

Potentiel géothermique du nord du Québec: évaluation préliminaire

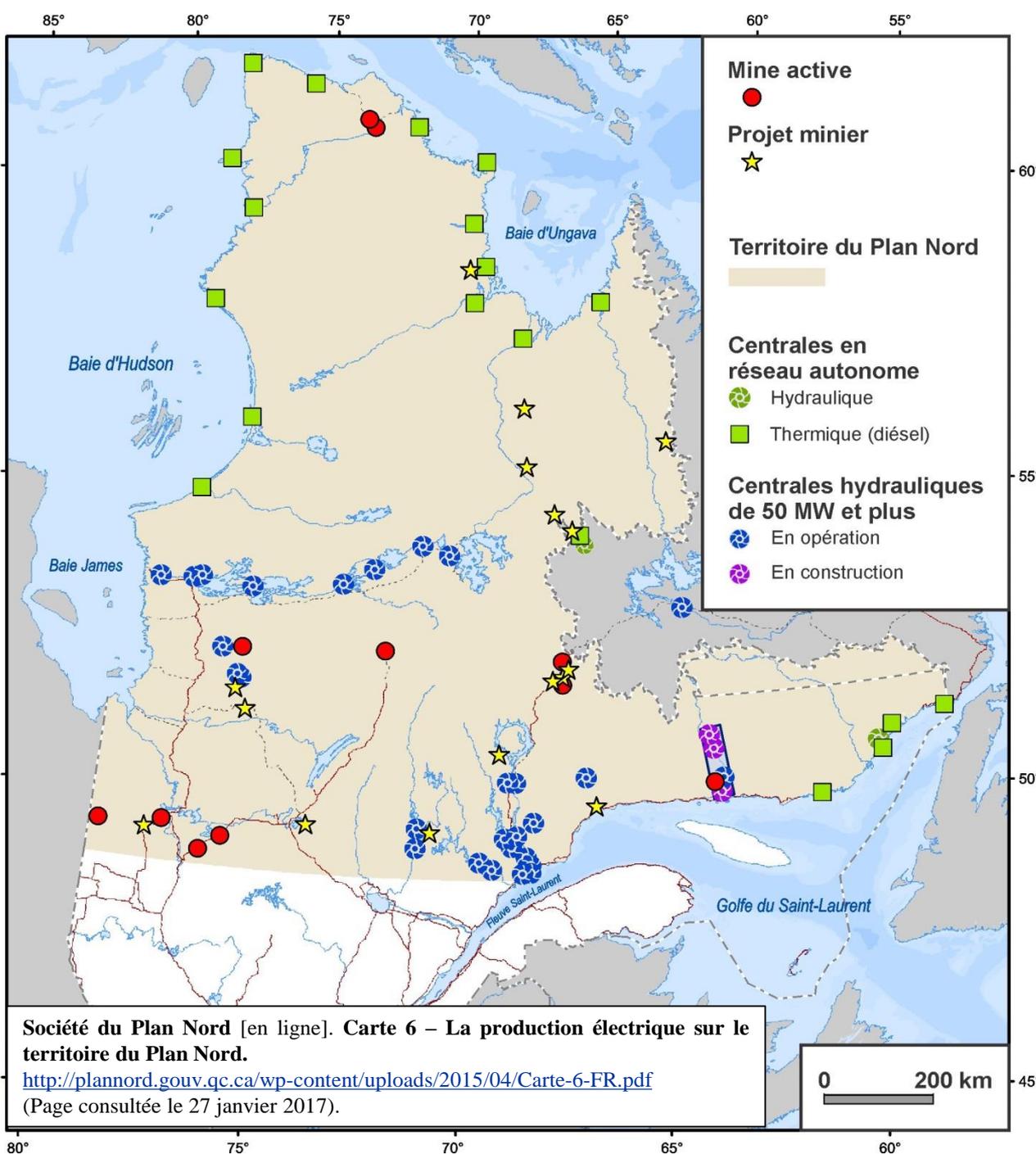
Félix-Antoine Comeau
Jasmin Raymond
Michel Malo

Rapport de recherche 1660

© INRS, Centre - Eau Terre Environnement, 2016
Tous droits réservés

ISBN : 978-2-89146-899-2 (version électronique)

Dépôt légal - Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2018
Dépôt légal - Bibliothèque et Archives Canada, 2018

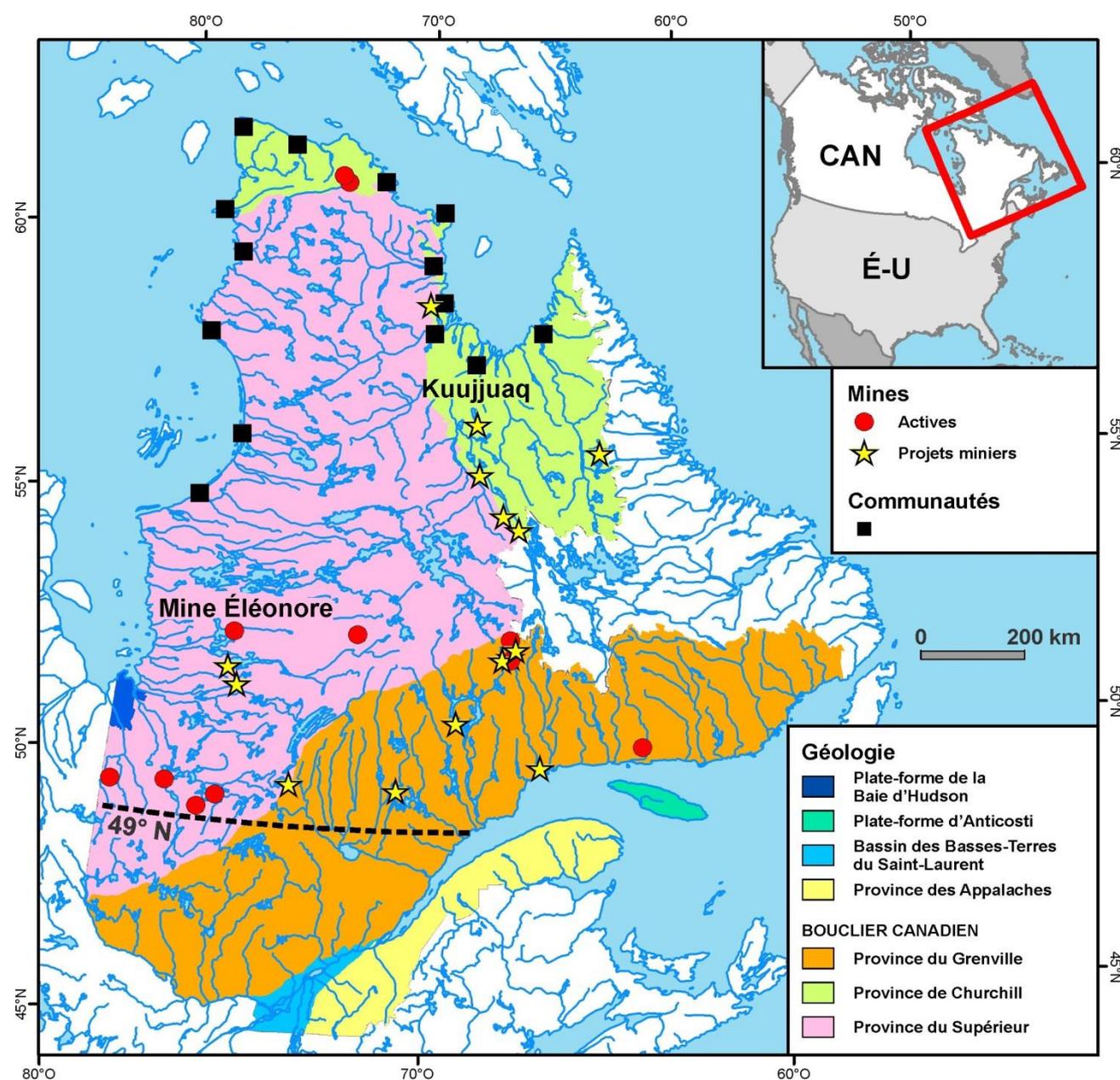


Le territoire du Plan Nord

Le Plan Nord s'étend au nord du 49e parallèle, puis au nord du fleuve Saint-Laurent et du golfe Saint-Laurent sur une superficie de près de 1,2 million de km², représentant 72 % de la superficie du Québec. On y compte plus de 120 000 habitants, dont le tiers est autochtone, réparti en quatre nations (inuïte, crie, innue et naskapie) et résidant dans 31 communautés.

