

**Caractérisation de la variabilité spatiale
et temporelle de la température de l'air ambiant
sur un territoire urbain :**

Étude du cas de la ville de Québec



Figure de la page couverture : Vue de la ville de Québec (O. Bergeron, MDDELCC)

Ce document peut être consulté sur le site Web du ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques au www.mddelcc.gouv.qc.ca

Dépôt légal – Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2014

ISBN 978-2-550-69909-5 (PDF)
© Gouvernement du Québec, 2014

ÉQUIPE DE RÉALISATION

Rédaction	Onil Bergeron
Révision scientifique	Bernard Caron Julie Drapeau Éric Larrivée Pierre-Yves St-Louis
Prise de mesures et prétraitement	Éric Dubé Michelle Roy-Carrier Alexandre Gosselin Arsenault
Assistance technique et logistique	Pascal Garand-Dion Vincent Giasson Christian Roy Jocelyne Arcand
Analyse statistique	Bernard Caron
Traitement géostatistique	Nataniel Therrien
Graphisme et cartographie	France Gauthier Isabelle Morin
Mise en page	Karen Lopez
Coordination de la diffusion	Johanne Bélanger

Référence bibliographique :

BERGERON, Onil, 2014. *Caractérisation de la variabilité spatiale et temporelle de la température de l'air ambiant sur un territoire urbain : Étude du cas de la ville de Québec*, Québec, ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Direction du suivi de l'état de l'environnement, ISBN 978-2-550-69909-5 (PDF), 38 p.

REMERCIEMENTS

L'auteur tient à remercier la Ville de Québec pour le partage d'information géomatique. Des remerciements particuliers sont adressés au Centre hospitalier universitaire de Québec, à la Ville de Québec et à deux propriétaires privés pour avoir donné l'autorisation d'installer les sondes de température et d'humidité de l'air sur leur propriété.

RÉSUMÉ

Des études ont démontré que la densification du tissu urbain peut affecter le climat à l'échelle d'un quartier. Par exemple, des mesures de la variation des températures de surface ont été réalisées par télédétection pour documenter les îlots de chaleur urbains au Québec et ailleurs. Toutefois, ce type de mesures ne représente pas les conditions de l'air ambiant auxquelles est exposée la population ni ses variations d'une journée à l'autre, comme peut le faire une station climatologique. Par ailleurs, de telles stations sont habituellement situées à l'extérieur des secteurs urbanisés et servent à mesurer le climat régional, sans égard à l'effet de l'urbanisation sur le climat local.

Ainsi, pour répondre aux nouveaux besoins en produits climatologiques adaptés au milieu urbain, le ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC), qui gère le Programme de surveillance du climat (PSC), a conçu une méthodologie de caractérisation de la variabilité de la température de l'air ambiant sur un territoire urbain. Les objectifs du projet pilote mené dans la ville de Québec étaient les suivants :

1. Élaborer un protocole de mesure et d'analyse pour quantifier la variabilité de la température de l'air ambiant en milieu urbain;
2. Établir une climatologie urbaine de la température de l'air ambiant pour la ville de Québec;
3. Caractériser la représentativité spatiale des mesures de la température de l'air ambiant prises aux stations météorologiques permanentes de Québec.

La campagne de mesure s'est étalée de juin 2011 à septembre 2012 et a nécessité deux méthodes complémentaires. Un échantillonnage fixe continu a été réalisé au moyen de 16 sondes temporaires et à six stations permanentes afin d'obtenir des mesures horaires de la température et de l'humidité de l'air ambiant et d'en dériver des valeurs d'humidex. La station de l'aéroport (Québec/Jean-Lesage Intl) a servi de station de référence. L'échantillonnage mobile ponctuel a consisté à sillonner la ville à l'aide d'un véhicule muni de sondes de température et d'humidité et d'un GPS. Des mesures de jour et de soir ont été prises au cours des étés 2011 et 2012.

Le projet pilote mené à Québec a montré que le centre-ville présente des températures généralement supérieures à celles des quartiers situés en périphérie. Le centre-ville est davantage sujet aux dépassements des seuils de déclenchement du plan d'action en cas de chaleur accablante de la Ville de Québec. Les stations climatologiques permanentes ne permettent de représenter que partiellement les conditions météorologiques du centre-ville. Une nouvelle station permanente du PSC a donc été installée dans le quartier Saint-Sauveur.

La méthodologie élaborée par le MDDELCC permet la caractérisation fine de la variabilité de la température de l'air ambiant en milieu urbain en fonction de variables temporelles et spatiales. Une climatologie du milieu spécifiquement urbain et des cartes pour certains événements ou indicateurs d'intérêt peuvent être produites. Cette méthodologie représente un outil d'aide à la décision pour les intervenants dont les actions dépendent des conditions météorologiques. Cette méthodologie peut être appliquée à d'autres villes et à d'autres contextes, comme l'étude de l'impact de mesures d'atténuation des îlots de chaleur urbains.

TABLES DES MATIÈRES

1	MISE EN CONTEXTE	1
2	OBJECTIFS DU PROJET	1
3	MATÉRIEL ET MÉTHODES	1
3.1	Échantillonnage fixe continu.....	1
3.2	Échantillonnage mobile ponctuel	3
4	CARTOGRAPHIE.....	5
5	RÉSULTATS ET DISCUSSION	7
5.1	Différences de température avec la station de référence	7
5.2	Variables temporelles.....	11
5.3	Variables spatiales	15
5.4	Dépassements de seuils	16
5.5	Conditions marginales de chaleur accablante	20
5.6	Cycles gel-dégel.....	22
5.7	Cartographie de l'échantillonnage mobile	22
5.8	Comparaison des températures de l'air et de surface	24
6	CONCLUSION	27
7	BIBLIOGRAPHIE.....	28

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 :	Altitude et proportion des surfaces naturelle (λ_n) et pavée (λ_p) des stations de l'échantillonnage fixe	6
Tableau 2 :	Synthèse des différences de température quotidienne minimale (dT_{min}) en fonction des classes de vent et d'ennuagement en conditions estivales. Le nombre de jours mesurés (n) par classe est également présenté.....	14
Tableau 3 :	Synthèse des différences de température quotidienne maximale (dT_{max}) en fonction des classes de température quotidienne maximale (T_{max}) et d'ennuagement en conditions estivales. Le nombre de jours de données (n) par classe est également présenté. Les moyennes suivies d'une lettre différente, pour le centre-ville et la périphérie séparément, sont significativement différentes.....	15

