

# Évaluation préliminaire du potentiel de climatisation des aquifères pour atténuer les îlots de chaleur urbains au Canada

Victoria Lee  
Félix-Antoine Comeau  
Jasmin Raymond  
Christine Rivard

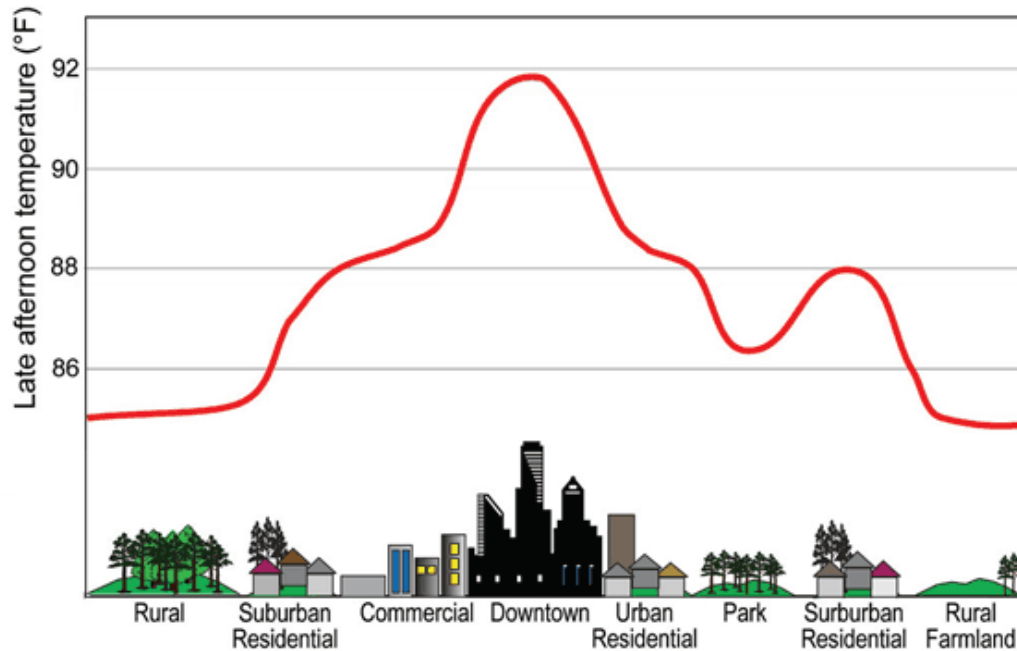
Rapport de recherche R1876

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

ISBN : 978-2-89146-929-6 (version électronique)

Dépôt légal - Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2019  
Dépôt légal - Bibliothèque et Archives Canada, 2019

# Îlots de chaleur urbains



Global Climate Change Impacts in the United States 2009 (2019). Urban Heat Island Effect. Page consultée le 17 juillet:

<https://nca2009.globalchange.gov/urban-heat-island-effect/index.html>

## Mise en contexte

Les îlots de chaleur urbains représentent un problème de taille dans les grandes villes en été. Ces îlots sont en partie causés par l'utilisation de technologies conventionnelles de climatisation, qui rejettent une quantité importante de chaleur dans l'atmosphère. La hausse de température en ville causée par cette chaleur rejetée ainsi que d'autres facteurs tel que les propriétés thermiques des surfaces urbaines (béton, asphalte, etc.) font augmenter la demande de climatisation ce qui perpétue le problème (Salamanca et al., 2013). L'ampleur des différentes sources anthropiques de chaleur a été quantifiée par Quah et Roth (2012) et leurs résultats indiquent que les bâtiments sont la source dominante de chaleur émise. Lors de canicules, qui sont de plus en plus fréquentes sous l'action croissante des changements climatiques, les îlots de chaleur sont à l'origine de nombreux problèmes de santé chez les personnes vulnérables. Une étude à Paris démontre que les îlots peuvent être atténués significativement s'il y a une bonne gestion des systèmes de climatisation (Tremeac et al., 2011).

L'alternative que nous proposons d'étudier pour diminuer cette chaleur rejetée est d'utiliser l'eau souterraine des formations géologiques présentes sous les villes pour climatiser les bâtiments afin d'obtenir un refroidissement écoénergétique.

Comme cette technologie n'est présentement pas répandue à grande échelle dans la majorité des grandes villes canadiennes, l'objectif principal de cette grille d'analyse est d'évaluer le potentiel de climatisation des aquifères des grands centres urbains au Canada pour identifier les villes qui possèdent les contextes les plus favorables pour l'implantation de cette technologie.

(Voir bibliographie à la fin du rapport pour articles mentionnés)

## Grandes villes canadiennes

Les villes canadiennes choisies pour l'évaluation du potentiel de climatisation des aquifères urbains ont été sélectionnées principalement selon la taille de leur population pour favoriser celles qui subissent un effet d'îlots de chaleur plus important. Hamilton, London, Victoria, Oshawa et Windsor ont été exclues en raison d'un manque de données sur les aquifères et/ou pour avoir une meilleure distribution spatiale à travers le pays tandis que Halifax a été exclu en raison de son climat plus frais des maritimes.

Le choix a été réduit aux villes suivantes (en ordre de population décroissante): Toronto, Montréal, Vancouver, Calgary, Edmonton, Ottawa/Gatineau, Winnipeg, Québec, Kitchener et Saskatoon. Ces villes sont surlignées en vert dans le tableau à gauche.

Villes	Province	Population en 2016	Superficie (km <sup>2</sup> )	Densité de population par km <sup>2</sup>
Toronto	Ontario	5,429,524	1792.99	3028.2
Montréal	Québec	3,519,595	1293.99	2719.9
Vancouver	Colombie-Britannique	2,264,823	876.44	2584.1
Calgary	Alberta	1,237,656	586.08	2111.8
Edmonton	Alberta	1,062,643	572.69	1855.5
Ottawa/Gatineau	Ontario/Québec	989,567	520.82	1900
Winnipeg	Manitoba	711,925	343.99	2069.6
Québec	Québec	705,103	427.66	1648.8
Hamilton	Ontario	693,645	351.67	1972.4
Kitchener	Ontario	470,015	269.23	1745.8
London	Ontario	383,437	232.48	1649.3
Victoria	Colombie-Britannique	335,696	215.88	1555
Halifax	Nouvelle-Écosse	316,701	234.72	1349.3
Oshawa	Ontario	308,875	154.57	1998.3
Windsor	Ontario	287,069	176.21	1629.1
Saskatoon	Saskatchewan	245,181	125.5	1953.7

Statistique Canada (2019). Chiffres de population et des logements - Faits saillants en tableaux, Recensement de 2016. Page consultée le 11 juillet : <https://bit.ly/2XTyE4I>

## Facteurs influençant le potentiel de climatisation d'un aquifère

Selon Lu et al. (2019), les facteurs les plus pertinents pour déterminer si les conditions sont favorables pour avoir un système de climatisation nommé *aquifer thermal energy storage* (ATES) sont le type d'aquifère, le taux de recharge de l'eau souterraine, la salinité de l'eau, la qualité de l'eau, le niveau d'exploitation de l'eau et la température moyenne annuelle de l'air ambiante.

