

## 178 : Caractérisation de la variabilité intra-urbaine de la température selon une perspective géostatistique

Onil Bergeron

Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec (Québec)  
Canada

*onil.bergeron@mddep.gouv.qc.ca*

### Résumé

Les vagues de chaleur peuvent augmenter le taux de mortalité, comme on l'a vu en Europe en 2003, et devraient se multiplier et s'intensifier en raison des changements climatiques. L'urbanisation peut exacerber leurs conséquences sur la santé publique puisqu'elle favorise les environnements chauds dans les zones très peuplées. Dans des villes de tailles diverses, les autorités ont mis en place leurs propres plans d'urgence, lesquels s'enclenchent dès que les conditions météorologiques franchissent certains seuils. Toutefois, les données proviennent souvent de stations météorologiques situées hors des zones urbaines, excluant du coup l'effet d'îlot de chaleur urbain (ICU). Atteignant des degrés extrêmes dans les mégapoles, soit les agglomérations importantes, les ICU s'observent également dans les villes moyennes<sup>1</sup>. Ainsi, quelle que soit l'importance de la ville, les plans d'urgence pourraient bénéficier d'information sur l'emplacement et l'intensité des ICU.

L'intensité des ICU a été mise en relation avec les caractéristiques des surfaces urbaines afin de cartographier les points chauds d'une ville<sup>2</sup>. La relation entre la température et les caractéristiques de surface peut servir notamment à déterminer les zones à haut risque d'exposition à la chaleur. La présente étude amène une perspective géostatistique fondée sur les données climatiques enregistrées par des capteurs fixes et mobiles ainsi que sur les caractéristiques de la surface inscrites dans un système d'information géographique afin de produire des cartes de température et d'exposition à la chaleur. Elle s'insère dans une méthodologie globale ayant pour but de décrire le climat de différentes villes de la province de Québec au Canada.

Mots-clés : îlot de chaleur urbain, géostatistique, plans d'urgence, Québec, Canada

### 1. Introduction

En cette ère de changements climatiques, on prévoit une augmentation de la fréquence et de l'intensité des phénomènes météorologiques extrêmes. Les vagues de chaleur notamment ont des effets néfastes sur la santé et le bien-être de la population. En 2003, l'Europe a connu une vague de chaleur sans précédent qui a causé la mort de plus de 15 000 personnes seulement en France. En réponse à ce type de tragédie, de nombreuses villes du monde ont entrepris de se doter de plans d'urgence afin de préserver la santé publique et de diminuer les malaises.

Les villes de Montréal et de Québec, les plus importantes de la province de Québec, au Canada, ont mis en place de tels plans. Ces derniers sont mis en œuvre lorsque la température et l'indice humidex<sup>3</sup> dépassent un seuil donné pendant un certain nombre de jours consécutifs. Les données à cet égard proviennent de stations météorologiques situées dans les aéroports locaux. Dans les deux cas, l'aéroport en question se trouve en retrait de la ville, loin des quartiers très peuplés.

Il est aujourd'hui notoire que l'urbanisation a un effet sur le climat d'un milieu, soit la température, l'humidité, le vent et le régime des précipitations.

En général, la température dans les grands centres est plus élevée que dans les zones rurales environnantes, ce qui provoque un îlot de chaleur urbain (ICU). On observe certes les ICU dans les mégapoles, mais également dans les villes de moindre importance<sup>1</sup>. Il n'est donc pas rare que les conditions météorologiques menant au déclenchement du plan d'urgence soient présentes dans le centre urbain avant, plus longtemps et plus souvent que ce qui est mesuré à la station météorologique. De ce fait, il importe de caractériser les îlots de chaleur urbains en fonction du déclenchement du plan d'urgence.

La plupart des études récentes ayant porté sur les ICU s'appuient sur des températures de surface télédéteectées. Même si ces études se révèlent fort utiles dans certains cas, les températures leur servant de base ne correspondent pas à celles que ressentent les gens, et qui importent sur le plan de la santé publique. La conversion entre la température de surface et la température ambiante n'étant pas simple, il est nécessaire de mesurer cette dernière sur place.