Le territoire du Nord québécois renferme de nombreux gisements miniers et assure la totalité de la production québécoise de plusieurs minéraux. Il recèle également un potentiel énorme qui n'est pas encore exploité. Ainsi, l'industrie minière est une source importante d'emplois et de retombées économiques pour le Québec, et ce, pour encore plusieurs années à venir. À l'heure actuelle, on retrouve 11 mines actives, ainsi que 16 projets miniers en phase avancée.

L'exploitation et la transformation des ressources naturelles sont des secteurs d'activité particulièrement énergivores. L'offre énergétique à prix concurrentiel est donc un facteur important pour attirer des investisseurs et réaliser des projets économiquement viables. De plus, le gouvernement entend mettre l'accent sur le développement d'énergies propres et novatrices pour l'approvisionnement des communautés isolées du territoire du Plan Nord. En effet, une partie importante des mines actives, des projets miniers et des communautés nordiques est à l'extérieur du réseau intégré d'électricité. Ainsi, l'approvisionnement est particulièrement dispendieux et repose actuellement sur des produits pétroliers et gaziers transportés par bateau, par train ou par camion.



Géologie générale

À l'image de ses ressources minérales, la géologie du Québec est très variée. Elle comprend trois grands ensembles géologiques dont l'âge va de l'Archéen au Crétacé, sans compter la couverture de dépôts meubles quaternaires : ce sont (1) le Bouclier canadien, constitué de roches précambriennes, (2) les Appalaches, formées essentiellement de roches paléozoïques, tout comme (3) le bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent, ainsi que les plateformes d'Anticosti et de la Baie d'Hudson.

Le Bouclier canadien constitue 90 % du sous-sol québécois. Trois grands blocs structuraux ou provinces géologiques s'y juxtaposent (figure 2; Hocq, 1994) : la Province du Supérieur (2,85 à 2,65 Ga), la Province de Churchill (2,8 à 1,8 Ga) et la Province de Grenville (2,65 Ga à 970 Ma).

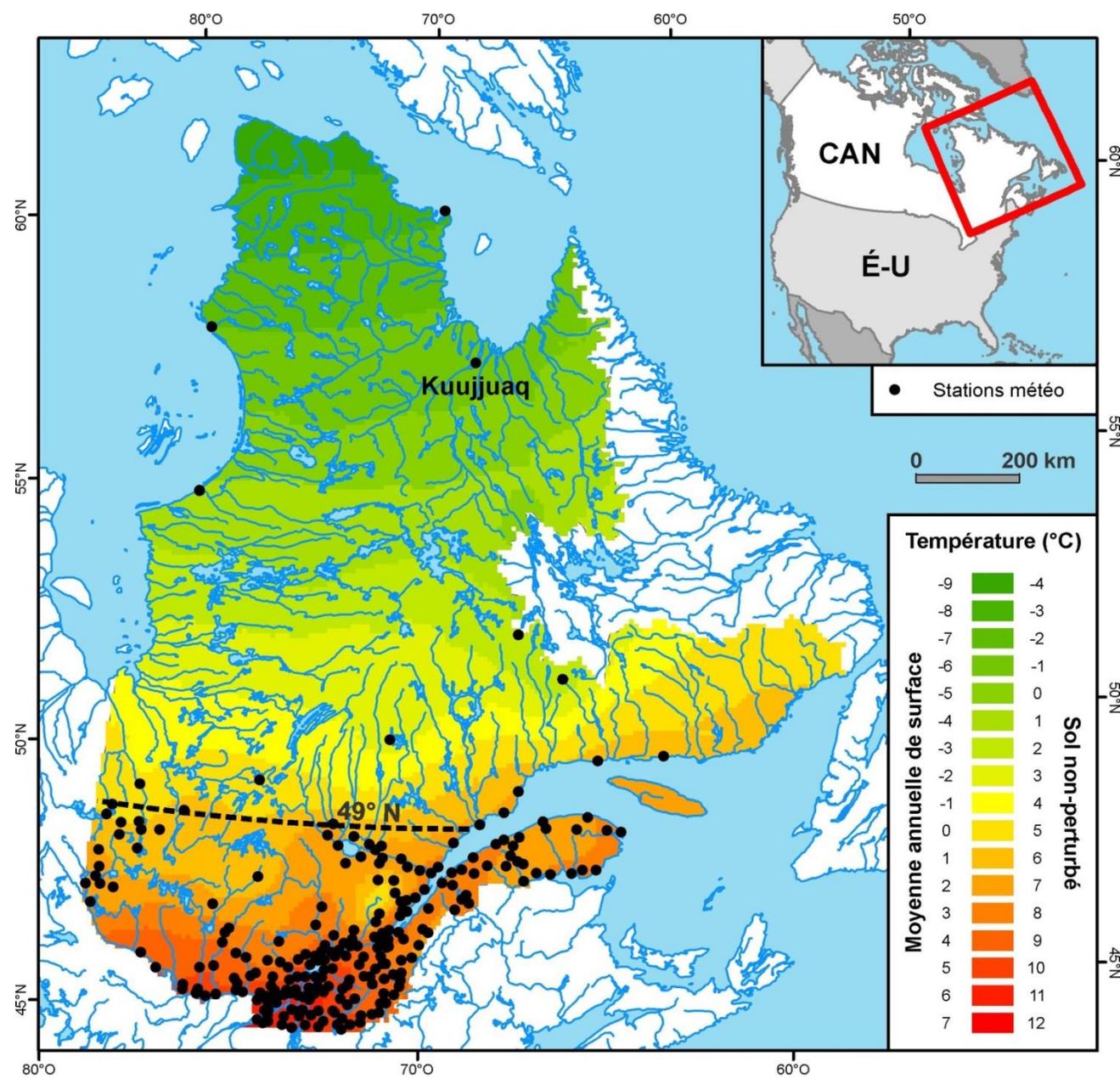
La Province du Supérieur est constituée de roches plutoniques et gneissiques portées au faciès métamorphique des amphibolites ou des granulites et des roches volcaniques et sédimentaires au faciès des schistes verts. Elle est bordée au nord et à l'est par la Province de Churchill et au sud-est par la Province de Grenville.

Le Churchill est caractérisé par trois zones mobiles : (1) l'Orogène du Nouveau-Québec (Fosse du Labrador), (2) l'Orogène de l'Ungava (Fosse de l'Ungava) et (3) l'Orogène Torngat, formées principalement de roches sédimentaires et ignées aux faciès métamorphiques des schistes verts et des amphibolites.

La Province de Grenville est caractérisée par un degré de métamorphisme général élevé et par une importante quantité de mangérites et d'anorthosites.