Attribute	Description	Class
Types of aquifer	It greatly affects thermal efficiency of ATES systems, which is the most significant part for ATES suitability. It is generally agreed that complex hydrological structures are less suitable for ATES application.	Major groundwater basin Local and shallow aquifer Complex hydrogeological structure
Groundwater recharge (mm/y)	It is related to the groundwater flow and water regenerate conditions, and a higher groundwater recharge corresponds to a higher suitability of ATES system.	> 300 100 20 2 < 2
Fresh/saline groundwater	ATES system is less sensitive and economical in fresh water aquifer	Fresh water aquifer Saline water aquifer
Water quality	It determines the system life of ATES and the system perform better in clean groundwater. Considering that the available of the data, the reported case of pollution about groundwater is selected to reflect water quality conditions from the side	none few many
Groundwater stress	It reflects the consumption rate of groundwater around the world. The greater the stress is, the less stable groundwater is available to ATES system	< 1 5 10 20 > 20
Mean annual temperature (°C)	The cold/heat demands for many building systems are closely related to temperature and the balance between cooling demand in summer and space heating demand in winter is important to cyclic mode. Too high or low treatment temperature is disadvantageous to the application of the ATES system	> 25 20 15 10 < 10

Lu, H., Tian, P., Guan, Y., & Yu, S. (2019). Integrated suitability, vulnerability and sustainability indicators for assessing the global potential of aquifer thermal energy storage. *Applied Energy*, 239, 747–756. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.144>

## Explore Maps

Explore aquifers and related groundwater information, as well as view and download water well and monitoring site information:

- [Basic map viewer \(more data\)](#)
- [Advanced map viewer with 3D \(less data\)](#)

## Find Information

Search for groundwater information:

Find water wells or monitoring sites

Find key Canadian aquifers

Find other groundwater information

- Groundwater Information Network (GIN)  
[http://gin.gw-info.net/service/api\\_ngwds:gin2/en/gin.html](http://gin.gw-info.net/service/api_ngwds:gin2/en/gin.html)
- Projets d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES)  
<http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/souterraines/programmes/acquisition-connaissance.htm>
- Lepage, N. (1996). Modélisation tridimensionnelle régionale et locale de l'écoulement de l'eau souterraine sur l'île de Montréal et au Centre de Tri et d'Élimination des déchets de la ville de Montréal. Mémoire. Québec, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, Maîtrise en sciences de la terre, 380 p..  
<http://espace.inrs.ca/1841/>
- Ouzzane, M., Eslami-Nejad, P., Badache, B., Aidoun, Z., 2015. New correlations for the prediction of the undisturbed ground temperature. *Geothermics* 53: 379–384.  
<https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.08.001>

## Aquifères urbains au Canada

L'information sur les aquifères urbains des villes sélectionnées, comme leur distribution spatiale et leurs caractéristiques hydrogéologiques, a été principalement trouvée dans la base de données *Groundwater Information Network* (GIN) de la Commission géologique du Canada. Une évaluation rudimentaire du potentiel de climatisation des aquifères peut être accomplie à l'aide du GIN mais plus de détails sur chacun des aquifères sont disponibles dans la littérature scientifique. Dans le cas de Québec et Montréal, les données proviennent respectivement des Projets d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES) et de la thèse de Lepage (1996). La formule de Ouzzane et al. (2015) pour la température du sol non perturbée a aussi été utilisée pour attribuer une température de l'eau aux aquifères.

# Aquifères urbains au Canada

Avant de poursuivre avec l'évaluation des aquifères urbains, les données pertinentes ont été compilées dans un fichier Excel. Le tableau ci-dessous présente une compilation des informations retenues pour chacune des villes canadiennes sélectionnées. La grille d'analyse a été définie de façon à tenir compte des principaux paramètres hydrogéologiques ayant un impact direct sur le potentiel de climatisation des aquifères de ces grands centres urbains.

Villes	Sources données	Noms aquifères	Description	Épaisseur de l'unité (m)	Taux recharge (mm/y)	Profondeur eau souterraine (m)
Toronto	GIN	Aquifère des sédiments inférieurs	Sable, silt, argile, et till. Haute conductivité et bon potentiel comme aquifère	75 to 160	n/a	n/a
		Aquifère de la moraine d'Oak Ridge	Majoritairement silt et sable fin, haute conductivité et un des aquifères de meilleure qualité au Canada	2 to 125	200 to 400	15 to 40
Montréal	Article Lepage	Aquifère rocheux fracturé	n/a	n/a	n/a	n/a
		Dépôts meubles de l'île de Montréal	Till, sable et gravier	< 25	125 à 275	n/a
Vancouver	GIN	Système d'aquifères Fraser	Sable et gravier glaciaire	> 300	n/a	n/a
Calgary	GIN	Système d'aquifères de Paskapoo	Dominé par grès fracturé. Système d'aquifère hétérogène et complexe.	< 800	n/a	n/a
Edmonton	GIN	Vallée enfouie / tapis aquifère	Dépôts de sable, gravier, boue enterrés sous une couche épaisse de till	< 62	< 2	0 to 54.12
Ottawa/Gatineau	GIN	Aquifère de sable et gravier fluvioglaciaires (eskers)	Eskers de sable et gravier enterrés et confinés par l'aquitard de Mer de Champlain	< 25	n/a	n/a
		Aquifère rocheux fracturé de la rivière Nation	Mudstone carbonate fracturé	< 140	n/a	n/a
Winnipeg	GIN	Aquifère d'eau douce	n/a	n/a	n/a	n/a
		Aquifère d'eau saumâtre à saline	n/a	n/a	n/a	n/a
Québec	PACES	Aquifère rocheux fracturé	n/a	n/a	n/a	n/a
		Aquifère granulaire	Till, sable et gravier	10-35	178-254	4 à 20
Kitchener	GIN	Système d'aquifères de la moraine Waterloo	Dépôts de sable et gravier. L'eau souterraine est abondante et de bonne qualité.	30 to 150	150 to 450	n/a
Saskatoon	GIN	Formation de Judith river	n/a	n/a	n/a	n/a
		Vallée enfouie / tapis aquifère	Dépôts de sable, gravier, boue enterrés sous une couche épaisse de till	< 62	< 2	0 to 54.12