Grâce à l'échantillonnage mobile, on peut obtenir des données ponctuelles servant à représenter graphiquement l'intensité des ICU. On applique une régression linéaire selon certaines

caractéristiques du milieu, comme les aires bâties, pavées ou naturelles<sup>2</sup>. Par contre, la dépendance spatiale des données enregistrées en mode mobile vient à l'encontre de la base même de la régression linéaire. Les méthodes d'interpolation déterministe comme la pondération inversement proportionnelle à la distance et les splines ne peuvent servir à établir des prédictions puisqu'elles ne tiennent pas compte de l'erreur d'interpolation estimée. Élaborés avec l'intention de tirer parti de la dépendance spatiale des échantillons, certains concepts géostatistiques peuvent être appliqués pour cartographier l'intensité des ICU et l'erreur d'interpolation.

Le gouvernement du Québec a publié deux plans d'action sur les changements climatiques dans les dernières années. Le premier a permis de financer la modernisation du programme de surveillance du climat<sup>4</sup> de la province et d'étendre sa portée aux zones urbaines. Le second favorise notamment l'adaptation aux changements climatiques et les projets de compétence municipale.

Le présent document présente les résultats préliminaires d'une méthode élaborée à l'intention des autorités municipales afin qu'elles puissent caractériser la variabilité de la température intra-urbaine sur leur territoire. Fondée sur des données enregistrées par des capteurs fixes et mobiles, cette méthode adopte une approche géostatistique afin de cartographier l'intensité des ICU. Les autorités peuvent ainsi s'appuyer sur les cartes résultantes dans la conception et la mise en place de leurs stratégies d'adaptation aux changements climatiques. En ce qui concerne la ville de Québec, les résultats prennent la forme d'une étude de cas.

## 2. Méthodologie

### 2.1 Territoire étudié

Comptant 765 000 habitants, la région métropolitaine de Québec se classe au deuxième rang à l'échelle provinciale et au septième à l'échelle nationale<sup>5</sup>. À elle seule, la ville de Québec en compte plus de 500 000.

Située sur la rive nord du fleuve Saint-Laurent, la ville de Québec (46° 49' N, 71° 15' O) est traversée en son centre par la rivière Saint-Charles, cours d'eau de moindre importance qui coule d'ouest en est. Son altitude varie de 20 à 200 m avec une vague pente ascendante en direction nord. Le centre de la ville domine sur un plateau situé entre 40 et 60 m au-dessus du niveau de la mer, et le secteur à la population la plus dense se situe à proximité, sous la barre des 20 m au-dessus du niveau de la mer.

### 2.2 Échantillonnage de la température de l'air

Seize capteurs de température et d'humidité relative indépendants (HOBO Pro v2 modèle U23-002 d'Onset Computers Inc., Bourne, MA,

États-Unis) ont été installés à des mâts d'éclairage et à des infrastructures privées, à 4 m au-dessus du sol, au moyen d'un bras horizontal de 1,5 m, dans plusieurs endroits de la ville (fig. 1). Leur emplacement a été déterminé en fonction d'un gradient d'urbanisation, du centre de la ville vers ses limites, et de la topographie, du sud au nord en majeure partie. Une mesure était prise chaque minute et les statistiques par heure étaient calculées *a posteriori*.

Deux thermistances (modèle 44006 de YSI Inc., Yellow Springs, OH, États-Unis) ont été fixées à un véhicule, à l'intérieur d'un écran de protection radiologique, à environ 3 m au-dessus du sol. Chacune était connectée à un enregistreur de données (modèle CR-23X de Campbell Scientific Canada Corp., Edmonton, AB Canada) qui prenait une mesure toutes les 5 secondes.

Le véhicule était également équipé d'un GPS (modèle GPSMAP 62s de Garmin International Inc., Olathe, KS, États-Unis) afin de déterminer la position de chaque mesure enregistrée, avec une précision de 3 à 5 m.

Un échantillonnage a eu lieu à deux reprises, suivant un itinéraire prédéterminé, pour chaque journée d'étude, c'est-à-dire en milieu de journée (de midi à 15 h, GMT-5) et dans la nuit (de 21 h à 0 h, GMT-5) à la fois en 2011, les 16 et 22 juillet, 24 août et 23 septembre, et en 2012, les 10 juin, 11, 25 et 30 juillet. Les journées choisies étaient plutôt chaudes et sans nuages.

### 2.3 Analyse

Les mesures prises en mode mobile ont été uniformisées à 13 h et 23 h (GMT-5). Afin de calculer l'intensité de l'ICU, on a soustrait les températures enregistrées à la station météorologique de l'Aéroport international Jean-Lesage à celles prises en mode mobile. La région métropolitaine de Québec a été séparée en une grille à maille régulière de 250 m et l'on a établi la moyenne des intensités au sein de chaque maille, constituant ainsi la variable d'intérêt.