LISTE DES FIGURES

Figure 1 :	Localisation des stations fixes temporaires (HOBO) et des stations automatiques permanentes du Programme de surveillance du climat (PSC) du MDDELCC et d'Environnement Canada (EC). Le centre-ville apparaît en jaune.....	3
Figure 2 :	Localisation de l'échantillonnage mobile ponctuel en 2011 et 2012.....	4
Figure 3 :	Proportion de surface naturelle agrégée à 250 mètres.....	5
Figure 4 :	Proportion de surface pavée agrégée à 250 mètres.....	6
Figure 5 :	Différences de température quotidienne minimale (dT_{\min}) au cours de l'été 2011. Les stations permanentes sont marquées d'un astérisque (*).....	7
Figure 6 :	Différences de température quotidienne minimale (dT_{\min}) au cours de l'été 2012. Les stations permanentes sont marquées d'un astérisque (*).....	8
Figure 7 :	Différences de température quotidienne minimale (dT_{\min}) au cours de l'hiver 2011-2012. Les stations permanentes sont marquées d'un astérisque (*).....	8
Figure 8 :	Différences de température quotidienne maximale (dT_{\max}) au cours de l'été 2011. Les stations permanentes sont marquées d'un astérisque (*).....	9
Figure 10 :	Différences de température quotidienne maximale (dT_{\max}) au cours de l'hiver 2011-2012. Les stations permanentes sont marquées d'un astérisque (*).....	10
Figure 11 :	Localisation des cinq stations les plus chaudes (du centre-ville) et les plus froides (périphériques).	11
Figure 12 :	Différences de température quotidienne minimale (dT_{\min}) aux cinq stations chaudes et froides en fonction de la température quotidienne minimale (T_{\min}) observée à la station de référence durant toute la période de mesure	12
Figure 13 :	Différences de température quotidienne minimale (dT_{\min}) au centre-ville (A) et en périphérie (B) en fonction de la vitesse du vent à 4 h HNE observée à la station de référence au cours des périodes estivales 2011 et 2012	13
Figure 14 :	Différences de température quotidienne maximale (dT_{\max}) en fonction de la température quotidienne maximale (T_{\max}) observée à la station de référence au cours des périodes estivales en conditions ennuagées au centre-ville et en périphérie.....	15
Figure 16 :	Dépassement du seuil de température minimale au cours de la période allant du 1 ^{er} juin au 15 septembre 2012.....	17
Figure 18 :	Dépassement du seuil de température maximale au cours de la période allant du 1 ^{er} juin au 15 septembre 2012.....	18
Figure 20 :	Dépassement du seuil d'humidex au cours de la période allant du 1 ^{er} juin au 15 septembre 2012	19
Figure 22 :	Température maximale quotidienne (T_{\max}) en conditions marginales (zone ombragée) à la station de référence (n = 35)	21

Figure 23 :	Humidex maximal quotidien en conditions marginales (zone ombragée) à la.....	21
Figure 24 :	Nombre de cycles gel-dégel au cours de la période allant du 1 ^{er} octobre 2011 au 20 mars 2012	22
Figure 25 :	Différences de température avec la station de référence (dT) le 16 juillet 2011 à 14 h HNE pour l'échantillonnage mobile et les stations fixes. La température moyenne à cette heure à la station de référence est de 28,4 °C.....	23
Figure 26 :	Différences de température avec la station de référence (dT) le 11 juillet 2012 à 23 h HNE pour l'échantillonnage mobile et les stations fixes. La température moyenne à cette heure à la station de référence est de 16,5 °C.....	24
Figure 27 :	Cartographie des classes de température de surface (T_{sfc}) de l'INSPQ et parcours de l'échantillonnage mobile du 11 juillet 2012 23 h HNE	25
Figure 28 :	Classes de température de surface relative (T_{sfc}) agrégées à 250 mètres en fonction des différences de température avec la station de référence (dT) mesurées le 11 juillet 2012 à 23 h HNE (n = 387)	26
Figure 30 :	Classes de température de surface relatives (T_{sfc}) dans un secteur résidentiel de la municipalité de L'Ancienne-Lorette	27

1 MISE EN CONTEXTE

La présence de bâtiments et de surfaces imperméables ainsi que l'activité humaine peuvent altérer les conditions météorologiques en milieu urbain. Pour cette raison, il est possible que les mesures prises aux stations rurales avoisinantes ne représentent pas tout à fait les conditions qu'on observe dans les quartiers fortement urbanisés qui, souvent, présentent une vulnérabilité accrue à certains aléas climatiques (p. ex. les épisodes de chaleur accablante) en raison de conditions socioéconomiques défavorables. Par ailleurs, la matrice urbaine présente généralement des propriétés de surface hétérogènes d'un secteur à l'autre, ce qui peut influencer les conditions météorologiques locales et, par conséquent, la représentativité d'une station météorologique située dans un secteur spécifique de la ville. Par exemple, Leduc et coll. (1980a, 1980b) ont observé un écart atteignant 5 ou 6 °C entre les quartiers de la ville de Québec à l'été 1979 et à l'hiver 1980.

Les mesures des températures de surface par télédétection peuvent servir à obtenir une appréciation des différences de température entre les quartiers d'une ville. Toutefois, ces températures de surface ne constituent qu'une estimation indirecte de la température de l'air ambiant puisqu'elles doivent être corrigées en fonction des propriétés de l'atmosphère et des surfaces. De plus, ces estimations ne sont disponibles que de façon ponctuelle dans le temps; elles ne permettent donc pas de documenter la variabilité d'une journée à l'autre ni d'assurer une surveillance en temps réel.

Il est donc nécessaire de mesurer directement la température de l'air ambiant à fine échelle en milieu urbain pour confirmer la représentativité spatiale des stations météorologiques qui se trouvent à l'intérieur ou en périphérie de la matrice urbaine. Ces mesures pourraient notamment servir à établir une climatologie quartier par quartier ou à justifier l'installation de nouvelles stations climatologiques permanentes.

Le ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC), qui gère le Programme de surveillance du climat (PSC), a conçu une méthodologie de caractérisation de la variabilité de la température de l'air ambiant sur un territoire urbain. Le présent rapport synthèse présente les principaux résultats du projet pilote mené dans la ville de Québec.