# Critères d'évaluation

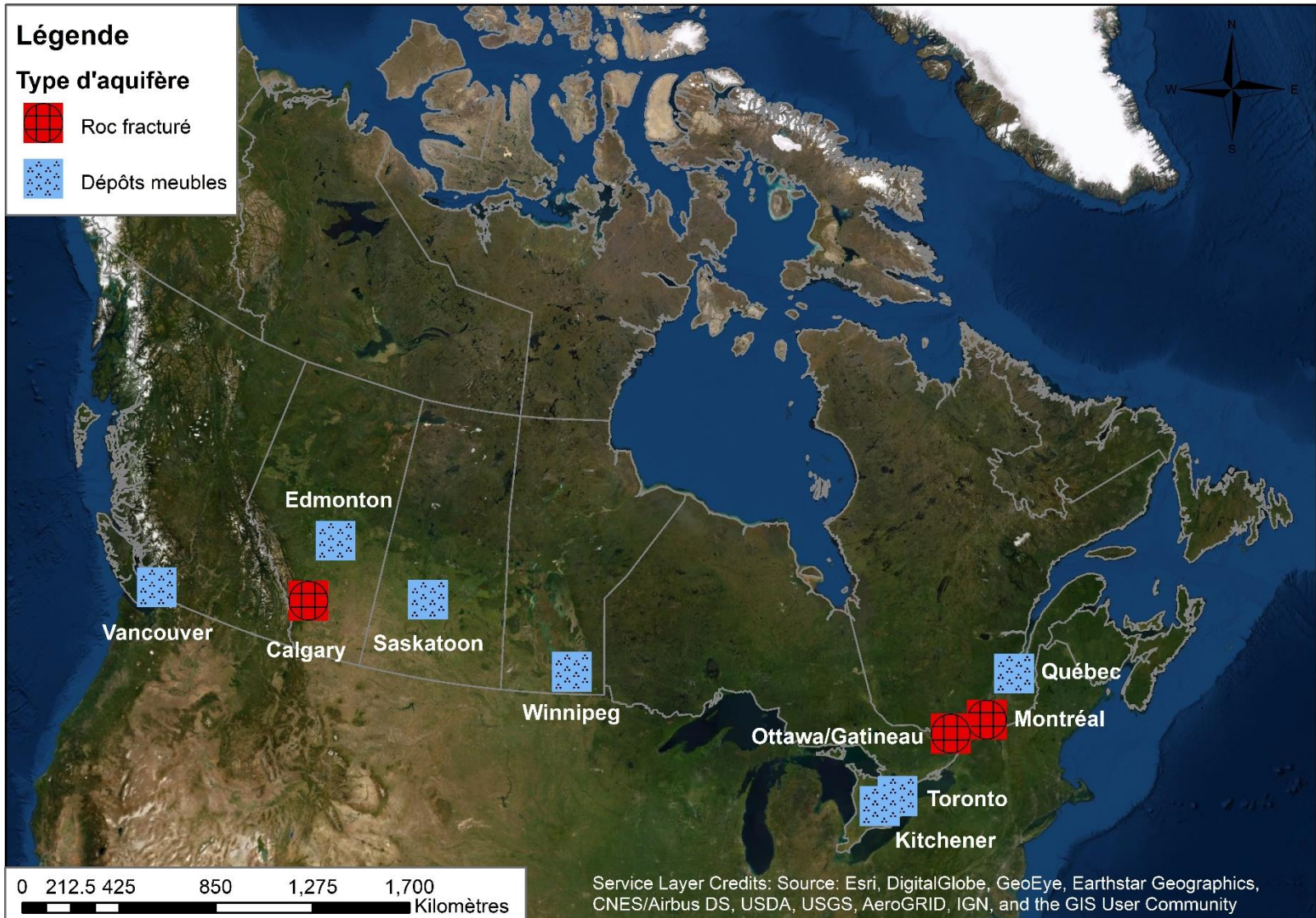
Les critères ci-dessous ont été établis selon l'information disponible publiquement et selon les facteurs influençant le potentiel de climatisation déterminés par Lu et al. (2019). Un critère a été ajouté pour la disponibilité des données selon les sources présentées à la diapo #5 afin de compenser pour les villes ayant moins d'information sur les aquifères. Une pondération a aussi été appliquée à chacun des critères pour refléter leur importance, tel que le type d'aquifère. Plus de détails sur chaque critère sont fournis dans les diapositives suivantes.

Critères	Cote potentiel de refroidissement			Poids score final
	1	2	3	
Type d'aquifère dominant	Roc fracturé	-	Dépôts meubles	30%
Type d'eau	Salée	-	Douce	10%
Température du sol (°C)	> 12	> 9 et < 12	< 9	15%
Population de la ville en 2016	200 000 - 400 000	400 000 - 1 000 000	> 1 000 000	15%
Température maximale des îlots de chaleur le jour (°C)	25 - 30	-	30 - 35	7.5%
Température minimale des îlots de chaleur la nuit (°C)	5 - 10	-	10 - 15	7.5%
Disponibilité des données pour la recharge, épaisseur et profondeur de l'eau souterraine	33% et moins d'information disponible	> 33% et < 67% d'information disponible	67% et plus d'information disponible	15%



## Type d'aquifère dominant

Un des facteurs les plus importants pour le potentiel de climatisation est le type d'aquifère présent sous la ville couvrant la majorité de la superficie, car les dépôts meubles sont beaucoup plus favorables à l'exploitation de systèmes de climatisation, principalement en raison de la plus grande quantité d'eau pouvant être extraite. Ceci implique la possibilité d'une couverture partielle de toute l'étendue d'une ville qui bénéficie des aquifères propices à être exploités.



## Type d'eau

La salinité de l'eau est un facteur important à considérer au niveau des ressources requises pour le pompage et le traitement de l'eau dans un système ATES car l'eau salée implique des coûts de traitement et les composantes du système doivent être conçues pour résister à ce fluide corrosif. Peu importe les matériaux utilisés, l'eau salée circulant dans un système accélérera son usure, ce qui peut avoir un impact sur la performance et la rentabilité du système. Un aquifère avec de l'eau douce est donc jugé plus favorable au développement des systèmes géothermiques. La présence de contamination dans l'eau, bien qu'il puisse s'agir d'un facteur limitant, n'a pas été considérée dans l'analyse du potentiel de climatisation avec l'eau souterraine.