Le krigeage est une extension des régressions multiples dans un contexte spatial<sup>6</sup>, où la valeur à un point sans mesure est estimée en fonction de la moyenne des mesures avoisinantes et de la distance le séparant de chacune. Le facteur de pondération à appliquer est établi au moyen d'un variogramme qui tient compte de la structure spatiale des échantillons. Le cokrigeage diffère du krigeage en ce qu'il tient compte de variables secondaires afin de préciser l'estimation. Ces variables doivent être corrélées (Pearson  $r > 0,5$ ) et leur nombre doit être supérieur à celui de la variable d'intérêt afin de représenter un réel avantage<sup>6</sup>.

Le (co)krigeage ordinaire a été appliqué avec l'assistant d'analyse géostatistique d'ArcMap 10 (ESRI, Redlands, CA, États-Unis). Les paramètres d'interpolation sont présentés dans le

tableau 1. Les cartes obtenues ainsi représentent l'intensité d'ICU et l'erreur d'interpolation estimées. Les variables secondaires comprennent les fractions de couvert de surfaces naturelles (Pearson  $r = 0,73$ , fig. 1) et pavées ( $r = 0,64$ ), estimées au moyen de bases de données existantes<sup>7</sup>. Les fractions de couvert de surface étaient fournies à une résolution de 5 m et ont été agrégées pour des mailles de 250 m de la zone étudiée.

Tableau 1 : Paramètres de (co)krigeage

Variogramme		Voisinage	
Paramètre	Valeur	Paramètre	Valeur
Décalage	250 m	Nbre de points max	5
Nbre de décalages	18	Nbre de points min	2
Modèle	Circulaire	Nbre de régions	1
Portée	4 500 m		

### 3. Résultats et analyse

Les figures 2 et 3 montrent la carte des intensités d'ICU, après krigage et cokrigage, respectivement, pour la nuit du 16 juillet 2011. L'intensité varie de -1,5 à 4 °C, ce qui est conforme aux mesures enregistrées à l'été 1979<sup>8</sup>.

La carte du cokrigage est plus détaillée que celle du krigage en raison des variables secondaires. De plus, elle représente plus clairement l'intensité d'ICU dans les secteurs où le recouvrement est très différent de celui des environs immédiats. Remarquons la lettre A, le centre commercial Les Galeries de la Capitale, c'est-à-dire un bâtiment entouré de surfaces pavées, au milieu de zones de végétation abondante (fig. 1). À cet endroit, l'intensité d'ICU estimée après cokrigage est plus élevée (+1,5 °C) que celle après krigage, en plus d'être située avec plus de précision.

À l'inverse, la lettre B désigne une zone de végétation abondante, les Plaines d'Abraham, se trouvant au milieu d'une zone urbaine avec édifices et surfaces pavées. Les estimations après cokrigage sont inférieures à celles après krigage (-1,0 °C) et les limites du secteur sont déterminées avec plus de précision. À noter que les estimations dans cette zone ne sont pas influencées par le fleuve Saint-Laurent, qui est considérée comme une surface naturelle. La raison en est que les valeurs estimées par interpolation dépendent seulement de celles des échantillons avoisinants et de celles des variables secondaires au point d'interpolation.

Il apparaît ainsi que le cokrigage permet d'obtenir les cartes les plus réalistes. Grâce aux variables secondaires, il est possible d'obtenir des estimations pour les secteurs de la ville difficiles d'accès en raison des contraintes de temps ou d'espace pour le véhicule.