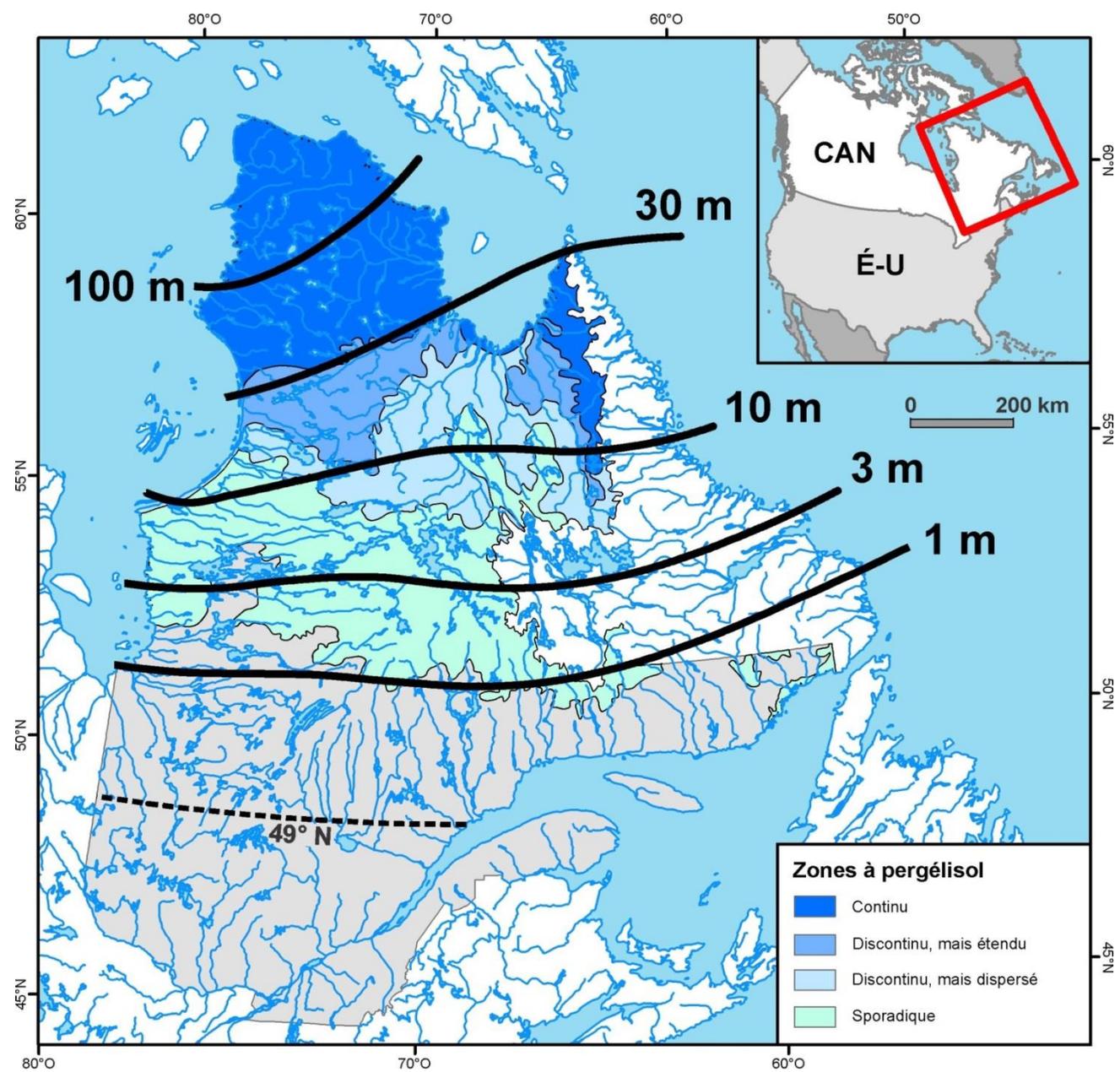
Simard, A. 2000. **Le potentiel minéral du Québec : un état de la question**. Chronique de la recherche minière 539 (juin 2000), Ministère des Ressources naturelles, Québec, QC, pp 3–15.

<https://www.mern.gouv.qc.ca/publications/mines/geologie/geologie-potentiel-mineral.pdf>



Températures annuelles

Dans le nord du Québec, les températures moyennes annuelles en surface vont de -9 à 2 °C, ce qui est une des caractéristiques majeures du climat nordique de cette région. La température de la sous-surface peu profonde a été déduite des données météorologique en utilisant l'équation empirique pour la température du sol non perturbée proposée par Ouzzane et al. (2015). Par exemple, la température du sol non perturbée obtenue pour le village de Kuujuaq est de -1 °C, tandis que la température moyenne annuelle de surface est de -6 °C.



Pergélisol

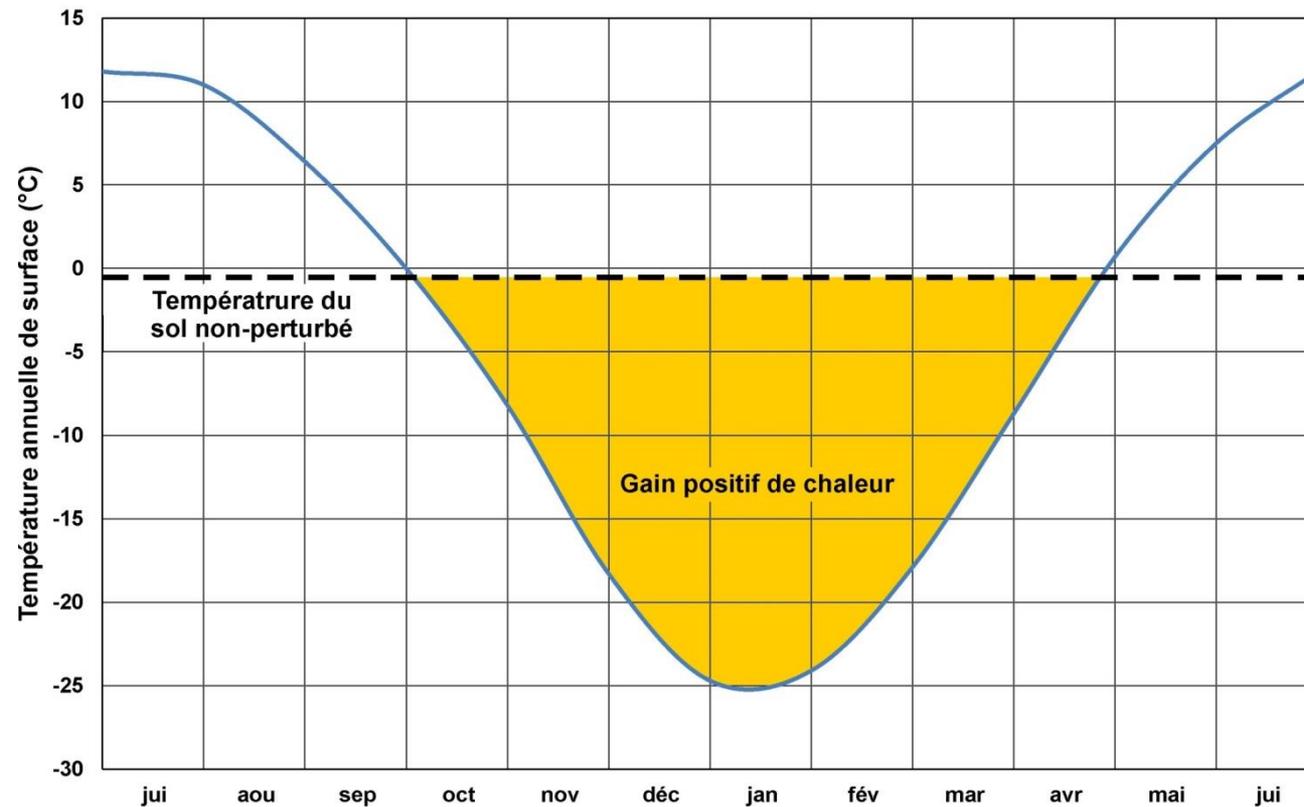
La présence de pergélisol, d'une épaisseur pouvant atteindre 500 m dans la partie nord du territoire, est une autre caractéristique majeure du sous-sol peu profond du nord du Québec.

Lemieux, J.-M., et al., 2016. Groundwater occurrence in cold environments: examples from Nunavik, Canada.

Hydrogeology Journal, Volume 24, Issue 6, pp 1497–1513.

