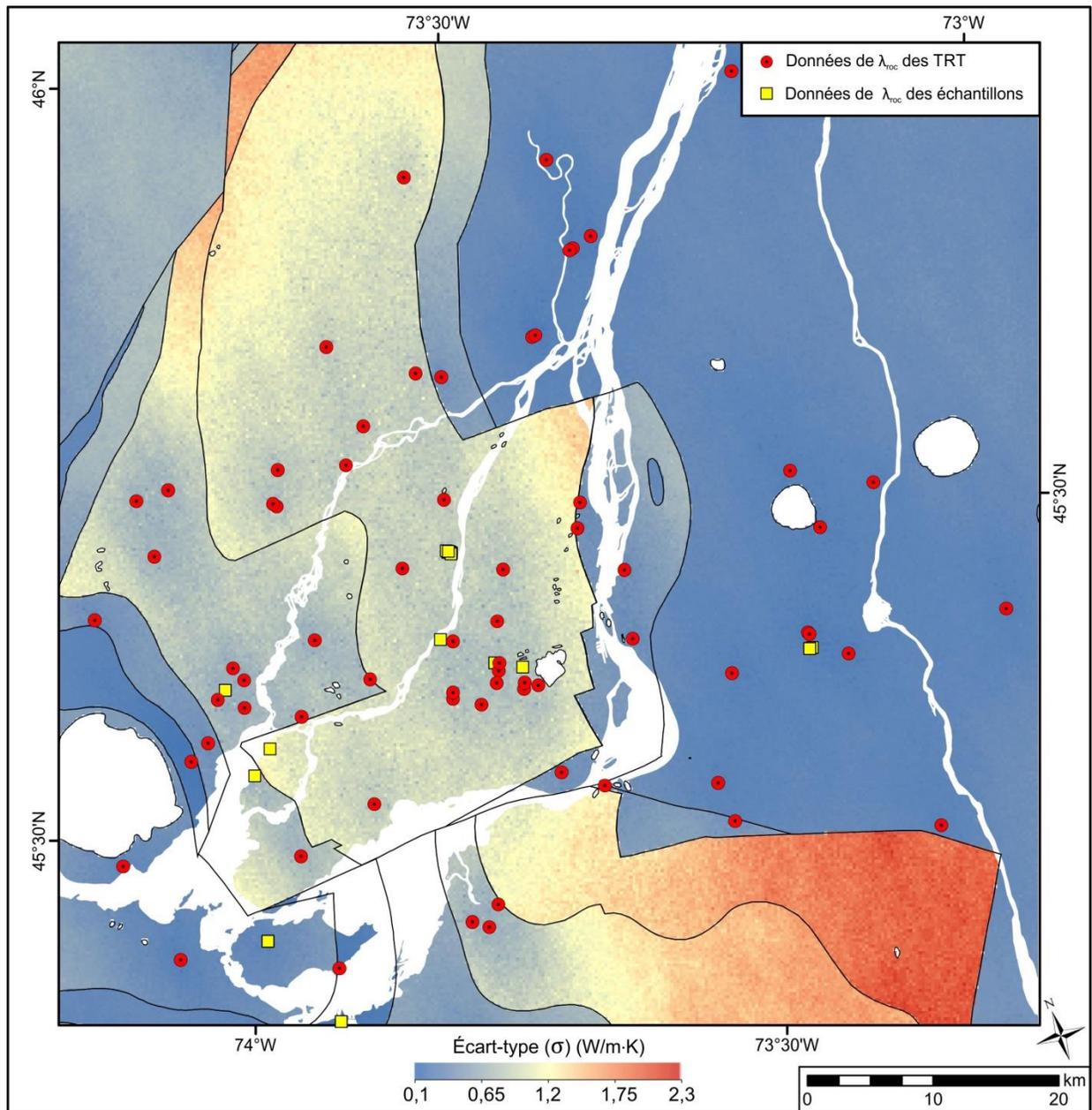
Les variogrammes sont tous anisotropes et ont les mêmes portées (respectivement 80 et 40 km) et azimuts (respectivement 335° et 65°) qui correspondent à l'orientation des unités thermiques dans la région. Ici, les variations spatiales sont donc plus importantes dans l'axe est-ouest. Toutefois, le plateau et l'effet pépite des variogrammes sont les mêmes que pour les simulations dans l'ensemble du bassin des BTSL.