2 OBJECTIFS DU PROJET

1. Élaborer un protocole de mesure et d'analyse pour quantifier la variabilité de la température de l'air ambiant entre différents secteurs d'une ville.
2. Établir une climatologie urbaine pour la ville de Québec.
3. Caractériser la représentativité spatiale des mesures de température de l'air ambiant prises aux stations météorologiques sur le territoire de la ville de Québec, notamment à l'égard du déclenchement du plan d'action en cas de chaleur accablante.

3 MATÉRIEL ET MÉTHODES

Ce projet pilote a consisté à mesurer la température de l'air ambiant sur le territoire de la ville de Québec durant une période d'échantillonnage qui s'est étendue de juin 2011 à septembre 2012. Deux méthodes d'échantillonnage complémentaires ont été appliquées, soit l'échantillonnage fixe continu et l'échantillonnage mobile ponctuel. Les données de stations météorologiques automatiques permanentes du PSC et d'Environnement Canada situées dans la région de Québec ont également été utilisées dans les analyses.

3.1 Échantillonnage fixe continu

L'échantillonnage fixe continu correspond à la prise de mesures à un nombre restreint de stations temporaires fixes, et ce, de façon ininterrompue durant toute la période à l'étude. Ces mesures permettent principalement de documenter la variabilité temporelle de la température de l'air ambiant dans chaque quartier représenté.

Seize senseurs autonomes et portables (HOBO, modèle Pro V2 avec senseurs externes) ont été installés sur des infrastructures existantes (figure 1) dans treize quartiers de la ville (figure 1) en respectant un gradient d'urbanisation (du centre-ville vers la périphérie). La température et l'humidité relative de l'air ambiant ont été enregistrées chaque minute, et les statistiques horaires (mesures moyenne, maximale, minimale et instantanée) ont été calculées *a posteriori*.

La période de mesure s'est étendue du 27 juin 2011 au 26 septembre 2012. Les données manquent toutefois pour une bonne partie des mois d'avril et de mai 2012 en raison d'un problème technique. Ces données sont archivées dans la base de données principale du PSC.

En plus des seize stations temporaires, six stations permanentes ont été utilisées pour les analyses (figure 1), dont trois du PSC, soit Parc Les Primevères, Saint-Charles-Garnier et Charny, et trois autres d'Environnement Canada, soit Beauport (EC), Ste-Foy (U. Laval) et Québec/Jean-Lesage Intl. Cette dernière station a servi de station de référence.



Photo 1 : Station Limoilou-2

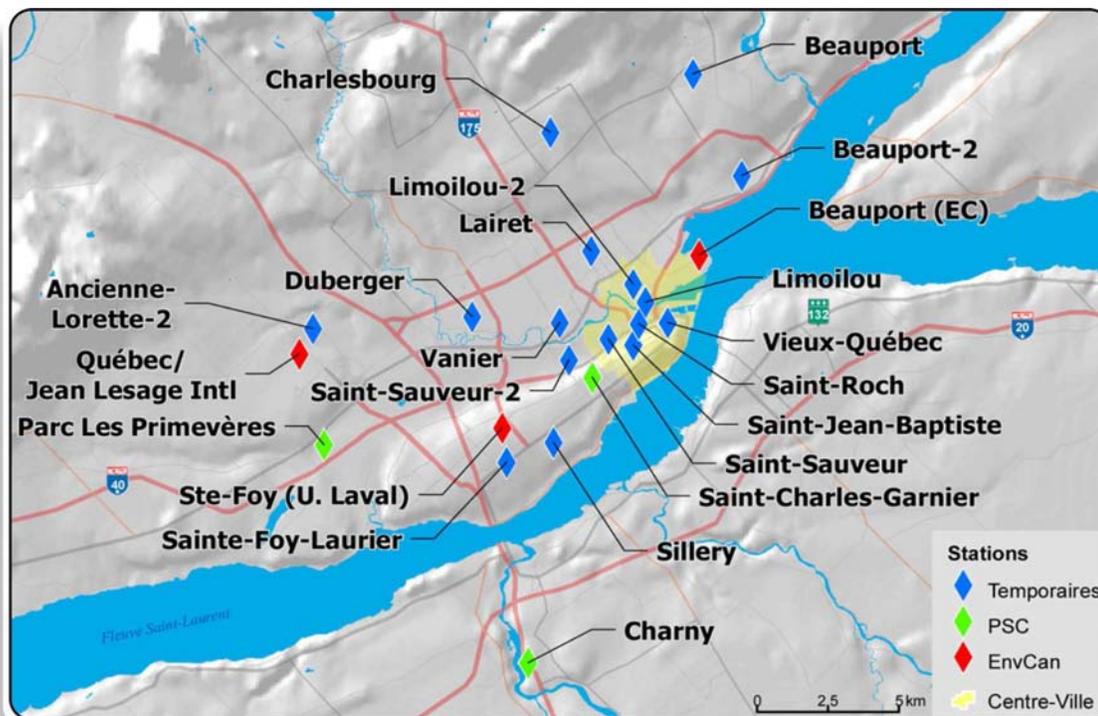


Figure 1 : Localisation des stations fixes temporaires (HOBO) et des stations automatiques permanentes du Programme de surveillance du climat (PSC) du MDDELCC et d'Environnement Canada (EC). Le centre-ville apparaît en jaune.

3.2 Échantillonnage mobile ponctuel

L'échantillonnage mobile ponctuel consiste à sillonner la ville selon un parcours prédéterminé (figure 2) dans un véhicule muni de sondes de température et d'humidité relative à réponse rapide et équipé d'un GPS (figure 2). Ces mesures permettent principalement de documenter la variabilité spatiale à fine échelle de la température de l'air ambiant.

À chaque date d'échantillonnage correspondent deux périodes de mesure, soit le jour (de 12 h à 15 h HNE) et la nuit (de 21 h à 24 h HNE). Les mesures de jour et de nuit sont respectivement normalisées à 14 h et à 23 h HNE. La différence de température moyenne de toutes les stations temporaires est compensée entre le moment où la mesure est prise et l'heure de normalisation. Les mesures sont enregistrées toutes les cinq secondes et seules les mesures prises lorsque le véhicule se déplace à 10 km/h ou plus sont utilisées. Les mesures sont agrégées sur une grille comprenant des cellules de 250 X 250 mètres couvrant l'ensemble du territoire échantillonné.