<https://doi.org/10.1007/s10040-016-1411-1>

Kuujjuaq (1981-2010)



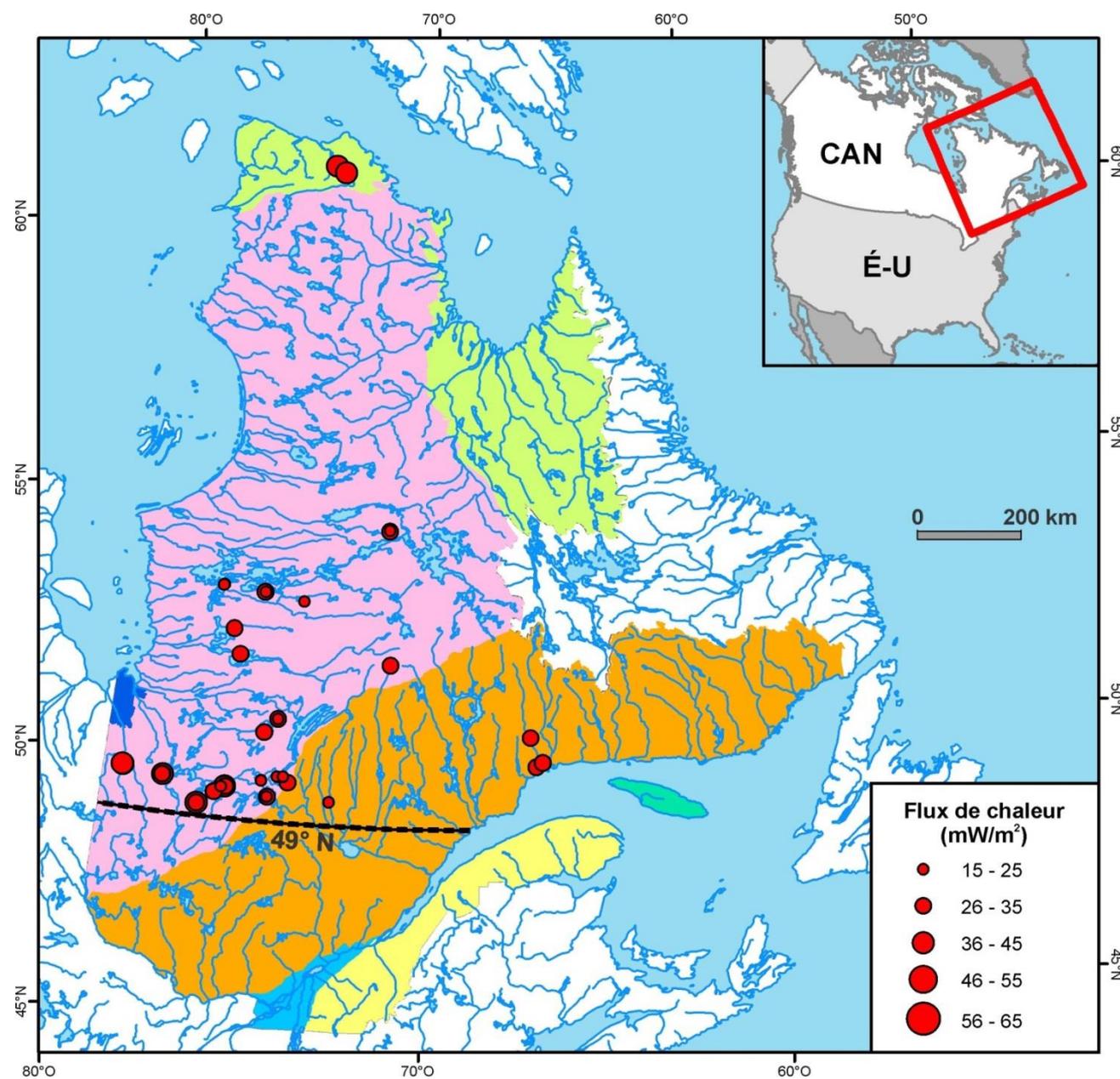
Variations saisonnières

De plus, il existe de fortes variations saisonnières qui modifient la température de la surface à -25 °C en hiver et au-dessus de 10 °C en été.

Environnement et Changement climatique Canada, [En ligne]. Graphique des températures et des précipitations pour les normales climatiques au Canada de 1981 à 2010 - Kuujjuaq A.

http://climat.meteo.gc.ca/climate_normals/results_1981_2010_f.html?stnID=6095&autofwd=1

(Consulté le 7 avril 2017).



Données géothermiques

Dans le nord du Québec, les données géothermiques, telles que les valeurs de flux de chaleur, sont rares. Toutefois, 28 sites contenant des données de conductivité thermique, de production de chaleur et de flux de chaleur sont disponibles, où les valeurs de flux de chaleur vont de 20 à 47 mW/m². Ce faible flux de chaleur est typique du Bouclier canadien (Majorowicz et Minea, 2015), où les données montrent une moyenne de respectivement 30,8, 32,1 et 34,4 mW/m² pour les provinces géologiques de Grenville, du Supérieur et de Churchill.

Majorowicz, J.A. et Minea, V., 2015. Shallow and deep geothermal energy potential in low heat flow/cold climate environment: northern Québec, Canada, case study. *Environmental Earth Sciences* 74(6): 5233-5244. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4533-1>

Site #	Nom	Nord (°)	Est (°)	Cond. ther. (W/mK)	Gén. chal. ($\mu\text{W}/\text{m}^3$)	Flux (mW/m^2)	Gradient (mK/m)	Source
Province de Grenville								
4	Clarke City	50.21	-66.64	2.1	0.1	30.0	15.4	6
8	Crevier	49.47	-72.77	1.9	1.0	28.0	13.0	3
24	Rivière Sainte Marguerite	50.78	-66.78	1.7	0.1	33.0	18.2	4
26	Sept-Îles	50.30	-66.45	2.0	0.0	32.0	15.5	6
			Moyenne	1.9	0.3	30.8	15.5	
Province du Supérieur								
1	Boivinnet	49.60	-75.98	3.2	0.4	31.0	8.0	5
2	Camp Coulon	54.79	-71.29	3.3	1.4	27.9	7.0	9
3	Chapais	49.79	-74.81	4.0	0.2	26.5	5.4	3, 4
5	Clearwater	52.21	-75.81	2.6	0.5	33.1	11.9	9
6	Conlagas	49.49	-76.17	3.2	0.4	31.0	8.5	5
7	Corvet	53.32	-73.92	2.8	0.6	26.8	8.6	9
9	Desmaraisville	49.61	-75.88	3.4	0.6	34.1	9.6	3, 4
10	Eastmain River	52.17	-76.46	2.9	0.6	33.5	9.4	10
11	Éléonore	52.70	-76.08	2.5	1.0	31.3	11.8	9
12	Frotet-Troilus	51.01	-74.47	2.6	0.8	29.0	9.6	7
13	Gamache	49.48	-74.61	2.9	0.1	28.0	8.8	5
14	Grevet	49.24	-76.65	4.3	0.5	41.0	8.3	5
15	Île Marguerite	49.89	-74.17	3.5	0.1	27.0	6.4	5
16	Lac au Doré	49.88	-74.33	3.3	0.1	28.0	7.3	5
17	Lac Girafe	52.18	-71.10	6.1	0.9	37.0	5.2	7
18	Lagrande	53.53	-76.56	2.9	0.2	19.9	5.9	9
19	Lemoine	49.79	-74.03	3.1	1.0	33.0	9.7	7
20	Matagami	49.72	-77.74	3.5	0.1	37.7	9.9	3, 4, 8
21	Matoush	52.00	-72.09	5.5	2.3	44.8	6.5	10
22	Poste Lemoine	53.46	-75.21	2.6	0.4	27.1	9.6	9
25	Selbaie	49.82	-78.96	4.9	0.5	47.0	8.5	5
27	Tortigny	50.73	-74.85	2.7	0.2	32.5	10.7	7
			Moyenne	3.4	0.6	32.1	8.5	
Province de Churchill								
23	Raglan	61.70	-73.58	2.9	0.1	30.8	11.7	9
28	Asbestos Hill	61.81	-73.97	3.2	0.6	38.0	12.0	1, 2
			Moyenne	3.0	0.4	34.4	11.8	

Données géothermiques

¹ Taylor, A.E. et Judge, A., 1979. Permafrost studies in northern Quebec. *Géographie physique et Quaternaire* 33(3-4): 245-251. <http://dx.doi.org/10.7202/1000361ar>

² Drury, M.J., 1985. Heat flow and heat generation in the Churchill Province of the Canadian Shield and their paleotectonic significance. *Tectonophysics* 115(1-2): 25-44. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(85\)90097-6](https://doi.org/10.1016/0040-1951(85)90097-6)