Simulation de λ_{roc} dans la région de Montréal – Résultats

La carte de la distribution de la conductivité thermique du roc en surface de la région de Montréal a été obtenue en fusionnant chacune des distributions réalisées au sein des neuf unités thermiques. En effet, la distribution de chacune des unités thermiques a été découpée séparément selon la carte géologique présentée à la page précédente. Ainsi, seules les zones des unités thermiques présentes en surface ont été conservées, telles que le montrent les limites des unités thermiques sur la carte ci-contre (lignes noires). De plus, il est à noter que cette carte de la distribution est la moyenne de 100 réalisations de λ_{roc} pour chacune des unités thermiques.

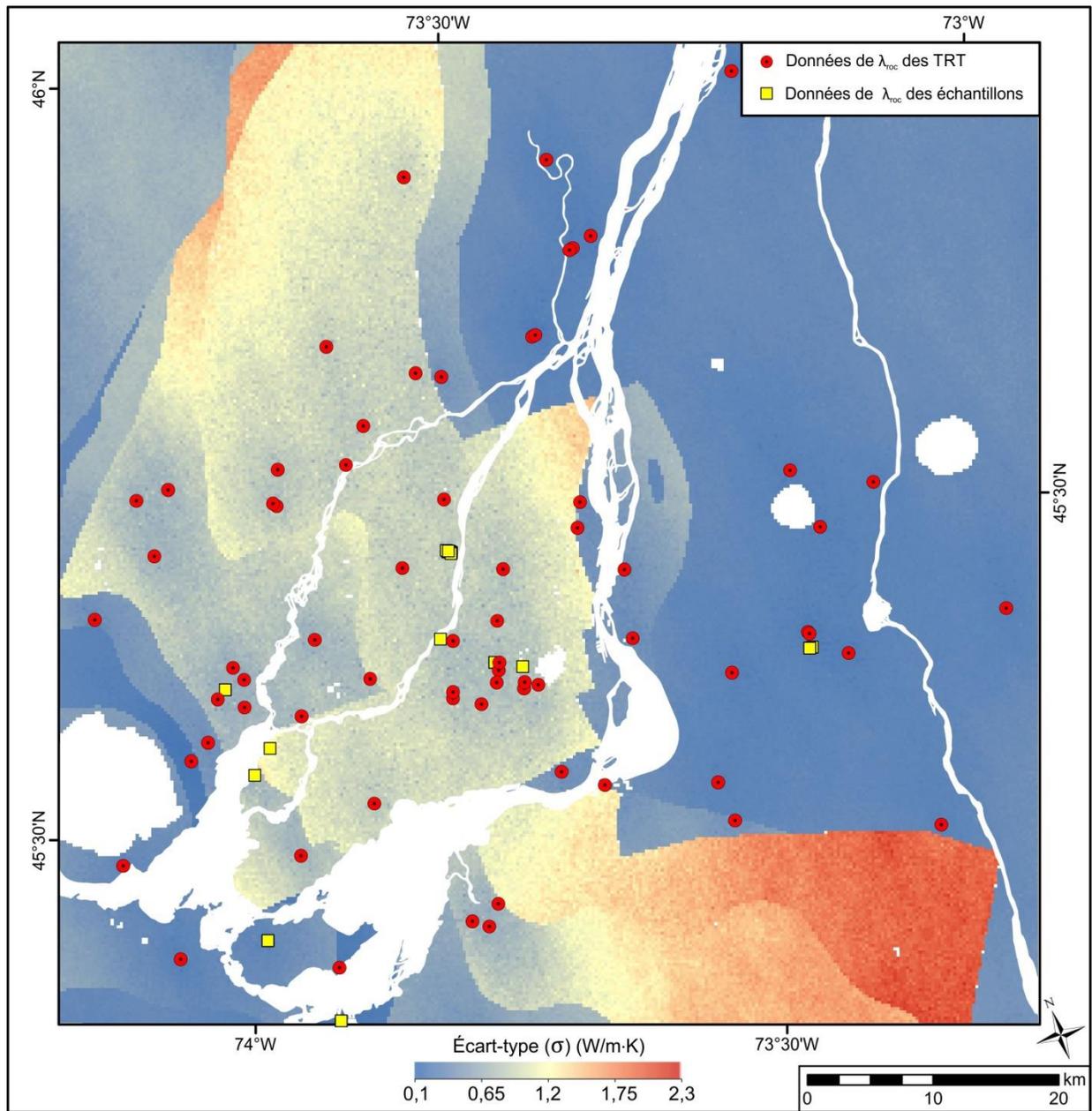