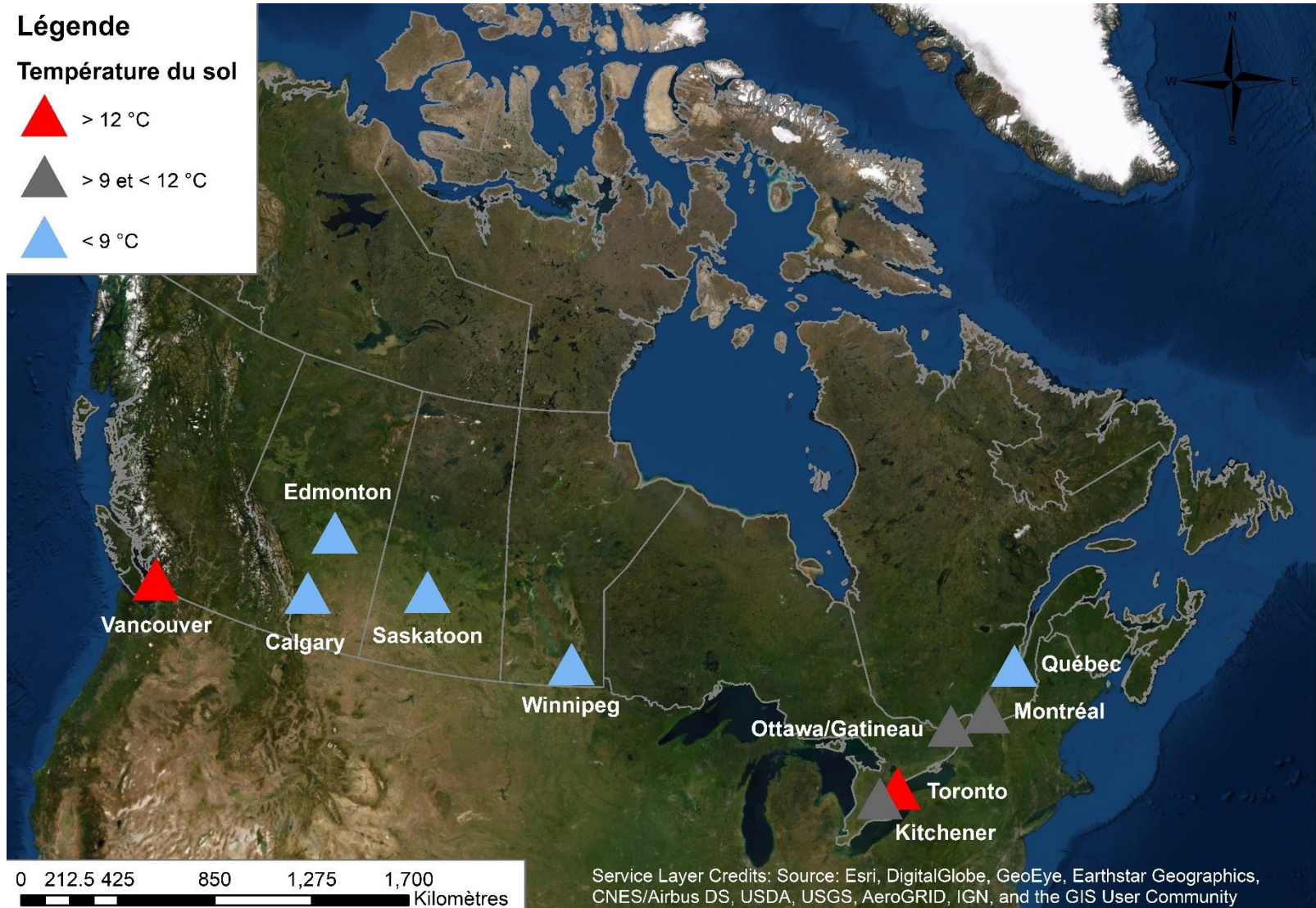
# Température du sol

La température de la sous-surface peu profonde a été déduite des données météorologiques en utilisant l'équation empirique proposée par Ouzzane et al. (2015). C'est cette approximation qui a été utilisée ici pour la température de l'eau souterraine. L'eau plus froide est préférable pour avoir une meilleure efficacité de climatisation et particulièrement dans le cas d'un système par *free cooling*, qui n'utilise pas de système de pompe à chaleur.