³ Mareschal, J.-C., Pinet, C., Gariépy, C., Jaupart, C., Bienfait, G., Dalla-Coletta, G., Jolivet, J., Lapointe, R., 1989. New heat flow density and radiogenic heat production data in the Canadian Shield and the Québec Appalachians. *Canadian Journal of Earth Sciences* 26(4), 845-852. <https://doi.org/10.1139/e89-068>

⁴ Pinet, C., Jaupart, C., Mareschal, J.-C., Gariépy, C., Bienfait, G., Lapointe, R., 1991. Heat flow and structure of the lithosphere in the eastern Canadian shield. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 96(B12): 19941-19963. <https://doi.org/10.1029/91JB01020>

⁵ Guillou, L., Mareschal, J.-C., Jaupart, C., Gariépy, C., Bienfait, G., Lapointe, R., 1994. Heat flow, gravity and structure of the Abitibi belt, Superior Province, Canada: Implications for mantle heat flow. *Earth and Planetary Science Letters* 122(1-2): 103-123. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(94\)90054-X](https://doi.org/10.1016/0012-821X(94)90054-X)

⁶ Guillou-Frotier, L., Mareschal, J.-C., Jaupart, C., Gariépy, C., Lapointe, R., Bienfait, G., 1995. Heat flow variations in the Grenville Province, Canada. *Earth and Planetary Science Letters* 136(3-4): 447-460. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(95\)00187-H](https://doi.org/10.1016/0012-821X(95)00187-H)

⁷ Mareschal, J.-C., Jaupart, C., Gariépy, C., Cheng, L.Z., Guillou-Frotier, C., Bienfait, G., Lapointe, R., 2000. Heat flow and deep thermal structure near the southeastern edge of the Canadian Shield. *Canadian Journal of Earth Sciences* 37(2-3): 399-414. <https://doi.org/10.1139/e98-106>

⁸ Perry, H.K.C., Jaupart, C., Mareschal, J.-C., Bienfait, G., 2006. Crustal heat production in the Superior Province, Canadian Shield, and in North America inferred from heat flow data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 111(B04401). <https://doi.org/10.1029/2005JB003893>

⁹ Lévy, F., Jaupart, C., Mareschal, J.-C., Bienfait, G., Limare, A., 2010. Low heat flux and large variations of lithospheric thickness in the Canadian Shield. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 115 (B06404). <https://doi.org/10.1029/2009JB006470>.

¹⁰ Jaupart, C., Mareschal, J.-C., Bouquerel, H., Phaneuf, C., 2014. The building and stabilization of an Archean Craton in the Superior Province, Canada, from a heat flow perspective. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 119(12): 9130-9155. <https://doi.org/10.1002/2014JB011018>

Site #	Nom	T ₀ (°C)	T ₅₀₀ (°C)	T ₁₀₀₀ (°C)	T ₂₀₀₀ (°C)	T ₅₀₀₀ (°C)	D ₄₀ (m)
Province de Grenville							
4	Clarke City	5	12	20	34	78	2 411
8	Crevier	5	12	19	33	72	2 620
24	Rivière Sainte Marguerite	4	14	23	43	100	1 865
26	Sept-Îles	5	13	21	38	87	2 144
	Moyenne	5	13	21	37	84	2 260
Province du Supérieur							
1	Boivin	5	10	15	24	52	3 799
2	Camp Coulon	1	5	9	17	37	7 691
3	Chapais	4	7	11	17	37	5 593
5	Clearwater	3	9	16	28	64	3 047
6	Conlagas	5	10	15	24	53	3 737
7	Corvet	2	7	11	21	47	4 404
9	Desmaraisville	5	10	15	25	53	3 734
10	Eastmain River	3	9	14	26	58	3 423
11	Éléonore	2	8	15	27	61	3 326
12	Frotet-Troilus	4	10	15	26	56	3 576
13	Gamache	5	10	15	24	53	3 630
14	Grevet	5	10	14	24	51	3 852
15	Île Marguerite	4	8	12	20	43	4 681
16	Lac au Doré	4	8	13	21	47	4 243
17	Lac Girafe	2	5	8	14	31	7 588
18	Lagrande	2	5	9	16	35	5 860
19	Lemoine	4	9	14	25	53	3 842
20	Matagami	4	9	15	26	58	3 346
21	Matoush	3	7	11	19	39	6 935
22	Poste Lemoine	2	7	12	23	52	3 850
25	Selbaie	4	9	14	23	51	3 875
27	Tortigny	4	10	16	28	63	3 074
	Moyenne	4	8	13	23	50	4 414
Province de Churchill							
23	Raglan	-4	1	7	17	49	4 200
28	Asbestos Hill	-4	2	8	19	53	3 957
	Moyenne	-4	2	7	18	51	4 079

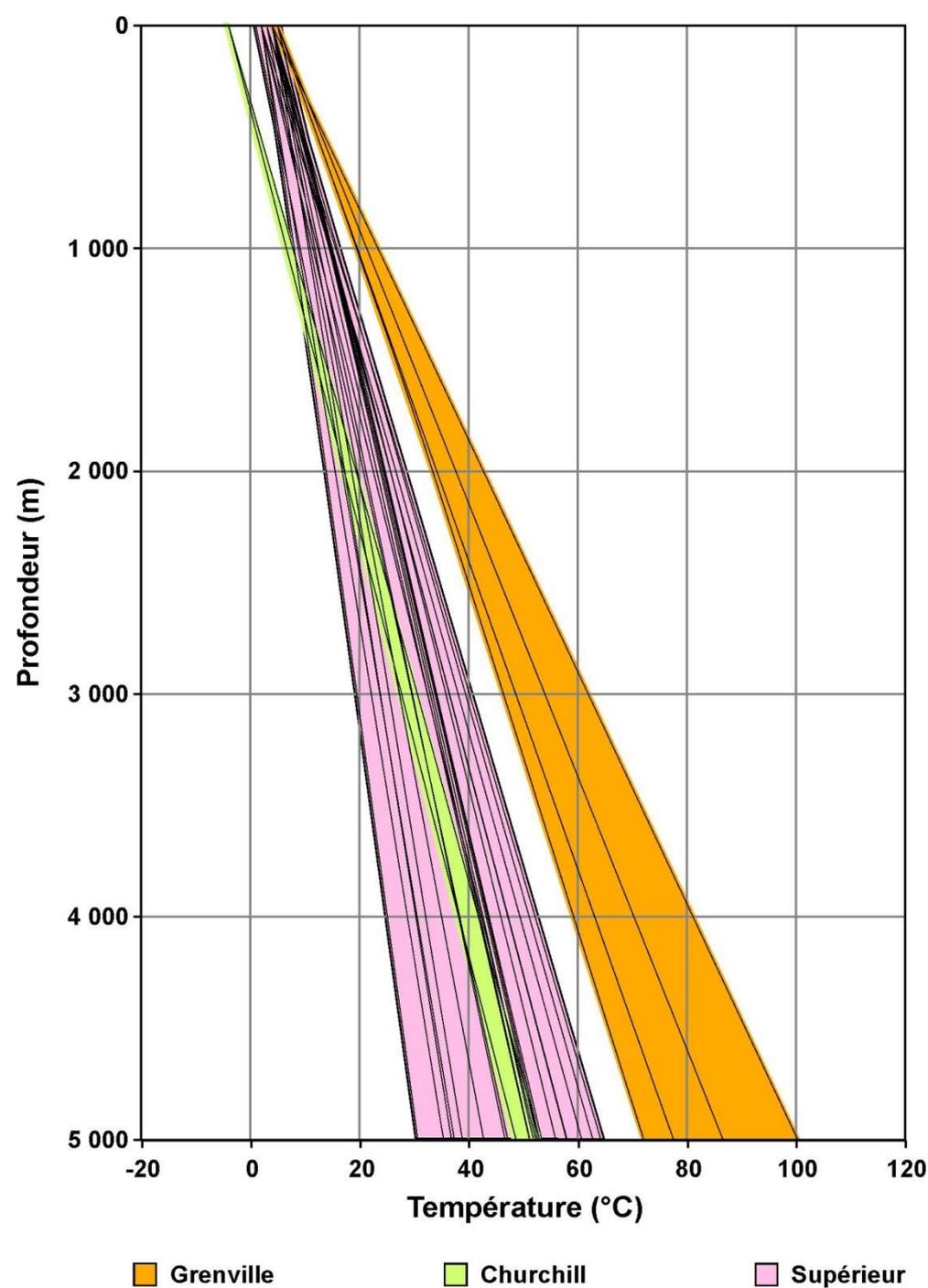
Profils de température

Les valeurs de température ont été calculées et extrapolées à la profondeur de la ressource géothermique, en tenant compte du flux de chaleur de surface, de la conductivité thermique et de la constante de génération de chaleur à l'emplacement des données géothermiques. Les valeurs de température en profondeur ont été obtenues en utilisant la théorie de la relation de diminution linéaire qui caractérise l'effet de génération de chaleur (Jessop, 1990):