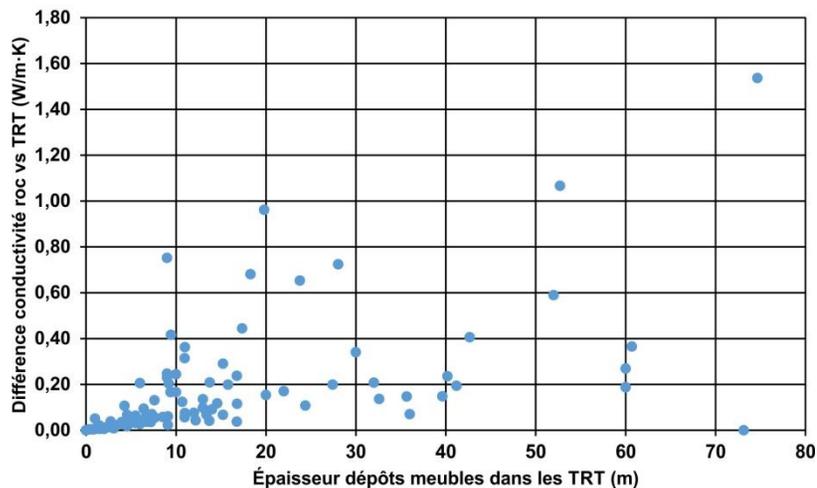
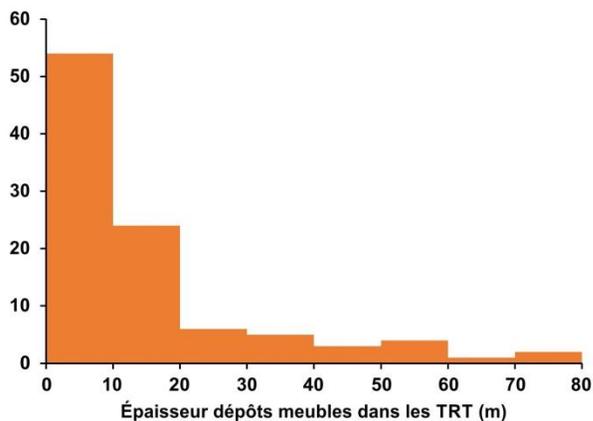
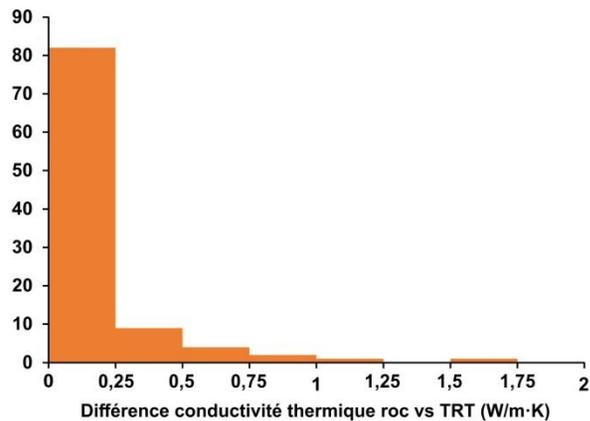


Simulation de λ_{roc} dans la région de Montréal – Incertitude

La carte de la distribution de l'écart-type de la conductivité thermique du roc en surface consiste à l'écart-type des 100 réalisations de λ_{roc} pour chacune des unités thermiques. Donc, plus l'écart-type est élevé, plus l'incertitude des résultats simulés est élevée. Comme montré par les paramètres des variogrammes, les unités thermiques Couverture et Cairnside montrent l'incertitude la plus faible ce qui est visible sur la carte ci-dessous où ces unités montrent des écarts-types faibles dans la plage de couleur de bleu foncé pour l'ensemble de leur surface.