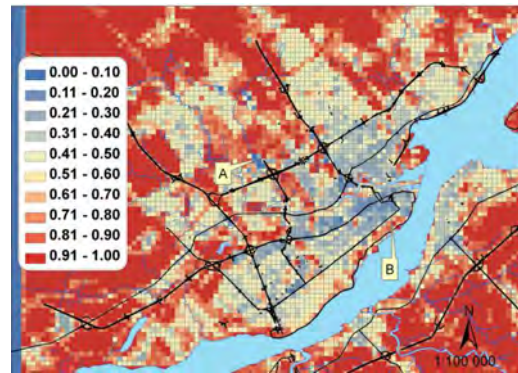


Figure 1. Fraction de surface naturelle

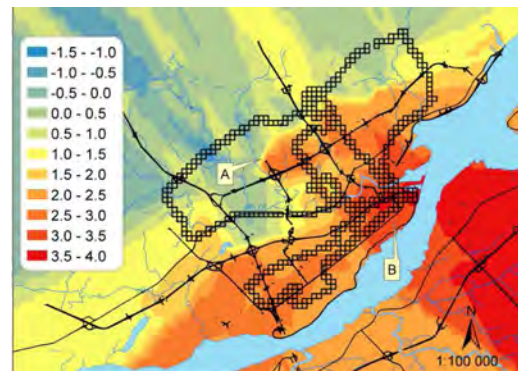


Figure 2. Intensité d'ICU (°C) après krigage mesurée la nuit du 16 juillet 2011

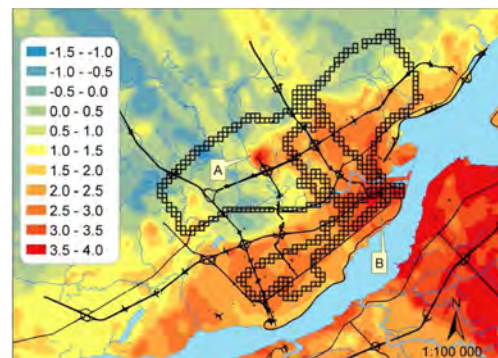


Figure 3. Intensité d'ICU (°C) après cokrigage mesurée la nuit du 16 juillet 2011

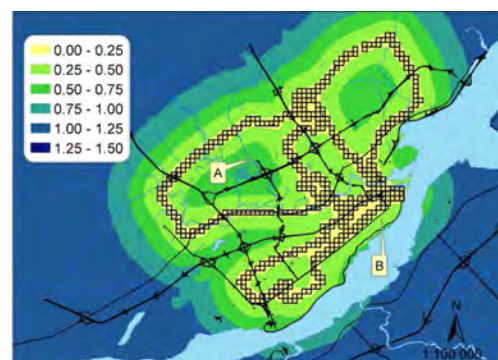


Figure 4. Erreur de cokrigage estimée pour l'intensité d'ICU (°C) mesurée la nuit du 16 juillet 2011

Le cokrigeage, comme le krigeage, est une technique d'interpolation exacte, en ce sens qu'une valeur estimée par cette méthode correspond exactement à celle mesurée à un point d'échantillonnage donné. Ainsi s'expliquent les faibles erreurs d'interpolation (fig. 4) pour les mailles se trouvant directement sur l'itinéraire (< 0,25 °C). Tel qu'attendu, l'erreur augmente avec la distance par rapport à l'itinéraire, sans toutefois dépasser 1 °C pour l'ensemble du secteur échantillonné.

L'erreur hors de ce secteur s'accroît rapidement, suivant la distance. Par exemple, elle dépasse 1 °C à 1 km de l'itinéraire. On peut ainsi conclure que le cokrigeage aux fins d'interpolation a ses limites hors du secteur échantillonné. On le constate lorsqu'on s'arrête aux valeurs estimées sur la rive sud du fleuve Saint-Laurent, à l'est de la partie centrale de la ville. En effet, les échantillons les plus proches se trouvent en pleine zone urbaine, et ont en conséquence une forte intensité d'ICU, donc les valeurs estimées sur la rive sud sont vraisemblablement trop élevées. Les variables secondaires permettent d'obtenir des estimations jusqu'à un certain point. Afin d'effectuer une extrapolation sur de grandes distances, il serait avisé de recourir à une régression tenant compte de la dépendance spatiale de l'échantillon, ce qui demande toutefois une solide connaissance de la statistique.

Le tableau 2 présente les statistiques de rendement du krigeage et du cokrigeage. L'erreur moyenne montre la quasi-inexistence de biais. L'erreur quadratique moyenne (RMSE) montre encore la faible différence, ici 0,2 °C, entre les valeurs estimées après krigeage et cokrigeage et les valeurs mesurées. Toutefois, l'erreur quadratique moyenne standardisée (RMSSE) prouve que l'erreur liée au cokrigeage est estimée avec plus de précision (près de 1) que celle liée au krigeage. Ces deux techniques d'interpolation peuvent servir à produire des cartes représentant la probabilité d'occurrence par rapport à un certain seuil. À la lumière des résultats du tableau 2, le cokrigeage serait la méthode à privilégier pour produire des cartes de probabilité d'occurrence, à tout le moins, si l'on s'en tient à l'intensité d'ICU et, peut-être, aux occurrences de vagues de chaleur.