$$T_z = T_0 + \left(\frac{Q_0 \cdot z}{\lambda} \right) - \left(\frac{A \cdot z^2}{2\lambda} \right)$$

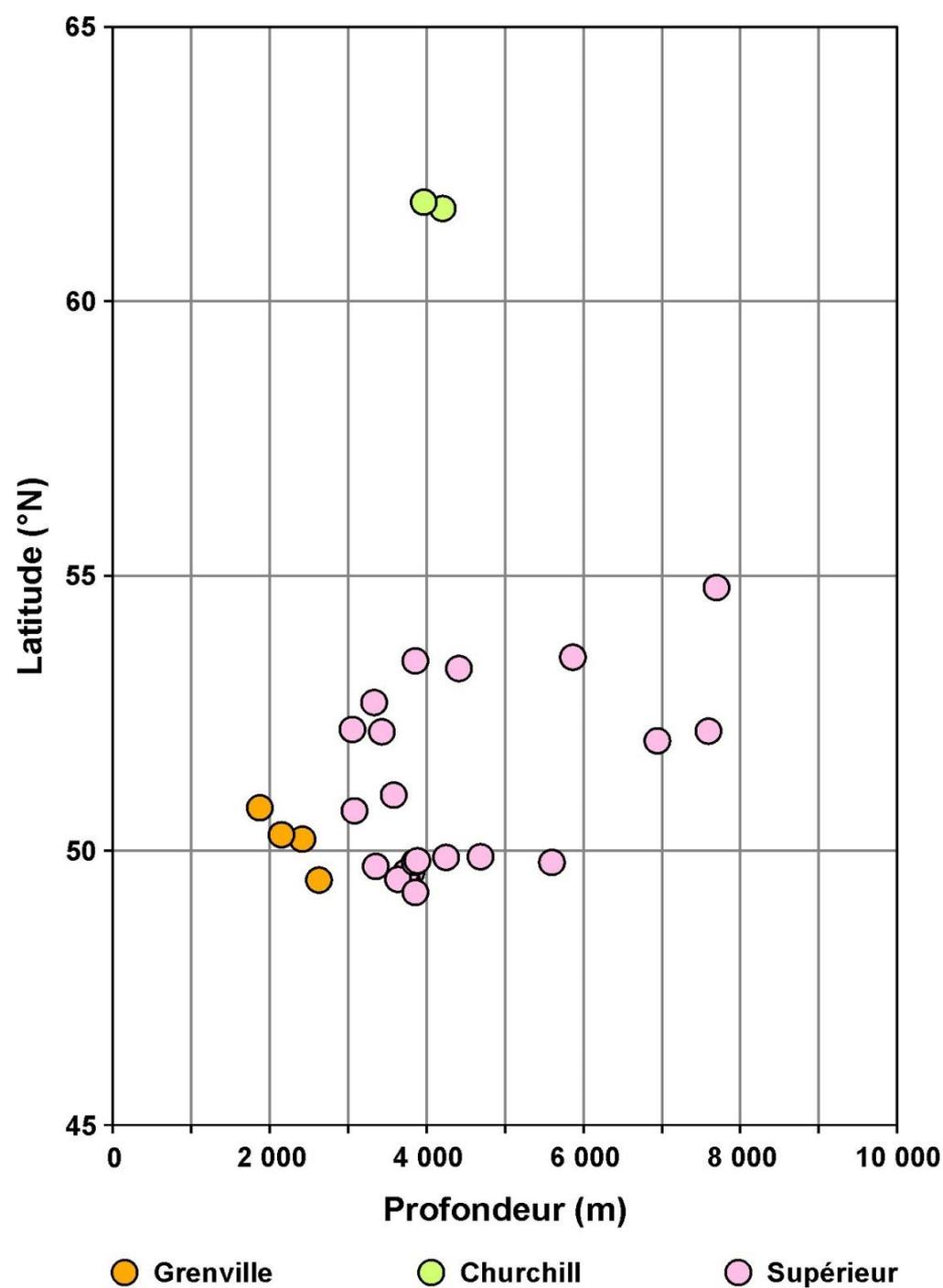
où T_z (°C) est la température en profondeur, T_0 (°C) est la température du sol non perturbée, Q_0 (W/m²) est le flux de chaleur en surface, z (m) est la profondeur en dessous de la surface, λ (W/m·K) est la conductivité thermique et A (W/m³) est la constante de génération de chaleur.

Les températures du sol non perturbées (T_0) ont été obtenues avec la valeur présentée sur la carte de température correspondante avec l'emplacement de chaque site. Des calculs ont été effectués pour la température (T_{500} , T_{1000} , T_{2000} et T_{5000}) à quatre profondeurs différentes (500 m, 1 000 m, 2 000 m et 5 000 m) pour chacun des vingt-huit sites avec des données géothermiques disponibles dans le nord Québec.



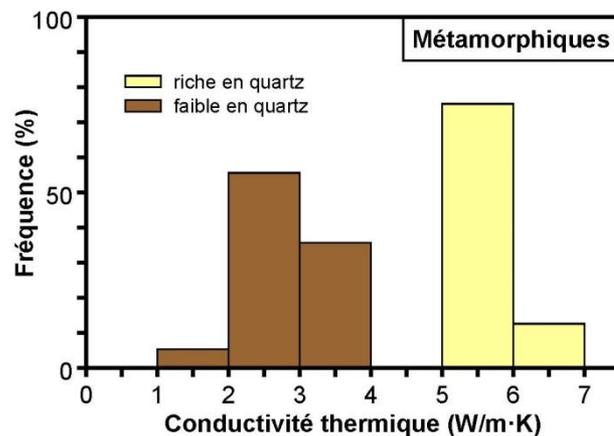
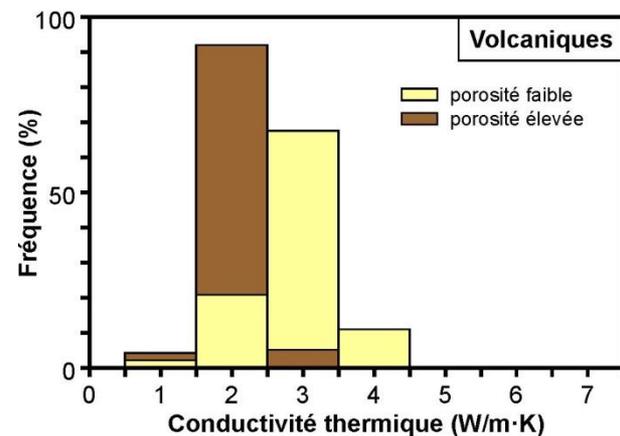
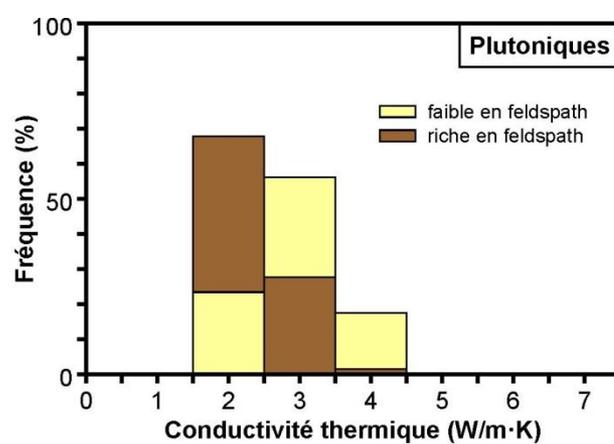
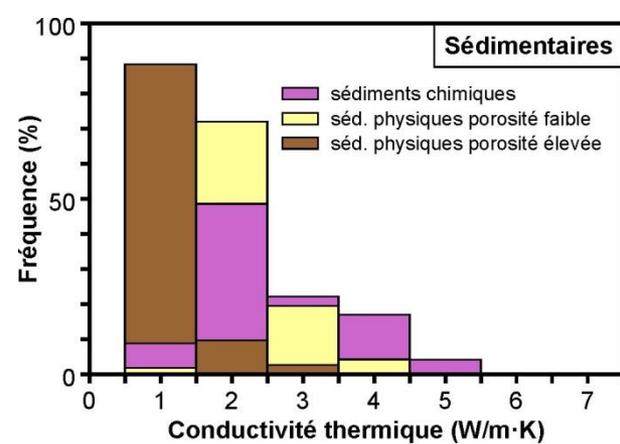
Profils de température