Les périodes de temps chaud ont été ciblées. En tout, huit échantillonnages mobiles ont été menés, soit les 16 et 22 juillet, 24 août et 23 septembre 2011 ainsi que les 10 et 11 juin, 25 et 30 juillet 2012.

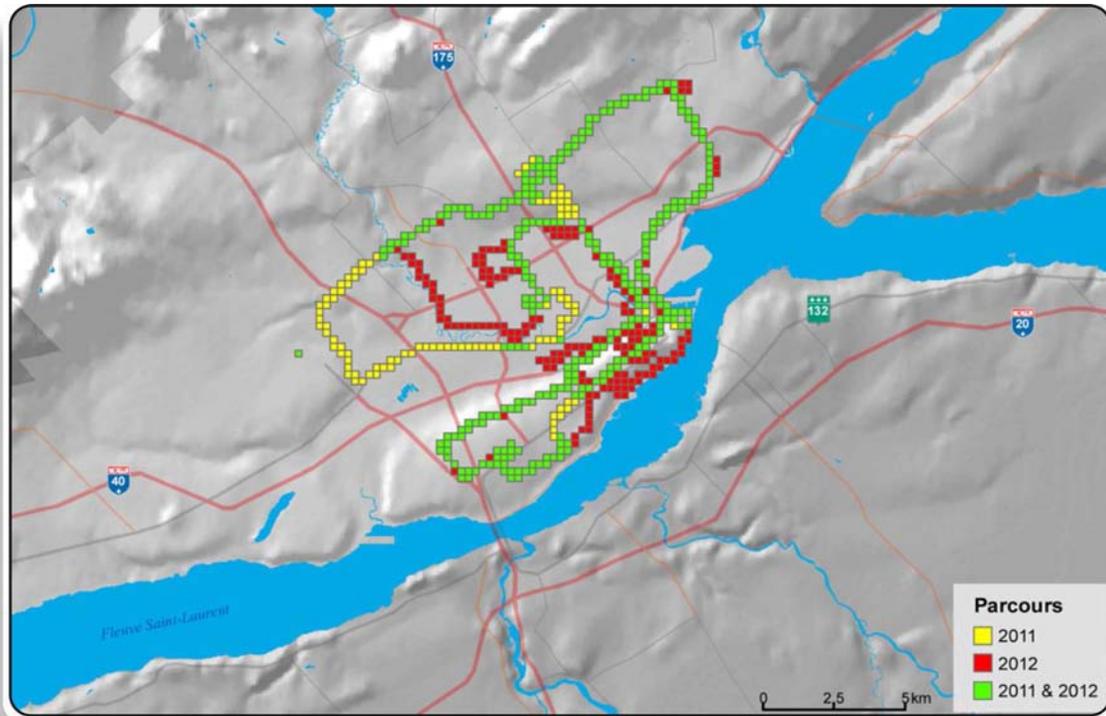


Figure 2 : Localisation de l'échantillonnage mobile ponctuel en 2011 et 2012



Photo 2 : Véhicule muni de sondes servant à l'échantillonnage mobile ponctuel

4 CARTOGRAPHIE

Les cartes des mesures interpolées de l'échantillonnage mobile ponctuel ont été produites à l'aide du logiciel ArcGIS 10 (ESRI, Redlands, CA) et de son outil géostatistique. L'interpolation spatiale a été réalisée par cokrigage (Bergeron 2012). Ainsi, une estimation produite en un point est le résultat de la moyenne des points de mesure voisins pondérés en fonction de la distance et de la corrélation entre la mesure d'intérêt (la température de l'air) et une ou plusieurs variables secondaires. Les deux variables secondaires utilisées, tirées du Jeu de données de classification de l'utilisation du territoire urbain du Canada (CUTUC) produit par Environnement Canada (Leroux et coll. 2009), sont la proportion de surface naturelle (sol nu, végétation ou eau : figure 3) et pavée (asphalte ou béton : figure 4). Les proportions de surface sont disponibles à une résolution de 5 mètres et ont été agrégées à 250 mètres sur la grille des mesures de l'échantillonnage mobile ponctuel.

Les proportions de surfaces naturelle et pavée dans un rayon de 500 mètres autour des stations de l'échantillonnage fixe sont présentées dans le tableau 1.