Les zones où l'écart-type, et donc l'incertitude, est plus élevé correspondent aux régions les plus éloignées des données utilisées au sein de chaque unité thermique.





Utilisation des résultats

Les cartes présentées précédemment sont les distributions de la conductivité thermique du roc en surface seulement, c'est-à-dire pour les 150 premiers mètres environ, correspondant ainsi à la profondeur atteinte par les forages utilisés pour les TRT et les systèmes verticaux de pompes à chaleur géothermique. Toutefois, au Québec, une certaine épaisseur de dépôts meubles est présente au-dessus de la surface du roc, généralement moins de 20 m, mais pouvant atteindre plus de 100 m dans certaines régions (voir page suivante). Donc, les cartes de la distribution de la conductivité thermique du roc en surface ne tiennent pas compte des dépôts meubles, ce qui n'est pas le cas pour les TRT, par exemple, et pour tout système géothermique. En effet, ces derniers sont influencés par tous les matériaux rencontrés dans le sous-sol, ce qui marque une légère différence dans les valeurs de conductivité thermique (figure du haut). Dans l'optique d'anticiper la conductivité thermique effective le long d'éventuels échangeurs de chaleur au sol, les cartes de la distribution de la conductivité thermique du roc en surface doivent être utilisées conjointement avec une carte de la distribution de l'épaisseur des dépôts meubles (p. ex. page suivante). Ainsi, ceci permettra de mieux estimer la conductivité thermique effective attendue le long des échangeurs de chaleur au sol, en tenant compte de la présence de dépôts meubles (figure du bas). Les équations suivantes ont été utilisées pour estimer la conductivité thermique du roc en surface à partir des TRT et peuvent être utilisées à leur tour pour évaluer la conductivité thermique effective d'un endroit particulier pour un éventuel échangeur de chaleur au sol. Dans ces équations, il suffit d'appliquer la même méthodologie pour les TRT que pour un éventuel échangeur de chaleur au sol.

$$\lambda_{TRT} = \frac{(\lambda_{roc} \cdot e_{roc}) + (\lambda_{DM} \cdot e_{DM})}{e_{TRT}}$$

$$e_{roc} = e_{TRT} - e_{DM}$$

λ_{DM} = conductivité thermique des dépôts meubles (1,5 W/m·K)

λ_{roc} = conductivité thermique du roc à cet endroit, tiré des cartes de ce rapport (W/m·K)

λ_{TRT} = conductivité thermique du TRT (W/m·K)

e_{DM} = épaisseur des dépôts meubles à cet endroit, tirée des cartes d'épaisseur (m)