Tableau 2 : Statistiques de rendement du krigeage et du cokrigeage.

Critère	Référence	Krigeage	Cokrigeage
Erreur moy. (°C)	0	0,002	-0,004
RMSE (°C)	0	0,189	0,218
RMSSE	1	0,829	0,999

#### 4. Conclusion

Le présent rapport illustre la valeur du cokrigeage pour produire des cartes de l'intensité d'ICU à la suite d'une campagne de mesure en mode mobile. Le cokrigeage permet de produire des

cartes plus représentatives et d'obtenir des erreurs d'interpolation estimées plus réalistes que le krigeage. L'erreur estimée peut se révéler fort utile pour obtenir une carte de probabilité d'occurrence de vague de chaleur. Cela dit, le cokrigeage requiert une classification pertinente des couverts de surface, ou d'autres variables secondaires utiles.

Des logiciels courants offrent déjà des fonctions de cokrigeage afin de réaliser des interpolations en toute convivialité, mais l'application des paramètres à cet égard doit se faire avec rigueur et minutie. De plus, ce type de manipulation demande des outils informatiques très performants en présence d'un grand volume de données. Dans cet esprit, le gouvernement du Québec œuvre actuellement à développer un savoir-faire en la matière afin de produire des cartes issues de méthode d'interpolation probabiliste au profit des autorités municipales.

Parmi les travaux à venir, notons l'optimisation des paramètres aux fins de cokrigeage. De plus, le gouvernement compte bonifier les données sur la variabilité de l'intensité des ICU de la ville de Québec selon différentes conditions météorologiques, par la mise en commun des données temporelles et spatiales obtenues à la suite d'échantillonnages en provenance de sources fixes et mobiles. Ensuite viendrait la préparation de cartes de probabilité d'occurrence de vagues de chaleur. En terminant, mentionnons que l'analyse des données provenant de l'échantillonnage fixe horaire est en cours afin de documenter le dépassement des seuils déclenchant les plans d'urgence pour différents secteurs de la ville de Québec.

#### 5. Remerciements

L'auteur tient à remercier Éric Dubé, Alexandre Gosselin Arsenault et Vincent Giasson pour leur soutien technique. De plus, il souhaite souligner la contribution de Nataniel Therrien, pour l'aspect géostatistique et cartographique, et celle d'Alexandre Leroux (Environnement Canada), pour la classification des surfaces. Il remercie également la Ville de Québec ainsi que deux propriétaires privés pour l'utilisation de leurs infrastructures. Enfin, il remercie tout particulièrement Jany McKinnon et Johanne Bélanger pour leur aide dans la préparation du présent document.

#### 6. Références

<sup>1</sup> CHRISTEN, A. et R. VOGT. « Energy and radiation balance of a central European city », *International Journal of Climatology*, vol. 24, n° 11, p. 1395 à 1421, 2004.

<sup>2</sup> HART, M.A. et D.J. SAILOR. « Quantifying the influence of land-use and surface characteristics on spatial variability in the urban heat island »,

---

*Theoretical and Applied Climatology*, vol 95, p. 397 à 406, 2009

<sup>3</sup> MASTERSON, J. et F.A. RICHARDSON. *Humidex: A Method of Quantifying Human Discomfort Due to Excessive Heat and Humidity*, Downsview, Environnement Canada, 45 p., 1979.

<sup>4</sup> MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DES PARCS. « Surveillance du climat », ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, [en ligne] [<http://www.mddep.gouv.qc.ca/climat/surveillance/accueil.htm>]. Consulté en 2012.

<sup>5</sup> STATISTIQUE CANADA. « Chiffres de population et des logements, régions métropolitaines de recensement, recensements de 2011 et 2006 », Statistique Canada, [en ligne] [<http://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2011/dp-pd/hltfst/pd-pl/Table-Tableau.cfm?LANG=Fra&T=205&S=3&RPP=50>]. Consulté le 11 juillet 2012.

<sup>6</sup> WACKERNAGEL, H. *Multivariate geostatistics: an introduction with applications*, 3<sup>e</sup> édition, Berlin, Springer-Verlag, 2010.

<sup>7</sup> LEROUX, A. et coll. « Automated urban land use and land cover classification for mesoscale atmospheric modeling over canadian cities », *Geomatica*, n° 63, p. 393 à 406, 2009.

<sup>8</sup> LEDUC, R. et coll. « Îlot de chaleur à Québec : Cas d'été », *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 19, n° 4, p. 471 à 480, 1980.