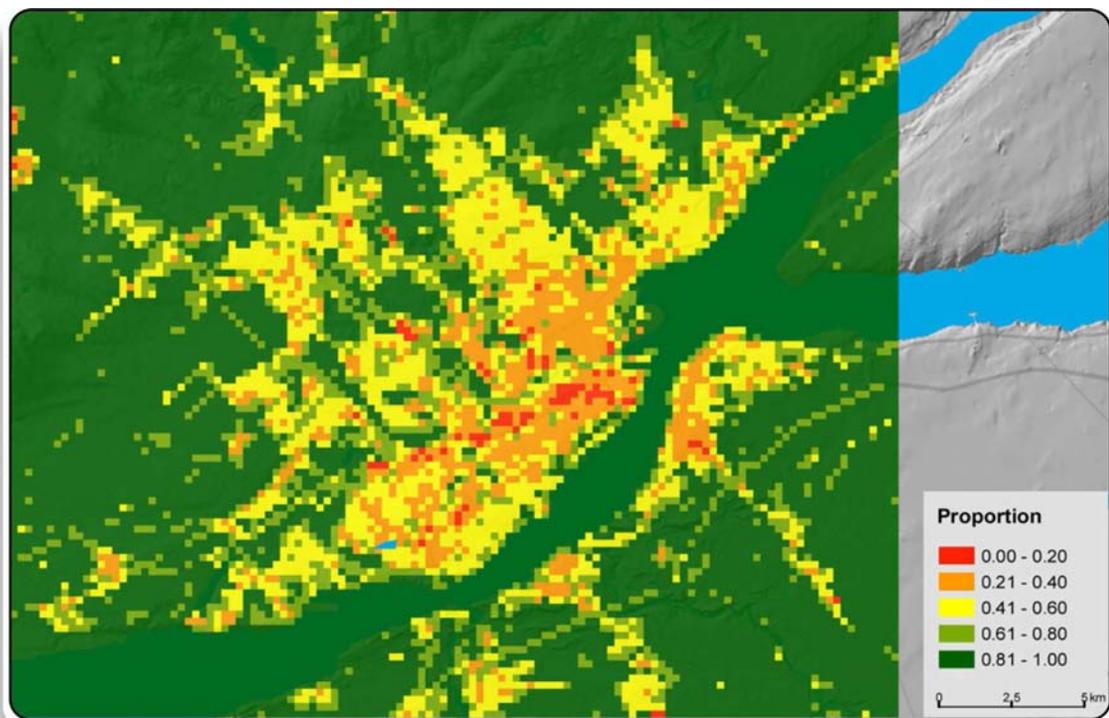


Figure 3 : Proportion de surface naturelle agrégée à 250 mètres

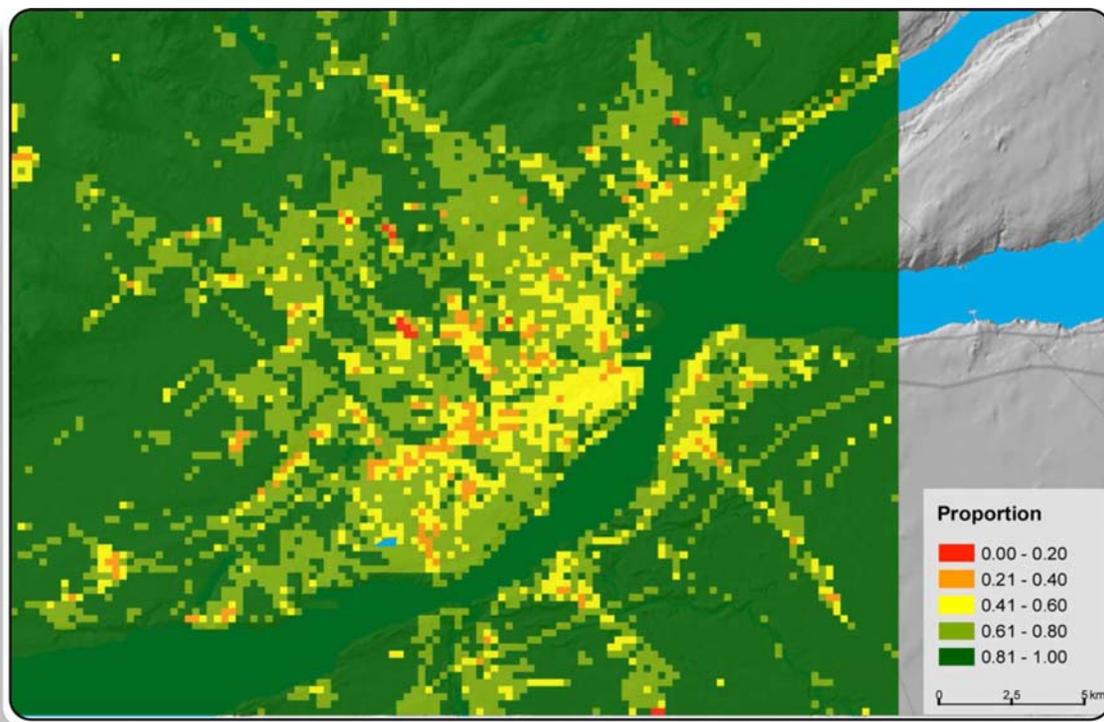


Figure 4 : Proportion de surface pavée agrégée à 250 mètres

Tableau 1 : Altitude et proportion des surfaces naturelle (λ_n) et pavée (λ_p) des stations de l'échantillonnage fixe

Station	Altitude (m)	λ_n	λ_p
Ancienne-Lorette-2	61	0,44	0,30
Beauport	113	0,53	0,29
Beauport (EC)	10	0,89	0,10
Beauport-2	30	0,50	0,26
Charlesbourg	124	0,53	0,27
Charny	78	0,71	0,26
Duberges	17	0,46	0,30
Lairet	14	0,37	0,36
Limoilou	6	0,43	0,39
Limoilou-2	9	0,29	0,41
Parc Les Primevères	22	0,57	0,29
Québec/Jean-Lesage Intl	62	0,78	0,19
Saint-Charles-Garnier	75	0,34	0,42
Sainte-Foy-Laurier	93	0,32	0,40
Saint-Jean-Baptiste	69	0,22	0,46
Saint-Roch	10	0,23	0,52
Saint-Sauveur	20	0,20	0,51
Saint-Sauveur-2	23	0,21	0,53
Sillery	82	0,52	0,29
Ste-Foy (U. Laval)	90	0,47	0,41
Vanier	12	0,38	0,39
Vieux-Québec	29	0,32	0,47

5 RÉSULTATS ET DISCUSSION

Cette section présente un sommaire des principaux résultats de l'étude de cas.

5.1 Différences de température avec la station de référence

Un îlot de chaleur urbain correspond à la différence de température (dT) entre un milieu urbain et un milieu rural voisin ($dT = \text{urbain} - \text{rural}$). Pour les besoins de cette étude, la station de référence est considérée comme un milieu rural, bien qu'elle ne soit pas complètement exempte d'influence urbaine. Cette station, située à l'aéroport de Québec, a été retenue car elle représente la station la plus vastement utilisée pour caractériser le climat du territoire de la ville de Québec.

Les résultats (figures 5 à 10) sont présentés sous la forme de diagrammes en boîte dans lesquels, pour chaque station, les barres horizontales correspondent, de bas en haut, au 5^e centile, au 1^{er} quartile, à la médiane, au 3^e quartile et au 95^e centile des dT incluses dans la période retenue. La moyenne des dT est également représentée par un point. Les stations sont triées en ordre décroissant de dT médiane.

Les dT de jour et de nuit sont caractérisées séparément en référence à la température quotidienne maximale (dT_{max}) et minimale (dT_{min}), respectivement. Trois périodes sont définies, soit l'été 2011 (du 27 juin au 15 septembre), l'été 2012 (du 1^{er} juin au 15 septembre) et l'hiver 2011-2012 (du 1^{er} octobre 2011 au 20 mars 2012).