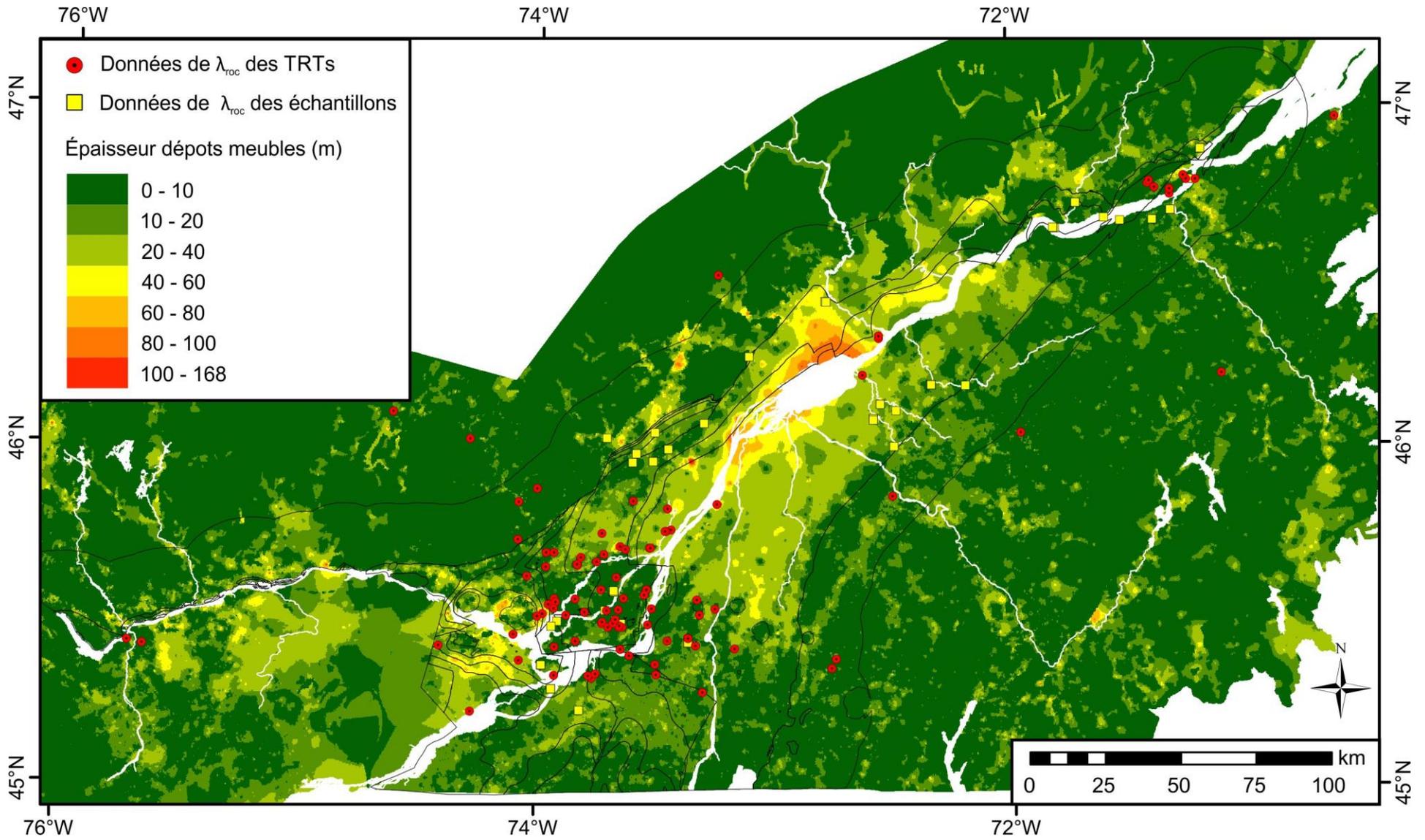
e_{roc} = épaisseur de roc rencontrée le long du TRT (m)

e_{TRT} = longueur du TRT (m)

L'équation finale pour calculer la conductivité thermique effective d'un éventuel échangeur de chaleur (λ_{TRT}) à partir des résultats de ce rapport :

$$\lambda_{TRT} = \frac{(\lambda_{roc} \cdot (e_{TRT} - e_{DM})) + (1,5 \cdot e_{DM})}{e_{TRT}}$$

Exemple de carte d'épaisseur des dépôts meubles



Source des données de l'épaisseur des dépôts meubles :
Géologie urbaine et environnementale de la vallée du Saint-Laurent

<https://www.mcan.gc.ca/sciences-terre/geographie/information-topographique/donnees-gratuites-geogratis/repertoire-telechargement-documentation/17293>

Conclusions et perspectives

Ce projet de recherche a permis d'estimer la conductivité thermique à la surface du roc, pour le bassin des BTSL et sa périphérie, à l'aide de simulations séquentielles gaussiennes. De plus, une carte spécifiquement pour la région de Montréal a été réalisée avec une résolution plus fine. Tandis que les mesures issues des TRT s'avèrent les données les plus représentatives pour le dimensionnement d'un système géothermique, deux autres sources de données de conductivité thermique ont également été utilisées afin d'offrir une couverture de données satisfaisante pour la réalisation de ce travail : des échantillons de surface, ainsi que des diagraphies géophysiques enregistrées dans d'anciens puits d'exploration pétrolière et gazière.