## Légende

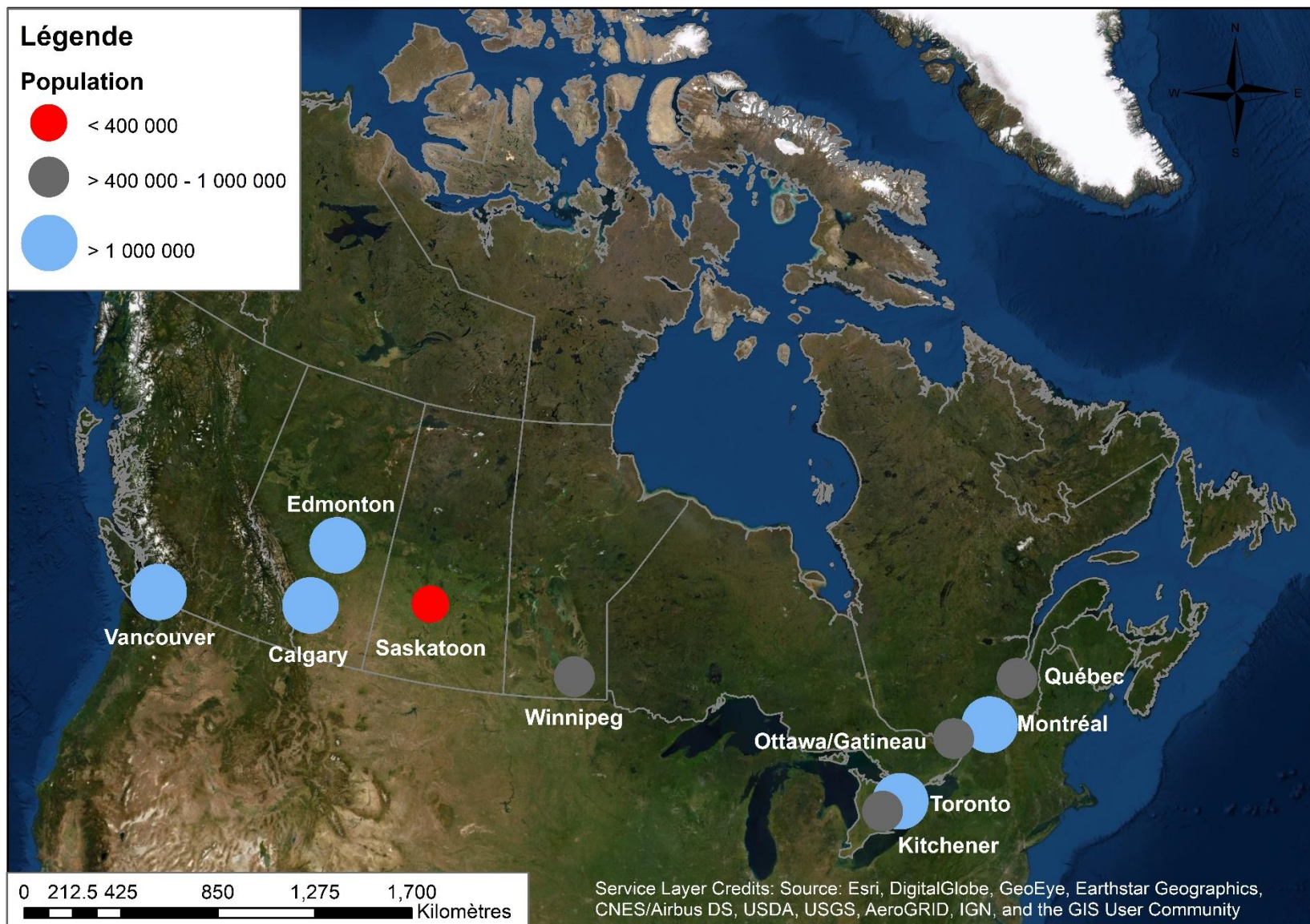
### Température du sol

-  > 12 °C
-  > 9 et < 12 °C
-  < 9 °C



## Population de la ville

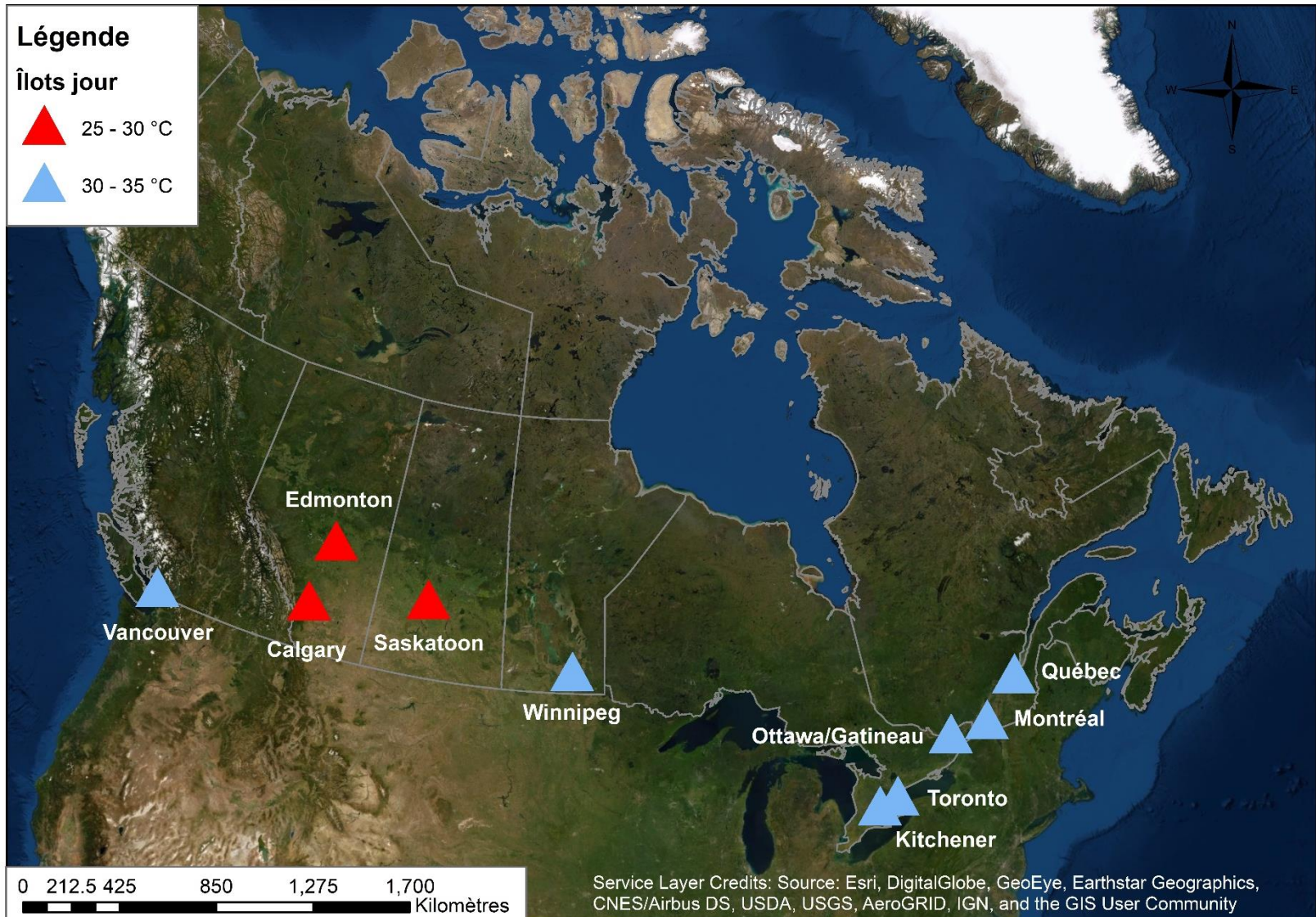
Les villes les plus peuplées sont ciblées pour cette étude, car la population est indicative de l'intensité des îlots de chaleur urbains.



# Température maximale diurne des îlots de chaleur

Afin de pouvoir comparer les villes, les données des moyennes de températures maximales diurnes des îlots de chaleurs urbains ont été utilisées.

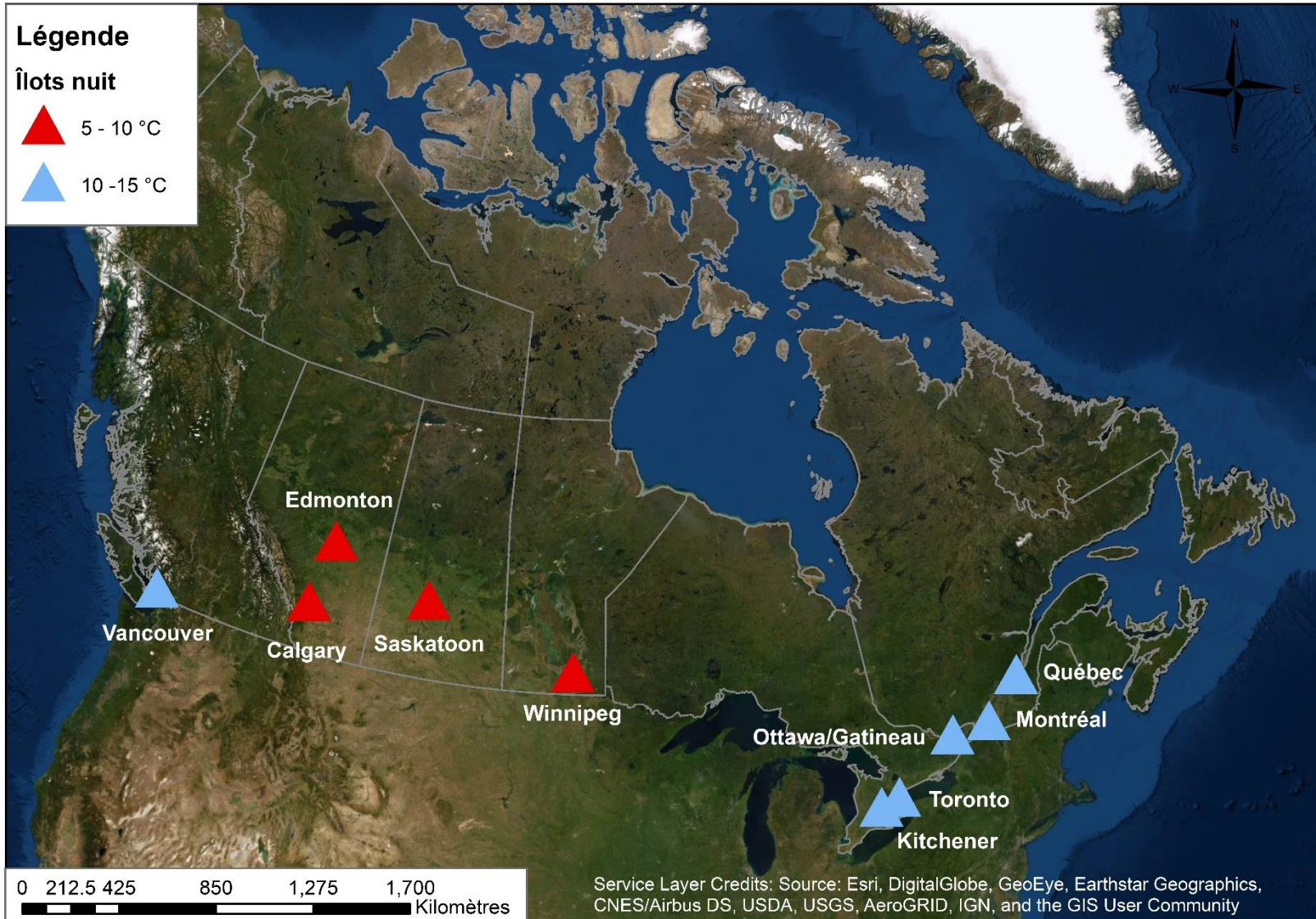
Source des données: <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=8e7bacbb41b342d9a3aa4b04dcc8213e>