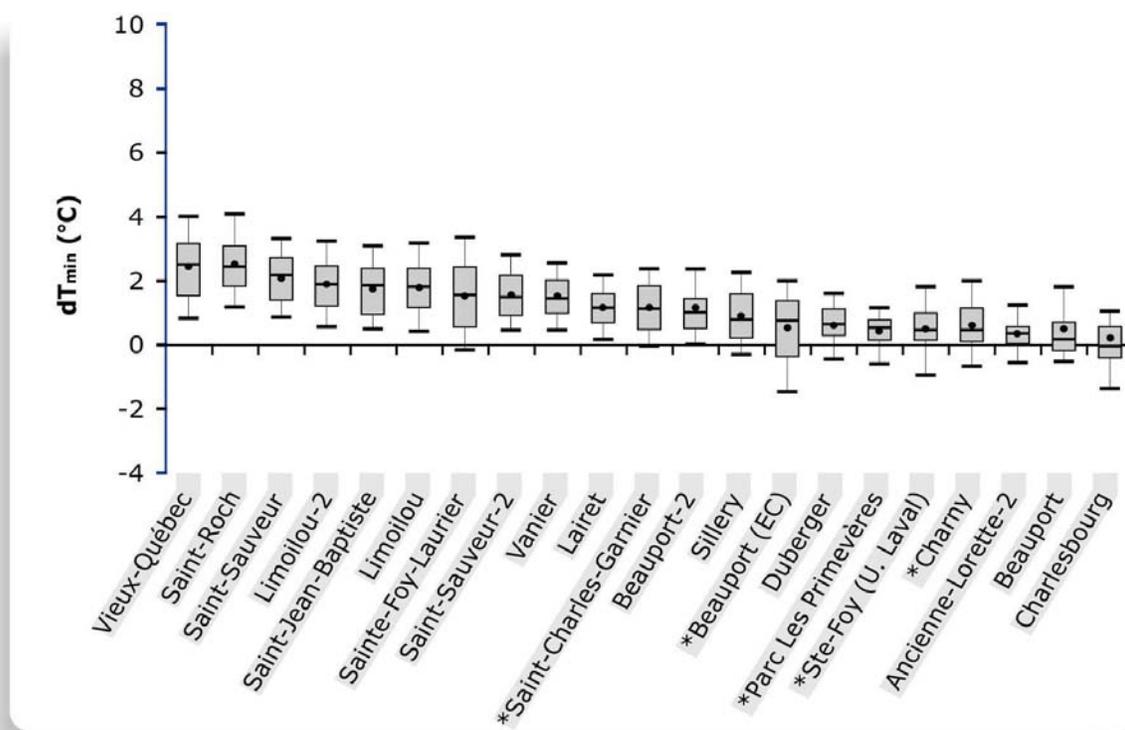


Figure 5 : Différences de température quotidienne minimale (dT_{min}) au cours de l'été 2011. Les stations permanentes sont marquées d'un astérisque (*).

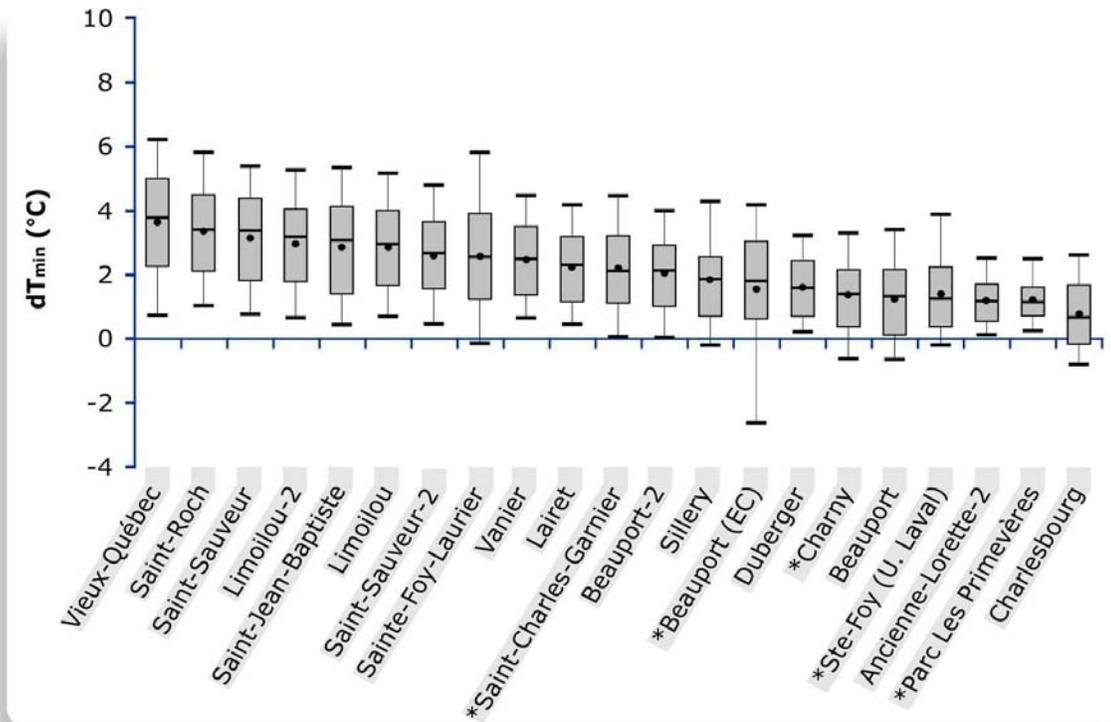


Figure 6 : Différences de température quotidienne minimale (dT_{min}) au cours de l'été 2012. Les stations permanentes sont marquées d'un astérisque (*).