Une carte de l'incertitude de la conductivité thermique estimée a également été produite pour les deux régions (BTSL et Montréal). Ce paramètre doit être utilisé conjointement avec la conductivité thermique afin d'avoir une idée de la fiabilité des valeurs estimées. Ainsi, une valeur de conductivité thermique ayant une grande incertitude devra être utilisée avec plus de précautions, en tenant compte des valeurs minimale et maximale définies par la valeur d'incertitude. Il sera donc possible d'effectuer des évaluations de coûts d'implantation de systèmes géothermiques en tenant compte de l'incertitude, ce qui générera un écart de coûts minimal, maximal et probable, puis aidera à la prise de décision par les partis concernés.

De plus, les cartes de la distribution de la conductivité thermique sont celles de la surface du roc. Toutefois, une épaisseur de dépôt meuble recouvre le roc sur presque tout le territoire d'étude. Cette épaisseur de dépôts meubles est majoritairement inférieure à 20 m, mais peut atteindre 100 m à certains endroits. Ainsi, les cartes de la distribution de la conductivité thermique du roc en surface ne tiennent pas compte des dépôts meubles, ce qui n'est pas le cas pour les TRT. Ainsi, les données de TRT ont été ajustées afin de tenir compte de cette réalité. Les raisons pour lesquelles les dépôts meubles n'ont pas été considérés dans cette étude sont les suivantes :

- 1) Les dépôts meubles montrent une grande variabilité spatiale, tant au niveau de leur épaisseur que de leur composition, et la seule carte disponible pour toute l'étendue des BTSL s'avère peu précise ;
- 2) Aucune valeur expérimentale de conductivité thermique des dépôts meubles à l'intérieur de la région à l'étude n'a été répertoriée ;
- 3) Comme l'épaisseur des dépôts meubles est principalement de moins de 20 m, leur influence sur la valeur de la conductivité thermique des TRT reste modeste.

- 4) Un travail de compilation et de modélisation avait d'abord été réalisé par Bédard *et al.* (2016), notamment sur la conductivité thermique du roc dans le bassin des BTSL. Étant donné le cadre limité du présent projet, il a été jugé judicieux de s'inspirer de cette première étude et de centrer l'objectif sur la surface du roc sans tenir compte des dépôts meubles dans les analyses.

Ainsi, une carte de l'épaisseur des dépôts meubles plus à jour et/ou plus locale selon la région d'intérêt sera nécessaire pour une meilleure estimation de la conductivité thermique effective le long d'éventuels échangeurs de chaleur au sol. Si des valeurs de conductivité thermique des dépôts meubles sont connues pour la région d'intérêt, il sera aussi pertinent de les intégrer, en remplacement de la constante λ_{DM} de 1,5 W/m·K au calcul de conductivité thermique effective λ_{TRT} d'un endroit précis (voir section « *Utilisation des données* »).

Finalement, il existe plusieurs données de TRT qui n'ont pas été compilées dans le cadre de ce projet, mais dont l'ajout viendrait bonifier la couverture spatiale des données, améliorer les résultats de simulation et ainsi réduire l'incertitude locale. La méthodologie élaborée dans le cadre de ce travail permet une mise à jour relativement facile advenant l'acquisition ou l'ajout de nouvelles données de TRT.

Remerciements

Nous tenons à remercier Beaudoin-Hurens, Richelieu Hydrogéologie, Akonovia et la Coalition canadienne de l'énergie géothermique qui ont transmis des rapports de TRT, ce qui a permis de réaliser ce projet de recherche.