Les profils de température extrapolée pour chaque site ont été regroupés selon leur province géologique. Les sites de la province géologique de Grenville ont les valeurs de température les plus élevées, avec une moyenne globale de 84 °C à 5 km de profondeur, où la valeur maximale atteint 100 °C. Des températures inférieures sont obtenues dans les provinces géologiques du Supérieur et de Churchill, avec une moyenne de respectivement 50 et 51 °C à 5 km de profondeur.



Profondeur pour atteindre 40 °C

La production directe de chaleur sans pompe à chaleur est généralement possible pour une ressource géothermique à une température supérieure à 40 °C (Geothermal Education Office, 2005). Pour cette raison, la profondeur (D_{40}) pour obtenir une température de 40 °C a été calculée pour chacun des sites. Une profondeur d'environ 2 km est obtenue pour la province géologique de Grenville, alors qu'elle est deux fois plus importante dans les provinces géologiques du Supérieur et de Churchill. La profondeur pour atteindre 40 °C varie avec la température de surface et par conséquent, la latitude.



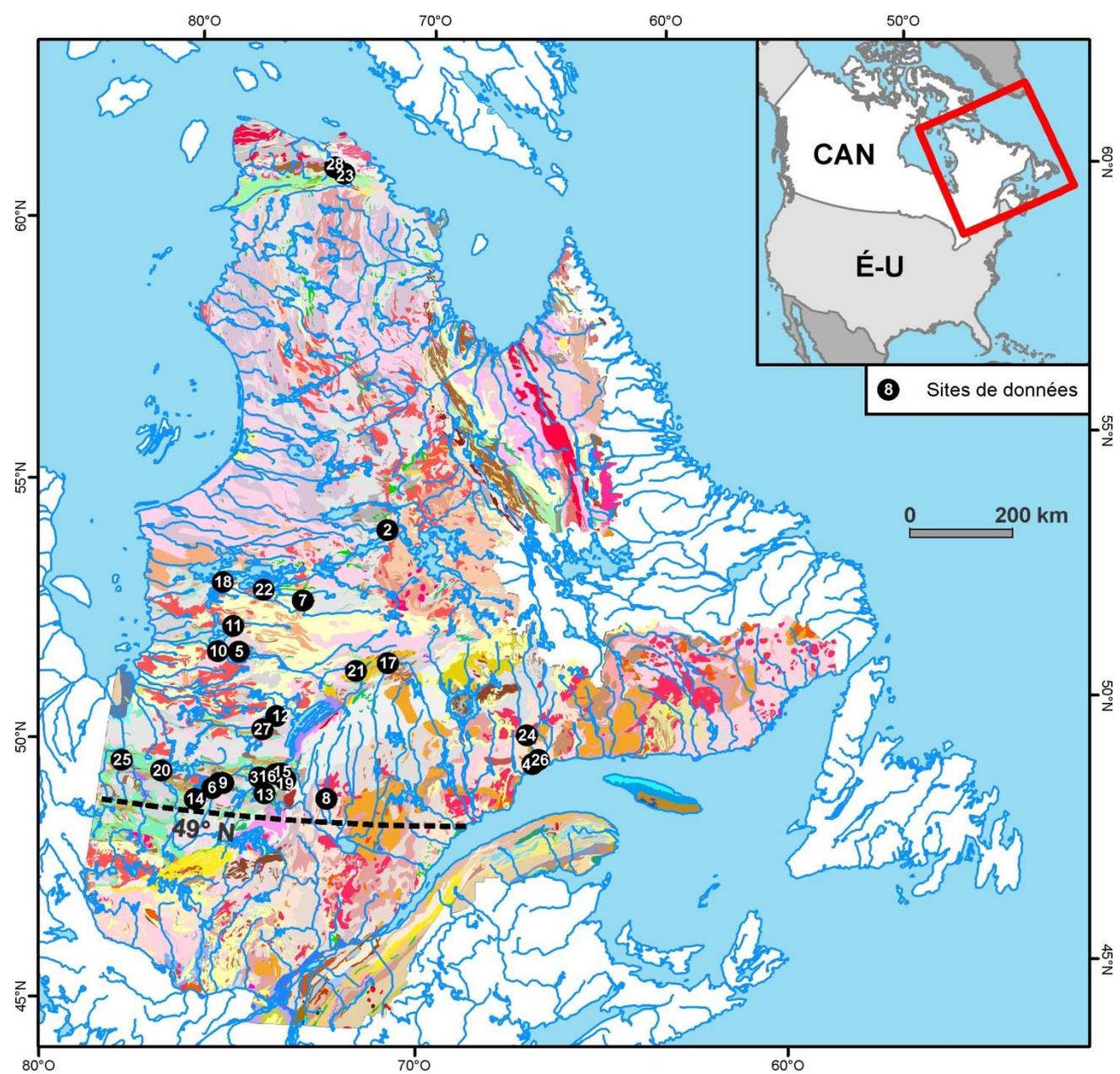
Conductivité thermique

La conductivité thermique de la roche peut varier d'un facteur de deux à trois pour un même type de roche. Ceci est dû à la variation naturelle de la composition minérale et de la porosité d'une roche, ainsi qu'à plusieurs facteurs physiques et diagénétiques. Clauser et Huenges (1995) ont réalisé des statistiques et ont étudié la variation de la conductivité thermique au sein de quatre groupes de roche caractérisant les conditions prévalant pour la formation, le dépôt ou le métamorphisme de la roche: 1) sédimentaires, 2) volcaniques, 3) plutoniques et 4) métamorphiques.

n est le nombre de données
 μ est la moyenne (W/m·K)
 m est la médiane (W/m·K)
 σ est l'écart-type