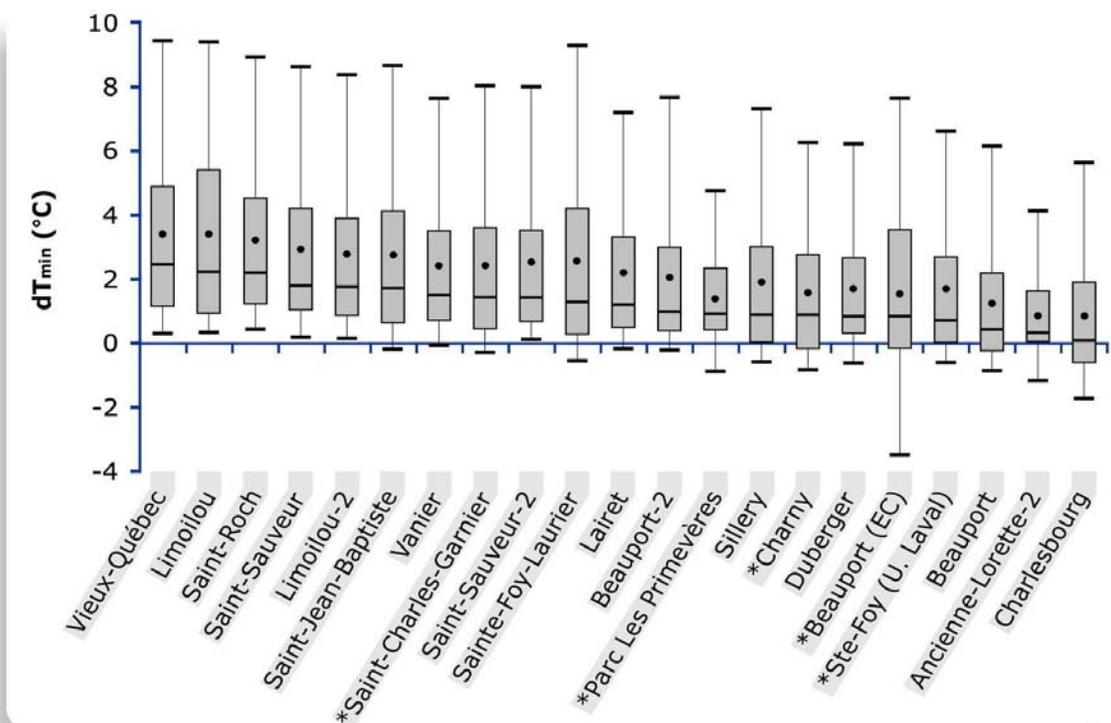


Figure 7 : Différences de température quotidienne minimale (dT_{min}) au cours de l'hiver 2011-2012. Les stations permanentes sont marquées d'un astérisque (*).

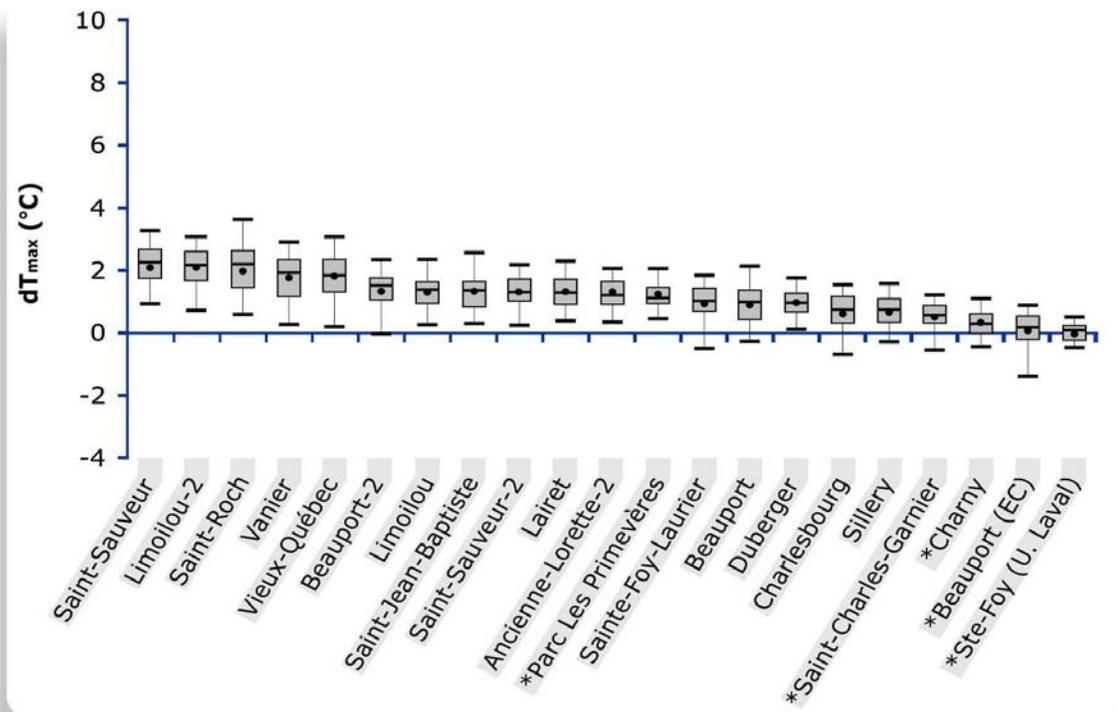


Figure 8 : Différences de température quotidienne maximale (dT_{max}) au cours de l'été 2011. Les stations permanentes sont marquées d'un astérisque (*).

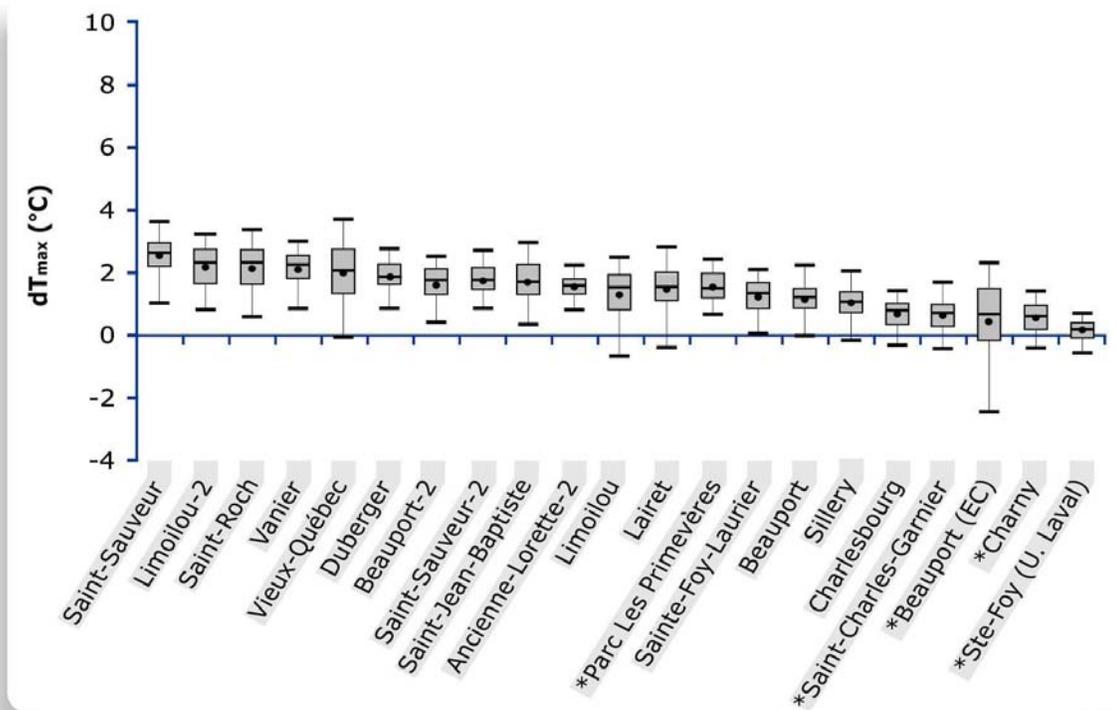


Figure 9 : Différences de température quotidienne maximale (dT_{max}) au cours de l'été 2012. Les stations permanentes sont marquées d'un astérisque (*).