Références

- Asselin, S. (2016) *Caractérisation et cartographie de la conductivité thermique du sous-sol de Ville Mont-Royal*. Université Laval, Département de géologie et génie géologique. Québec, Canada. Projet de fin d'étude, B.Sc. 60 pages.
- Bédard, K., Comeau, F.-A., Millet, E., Raymond, J., Malo, M. et Gloaguen, E. (2016) *Évaluation des ressources géothermiques du bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent*. Institut national de la recherche scientifique. Québec. R1659. 100 pages. <http://espace.inrs.ca/4845/>.
- Bédard, K., Comeau, F.-A., Raymond, J., Malo, M. et Nasr, M. (2017) Geothermal Characterization of the St. Lawrence Lowlands Sedimentary Basin, Québec, Canada. *Natural Resources Research*. <https://doi.org/10.1007/s11053-017-9363-2>.
- CCÉG (2012) *État de l'industrie canadienne de la géothermie 2011 - Analyse du marché et enquête de l'industrie*. Coalition canadienne de l'énergie géothermique. 41 pages. http://www.geo-exchange.ca/fr/UserAttachments/article82_Final%20Stats%20Report%202011%20-%20February%206,%202012_F.pdf.
- Comeau, F.-A., Bédard, K. et Malo, M. (2013) *Lithostratigraphie standardisée du bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent basée sur l'étude des diagraphies*. Institut national de la recherche scientifique. Québec. Rapport de recherche R-1442 (INRSCO2-2013-V1.4). 201 pages. <http://espace.inrs.ca/1645/>.
- Deutsch, C.V. et Journel, A.G. (1997) *GSLIB - Geostatistical Software Library and user's guide. Second edition*. Oxford University Press. 384 pages.
- Jaziri, N. (2016) *Rapport de terrain : Observations géologiques près de l'École Carignan-Salières*. Institut National de la Recherche Scientifique - Centre Eau Terre Environnement. Québec, Canada. 27 pages.
- 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. Open File 4887. <https://doi.org/10.4095/220364>.
- Journel, A.G. et Huijbregts, C.J. (1978) *Mining geostatistics*. The Blackburn Press. New York, USA. 600 pages.
- Nasr, M. (2016) *Évaluation des propriétés thermiques de la Plate-forme du Saint-Laurent : Mesures au laboratoire et approche diagraphique*. Institut National de la Recherche Scientifique - Centre Eau Terre Environnement, Sciences de la Terre. Québec, Canada. M.Sc. 242 pages. <http://espace.inrs.ca/4637/>.
- 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, 68-80. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2018.04.004>.
- Pasquier, P. (2018) Interpretation of the first hours of a thermal response test using the time derivative of the temperature. *Applied Energy*, 213, 56-75. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.01.022>.
- Perozzi, L., Raymond, J., Asselin, S., Gloaguen, E., Malo, M. et Bégin, C. (2016) *Simulation géostatistique de la conductivité thermique : application à une région de la communauté métropolitaine de Montréal*. Institut national de la recherche scientifique. Québec. Rapport final R1663. 21 pages. <http://espace.inrs.ca/529/>.
- Raymond, J., Therrien, R., Gosselin, L. et Lefebvre, R. (2011) A Review of Thermal Response Test Analysis Using Pumping Test Concepts. *Ground Water*, 49 (6), 932-945. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2010.00791.x>.
- Srivastava, R.M. (1994) An overview of stochastic methods for reservoir characterization. Dans: Yarus, J.M. et R.L. Chambers [eds] *Stochastic modeling and geostatistics - Principle, methods, and case studies*. AAPG computer Application in geology, No. 3. American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, USA. pp. 3-16.
- Talbot Poulin, M.C., Comeau, G., Tremblay, Y., Therrien, R., Nadeau, M.M., Lemieux, J.M., Molson, J., Fortier, R., Therrien, P., Lamarche, L., Donati-Daoust, F. et Bérubé, S. (2013) *Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du territoire de la Communauté métropolitaine de Québec, Rapport final*. Département de géologie et de génie géologique, Université Laval. 172 pages, 19 annexes, 28 cartes.