# Température minimale nocturne des îlots de chaleur

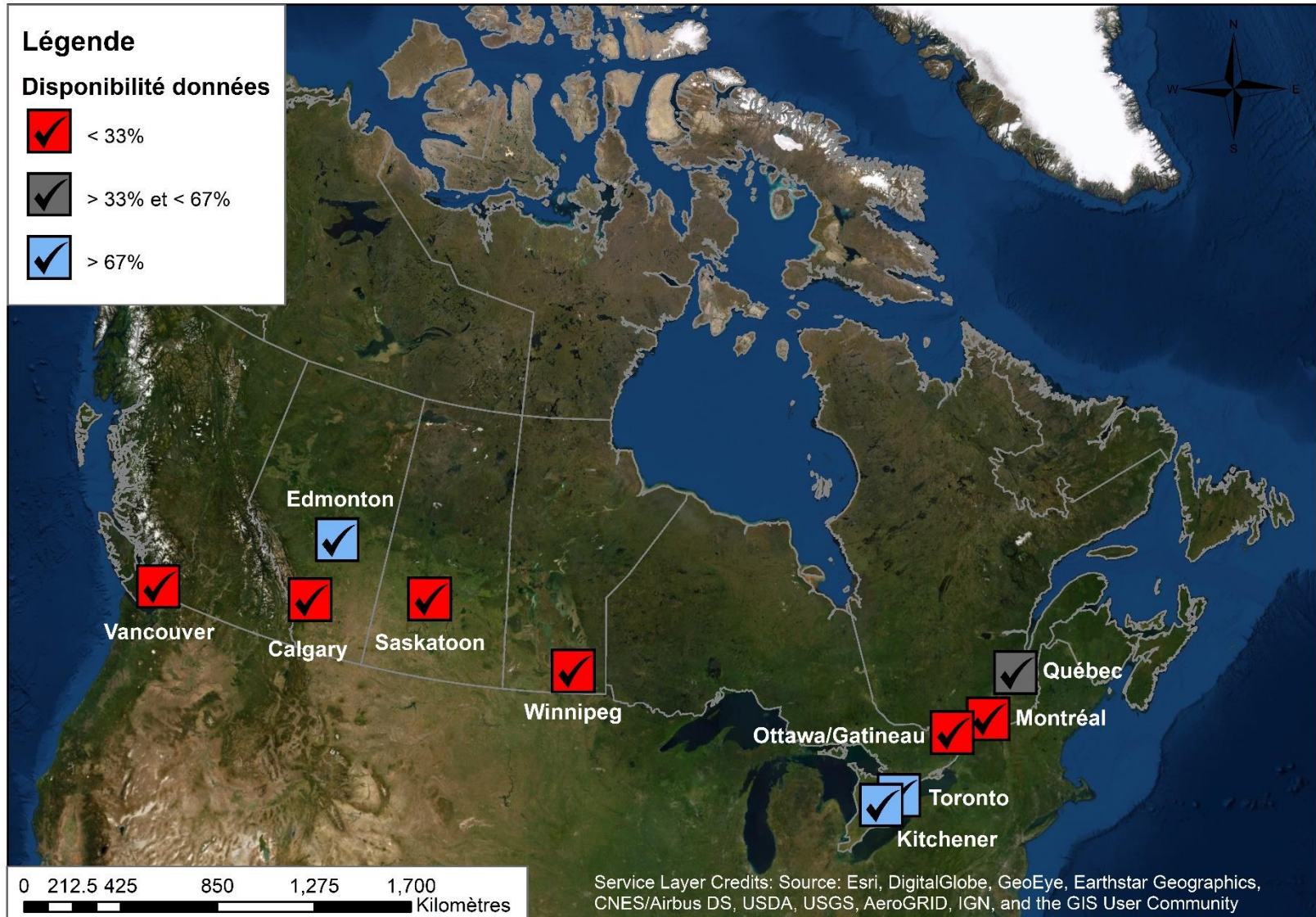
La moyenne des températures minimales nocturnes a également été considérée, car les îlots de chaleur urbains ont aussi un impact durant ce temps. En effet, la nuit venue, la chaleur de la canopée urbaine est piégée par une couche d'air frais qui se forme sur les toits des édifices. Ainsi, le rafraîchissement naturel de nuit s'effectue plus difficilement.

Source des données: <https://www.arcgis.com/home/webmap/viewer.html?webmap=af411bc91c5a41d4a5a05a0249a1dcc7>



# Disponibilité des données pour le taux de recharge, l'épaisseur de l'aquifère et la profondeur de l'eau souterraine

La proportion des données manquantes dans l'information compilée pour chaque ville (voir diapo 6) a été prise en compte pour favoriser les aquifères urbains mieux connus et qui, de ce fait, présentent le moins d'incertitude dans leur évaluation préliminaire. Cela veut dire qu'une disponibilité de 33% et moins représente une moyenne 1 donnée sur 3 pour tous les aquifères de cette ville et ainsi de suite.



# Évaluation du potentiel de climatisation de bâtiments par des aquifères dans les 10 villes canadiennes sélectionnées

Le tableau ci-dessous présente les points attribués à chaque ville selon les critères établis ainsi que leur résultat final sur 10 représentant le potentiel de climatisation global. Les villes ont été placées par ordre décroissant de leur potentiel.