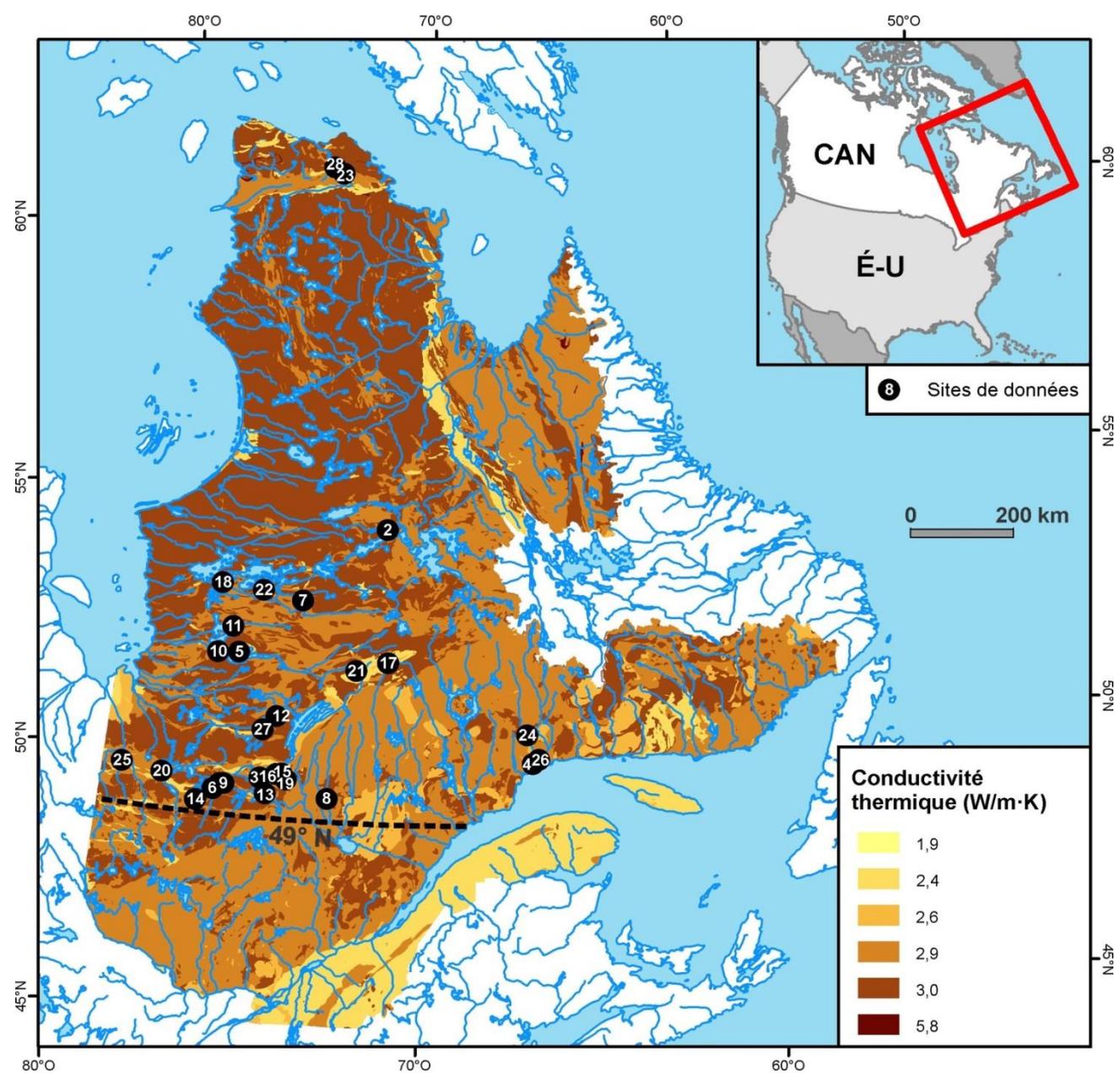
Types de roche	Catégories	n	μ	m	σ
Sédimentaire	Chimique	1312	2.6	2.2	1.3
Sédimentaire	Porosité faible	1880	2.4	2.2	0.6
Sédimentaire	Porosité élevée	983	1.2	1.0	0.4
Volcanique	Porosité faible	234	2.9	3.2	0.7
Volcanique	Porosité élevée	92	1.9	1.8	0.4
Plutonique	Faible en feldspath	1339	3.0	2.9	0.6
Plutonique	Riche en feldspath	303	2.6	2.4	0.4
Métamorphique	Riche en quartz	90	5.8	5.6	0.4
Métamorphique	Faible en quartz	1480	2.9	2.9	0.6

Clauser, C., and Huenges, E., 1995. Thermal conductivity of rocks and minerals. In Rock Physics and Phase Relations – a Handbook of Physical Constants. Ahrens, T. J. (ed.): American Geophysical Union. AGU Reference Shelf, Vol. 3, pp. 105–126.



Conductivité thermique

Les grandes provinces géologiques ont été divisées en unités géologiques détaillées afin de pouvoir les identifier en types de roche.



Conductivité thermique

Après avoir examiné les conductivités thermiques de la roche, les unités géologiques détaillées de la province de Québec ont été regroupées en types de roche afin de leur attribuer une valeur de conductivité thermique, soit la moyenne du type de roche attribué.

Provinces géologiques	T ₀ (°C)	Cond. (W/m°C)	Flux (W/m ²)	Gén. chal. (W/m ³)
Supérieur min.	-3	5.8	0.0321	6.0E-07
Supérieur max.	5	2.4	0.0321	6.0E-07
Churchill min.	-4	5.8	0.0344	4.0E-07
Churchill max.	1	2.4	0.0344	4.0E-07
Grenville min.	2	3.0	0.0308	3.0E-07
Grenville max.	6	2.6	0.0308	3.0E-07

Site #	Nom	Gradient (°C/km)	T ₀ (°C)	T ₅₀₀ (°C)	T ₁₀₀₀ (°C)	T ₂₀₀₀ (°C)	T ₅₀₀₀ (°C)	D ₄₀ (m)
1	Supérieur min.	5.3	-3	0	2	8	23	9 432
2	Supérieur max.	12.8	5	12	18	31	69	2 759
3	Churchill min.	5.8	-4	-1	2	8	25	8 201
4	Churchill max.	13.9	1	8	15	29	71	2 813
5	Grenville min.	10.0	2	7	12	22	52	3 701
6	Grenville max.	11.6	6	12	18	29	64	2 870

Scénarios optimistes et pessimistes de température en profondeur

Les calculs ont été effectués selon les scénarios optimistes et pessimistes afin d'anticiper la température en profondeur pour chacune des provinces géologiques. Le flux de chaleur en surface et la génération de chaleur interne des roches ont été supposés constants et égaux aux données moyennes pour chaque province géologique lors des calculs. Les valeurs minimales et maximales de la température du sol non perturbé (T₀) et de la conductivité thermique de la roche pour chaque province géologique ont été sélectionnées afin de définir les scénarios optimistes et pessimistes.

Conclusion

Étant donné que les roches du Bouclier canadien sont très anciennes (2.85-0.97), leur contenu en éléments radioactifs est plus faible que le même type de roches plus jeunes. Il en résulte des valeurs de flux de chaleur plutôt faibles dans tout le territoire du nord du Québec. Dans ce contexte, la constante de génération de chaleur interne a peu d'influence sur le flux de chaleur. En effet, lorsque les valeurs de la constante de génération de chaleur sont faibles, cela minimise l'effet de la variabilité entre les types de roche. Ainsi, le paramètre qui a le plus d'influence sur le gradient géothermique résultant demeure la conductivité thermique de la roche. Plus la valeur de la conductivité thermique est faible, plus le gradient géothermique est élevé. La majeure partie du nord du Québec a une valeur élevée de conductivité thermique, supérieure à 2,9 W/m° C, tandis que les faibles valeurs de conductivité thermique sont généralement présentes sur de petites zones associées à des roches sédimentaires ou plutoniques. Dans ce cas, les régions à haute conductivité thermique du sol peuvent être favorables aux systèmes de pompes à chaleur géothermique, alors qu'une faible conductivité thermique peut être adaptée aux systèmes de stockage d'énergie thermique et aux puits profonds d'utilisation directe à partir d'aquifères chauds, là où le gradient géothermique est ainsi plus élevé.

Note

En complément de ce rapport sous forme de présentation, le lecteur est invité à consulter la référence suivante :

Comeau, F.-A., Raymond, J., Malo, M., Dezayes, C., Carreau, M. 2017. Geothermal potential of Northern Québec : a regional assessment. Geothermal Resources Council Transactions, vol. 41, 1076-1094.

Fonds de recherche
Nature et
technologies
Québec 

INRS
UNIVERSITÉ DE RECHERCHE
A RESEARCH UNIVERSITY

ÉTS

Le génie pour l'industrie

HATCH

 Hydro
Québec
Institut de recherche

 GOLDCORP
PROJET ÉLÉONORE

 UNIVERSITÉ
LAVAL



Institut nordique
du Québec
Ensemble pour le Nord

 KATIVIK

 Master

 LP&A
Société Makivik
Makivik Corporation