	Toronto	Québec	Edmonton	Kitchener	Vancouver	Winnipeg	Saskatoon	Montréal	Ottawa / Gatineau	Calgary	
<b>Type d'aquifère dominant</b>	Dépôt meubles (3)	Dépôts meubles (3)	Dépôts meubles (3)	Dépôts meubles (3)	Dépôts meubles (3)	Dépôts meubles (3)	Dépôts meubles (3)	Roc fracturé (1)	Roc fracturé (1)	Roc fracturé (1)	30%
<b>Type d'eau</b>	Douce (3)	Douce (3)	Douce (3)	Douce (3)	Douce (3)	Salée (1)	Douce (3)	Douce (3)	Douce (3)	Douce (3)	10%
<b>Température du sol (°C)</b>	13,5 (1)	8,5 (3)	8,5 (3)	11,2 (2)	14,4 (1)	7,4 (3)	7,0 (3)	9,6 (2)	10,8 (2)	8,7 (3)	15%
<b>Population de la ville en 2016</b>	5 429 524 (3)	705 103 (2)	1 062 643 (3)	470 015 (2)	2 264 823 (3)	711 925 (2)	245 181 (1)	3 519 595 (3)	989 567 (2)	1 237 656 (3)	15%
<b>Température maximale des îlots de chaleur le jour (°C)</b>	30-35 (3)	30-35 (3)	25-30 (1)	30-35 (3)	30-35 (3)	30-35 (3)	25-30 (1)	30-35 (3)	30-35 (3)	25-30 (1)	7.5%
<b>Température minimale des îlots de chaleur la nuit (°C)</b>	10-15 (3)	10-15 (3)	5-10 (1)	10-15 (3)	10-15 (3)	5-10 (1)	5-10 (1)	10-15 (3)	10-15 (3)	5-10 (1)	7.5%
<b>Disponibilité des données pour la recharge, épaisseur et profondeur de l'eau souterraine</b>	67% (3)	50% (2)	100% (3)	67% (3)	33% (1)	0% (1)	33% (1)	33% (1)	33% (1)	33% (1)	15%
<b>Résultat final sur 10</b>	<b>9.00</b>	<b>8.01</b>	<b>7.52</b>	<b>7.52</b>	<b>7.51</b>	<b>6.84</b>	<b>6.51</b>	<b>6.01</b>	<b>5.51</b>	<b>5.51</b>	

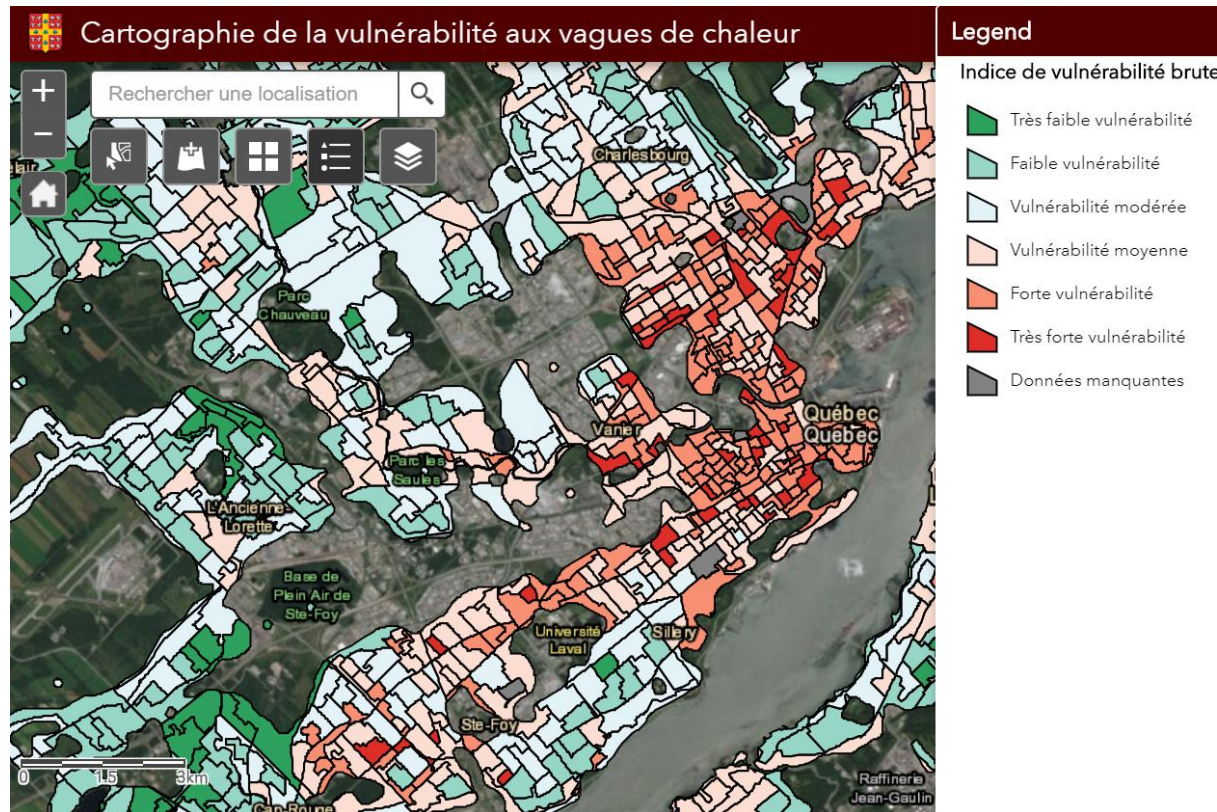


## Conclusions

Cette évaluation préliminaire du potentiel de climatisation de grands bâtiments via des aquifères situés sous plusieurs grandes villes au Canada permet d'identifier quelles villes peuvent être propices à l'implantation de systèmes de refroidissement utilisant l'eau souterraine. Bien sûr, plus de recherche est requise pour évaluer de façon quantitative le potentiel de climatisation dans ces villes. La prochaine étape consistera à étudier plus en détails le contexte et les conditions pour la ville de Québec. Cette ville a été sélectionnée car elle arrive deuxième dans la grille d'analyse, et que des travaux en géologie et en hydrogéologie ont été effectués dans le cadre d'un PACES pour caractériser une formation sableuse qui s'étend sur une part importante de la ville et évaluer de façon préliminaire le potentiel des systèmes géothermiques. De plus, nous croyons qu'il serait possible dans la Ville de Québec de réaliser des forages et implanter un site pilote.

Note #1: Une carte de vulnérabilité aux vagues de chaleurs des principales villes de la province de Québec a été réalisée par l'Université Laval. Cette carte fournit des informations pertinentes sur la distribution géographique des inégalités sociales face aux vagues de chaleur. Ceci inclut des informations sur la présence d'îlots de chaleur urbains, la sensibilité et la capacité à faire face à ces aléas ou encore sur la vulnérabilité en raison de facteur socioéconomique, démographique et de santé.

<https://ulaval.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=00785fd406c34b1a906978af69074af7>



## Conclusions

Note #2: Un modèle 3D de Lamarche et al. (2008) donne une bonne piste de départ pour les futurs travaux dans la Ville de Québec concernant l'analyse plus approfondie du potentiel de climatisation de l'aquifère urbain. Avec ce modèle, il est possible de visualiser l'extension de l'aquifère et déterminer les sites spécifiques ayant le plus de potentiel.

Lamarche, L., Parent, M., Lefebvre, R., & Perret, D. (2008). 3D geological model of a deltaic aquifer system formed in a buried channel of the St. Lawrence River in Quebec City, Canada. *GeoEdmonton '08*.

<https://bit.ly/2Yrv5D6>

## Remerciements

Merci à Marie-Catherine Talbot Poulin du MELCC pour nous avoir fournis des commentaires pertinents lors de la révision de ce rapport qui ont aidés à le bonifier.

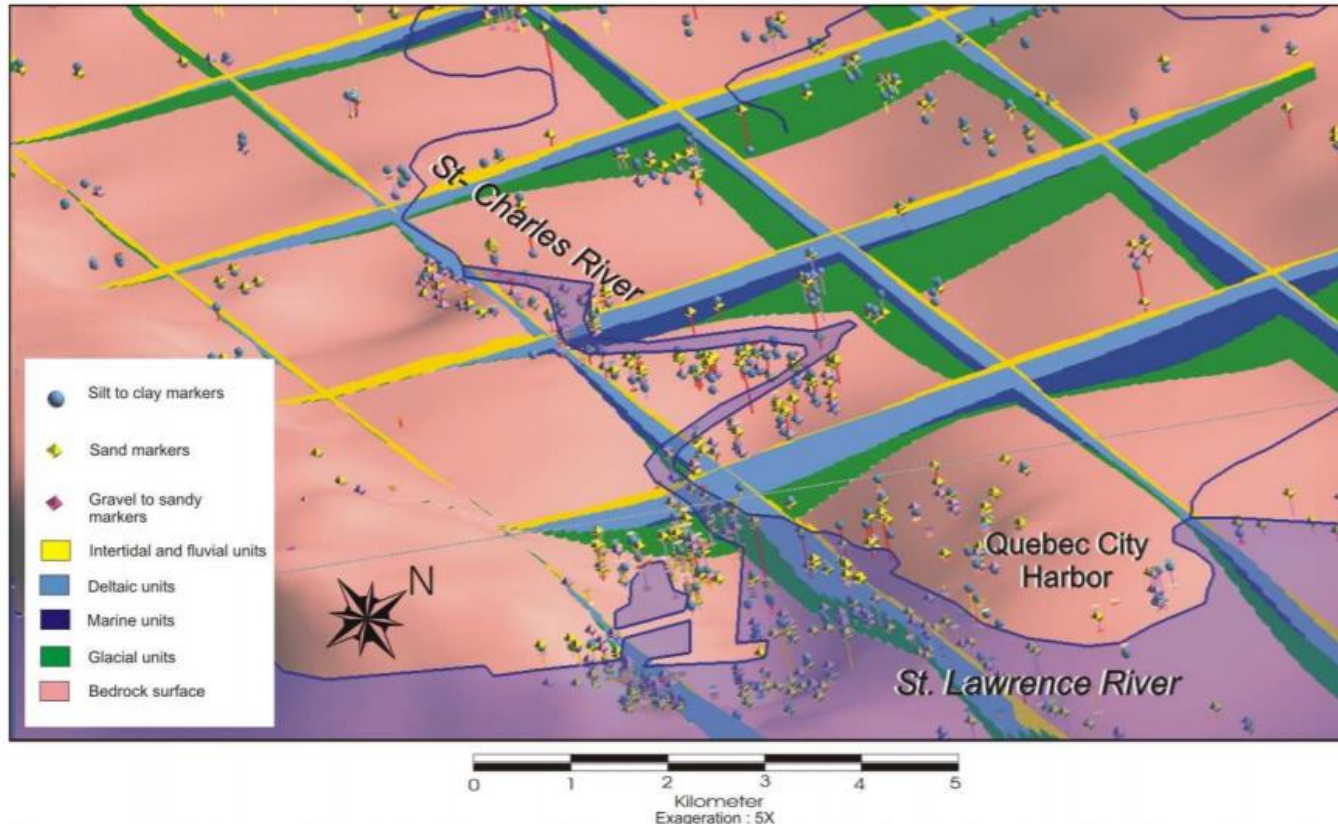


Figure 4. Preliminary 3D model of the south branch of the buried valley in Quebec City. The pink surface corresponds to bedrock. The green surface in cross-section represents till and the blue one is the delta. Yellow diamonds are sand borehole markers, purple diamonds are gravel to sandy borehole markers and blue spheres are silt to clay borehole markers.

# Bibliographie

Global Climate Change Impacts in the United States 2009 (2019). Urban Heat Island Effect. Page consultée le 17 juillet: <https://nca2009.globalchange.gov/urban-heat-island-effect/index.html>

Groundwater Information Network (GIN)  
[http://gin.gw-info.net/service/api\\_ngwds:gin2/en/gin.html](http://gin.gw-info.net/service/api_ngwds:gin2/en/gin.html)

Lamarche, L., Parent, M., Lefebvre, R., & Perret, D. (2008). 3D geological model of a deltaic aquifer system formed in a buried channel of the St. Lawrence River in Quebec City, Canada. *GeoEdmonton '08*. <https://bit.ly/2Yrv5D6>

Lepage, N. (1996). Modélisation tridimensionnelle régionale et locale de l'écoulement de l'eau souterraine sur l'île de Montréal et au Centre de Tri et d'Élimination des déchets de la ville de Montréal. Mémoire. Québec, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, Maîtrise en sciences de la terre, 380 p.. <http://espace.inrs.ca/1841/>

Lu, H., Tian, P., Guan, Y., & Yu, S. (2019). Integrated suitability, vulnerability and sustainability indicators for assessing the global potential of aquifer thermal energy storage. *Applied Energy*, 239, 747–756.  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.144>

Ouzzane, M., Eslami-Nejad, P., Badache, B., Aidoun, Z., 2015. New correlations for the prediction of the undisturbed ground temperature. *Geothermics* 53: 379–384. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.08.001>

Projets d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES)  
<http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/souterraines/programmes/acquisition-connaissance.htm>

Salamanca, F., Georgescu, M., Mahalov, A., Moustou, M., & Wang, M. (2014). Anthropogenic heating of the urban environment due to air conditioning. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(10), 5949–5965.  
<https://doi.org/10.1002/2013JD021225>

Statistique Canada (2019). Chiffres de population et des logements - Faits saillants en tableaux, Recensement de 2016. Page consultée le 11 juillet : <https://bit.ly/2XTyE4I>

Tremeac, B., Bousquet, P., de Munck, C., Pigeon, G., Masson, V., Marchadier, C., ... Meunier, F. (2012). Influence of air conditioning management on heat island in Paris air street temperatures. *Applied Energy*, 95(C), 102–110.  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.02.015>

Quah, A. K. L., & Roth, M. (2012). Diurnal and weekly variation of anthropogenic heat emissions in a tropical city, Singapore. *Atmospheric Environment*, 46, 92–103. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.10.015>