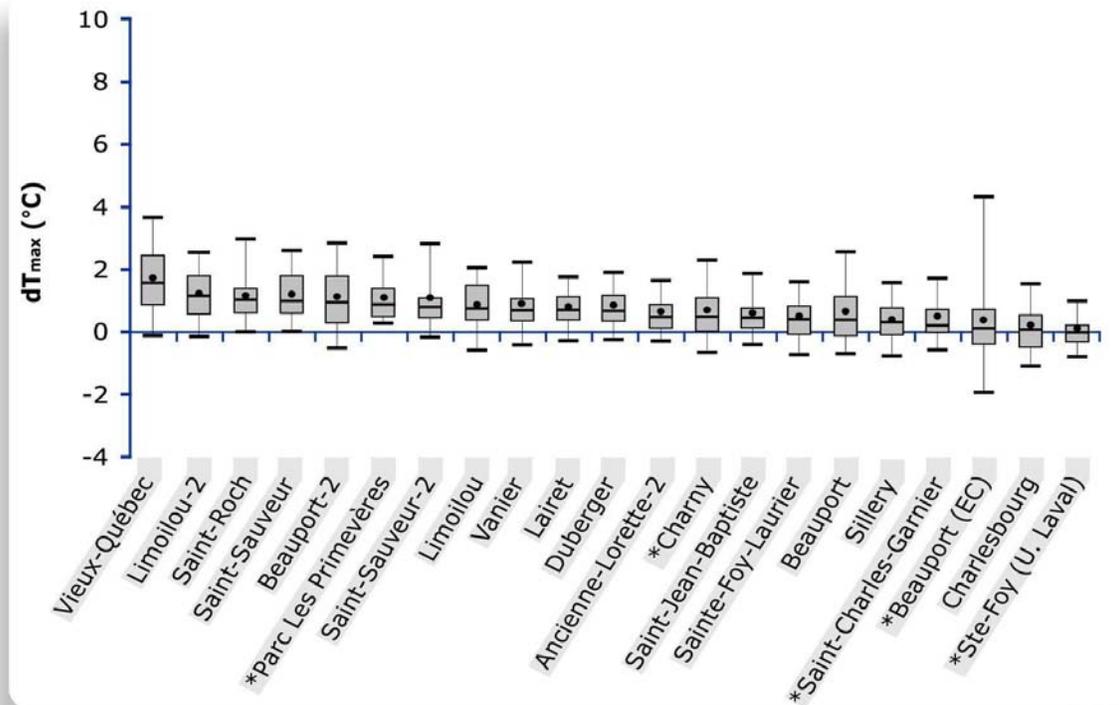


Figure 10 : Différences de température quotidienne maximale (dT_{\max}) au cours de l'hiver 2011-2012. Les stations permanentes sont marquées d'un astérisque (*).

En général, la plupart des stations enregistrent des températures plus élevées que la station de référence (dT positives), avec des valeurs médianes variant de 0 à 4 °C en fonction de la station, de la saison et de l'année de mesure. De plus, les dT sont plus élevées et plus variables la nuit que le jour, ce qui est cohérent avec l'idée que l'effet d'îlot de chaleur urbain est maximal quelques heures après le coucher du soleil. Par ailleurs, durant cette période, les surfaces urbaines libèrent l'énergie accumulée le jour et se refroidissent plus lentement que dans un milieu rural ouvert. Ces deux processus varient en fonction des conditions météorologiques de la journée. Enfin, les dT les plus variables ont été observées les nuits d'hiver avec des valeurs variant d'environ -4 à 10 °C (figure 7). Ces valeurs de dT élevées seraient dues, entre autres, au refroidissement radiatif (perte de chaleur vers le ciel) qui est plus important dans un milieu rural ouvert que dans un milieu urbain où les différentes structures en hauteur restreignent l'ouverture vers le ciel, et donc, les pertes de chaleur.

De façon plus spécifique, lors des nuits d'été, les stations du centre-ville (Vieux-Québec, Saint-Roch, Saint-Sauveur, Limoilou-2, Saint-Jean-Baptiste et Limoilou) enregistrent des dT de 1 à 6 °C avec des valeurs médianes autour de 3 °C (figures 5 et 6), ce qui indique que, 50 % du temps, ces quartiers présentent une température quotidienne minimale au moins 3 °C supérieure à celle de la station de référence. De la même façon, les stations périphériques présentent des dT généralement positives lors des nuits d'été, comme le laisse penser le peu de stations où la valeur du 1^{er} quartile est négative. Ainsi, on peut conclure que la vaste majorité des quartiers de la ville de Québec échantillonnés sont plus chauds que la station de référence pendant une majorité de nuits d'été.

Dans les quartiers du centre-ville, les dT de jour se situent entre 1 et 3 °C avec une valeur médiane d'environ 2 °C (figures 8 et 9), ce qui indique que ces quartiers présentent, 50 % du temps, une température quotidienne maximale plus chaude d'au moins 2 °C que la station de référence. Dans les quartiers périphériques, les dT varient de façon générale entre -1 et 2 °C avec une valeur médiane autour de 1 °C. Les dT observées les jours d'hiver sont les moins élevées, avec des valeurs dépassant rarement 2 °C (figure 10).

Il est à noter que les six stations permanentes ne se retrouvent pas parmi les stations les plus chaudes, à l'exception des jours d'hiver où les dT sont faibles. Ce constat permet de croire que les stations permanentes ne représentent que partiellement les conditions de température auxquelles est exposée la population du centre-ville.

De cette analyse, les cinq stations temporaires les plus chaudes (Vieux-Québec, Saint-Roch, Saint-Sauveur, Limoilou-2 et Saint-Jean-Baptiste) et les plus froides (Sillery, Duberger, Ancienne-Lorette-2, Beauport et Charlesbourg) ont été retenues pour des analyses subséquentes afin de représenter respectivement le centre-ville et la périphérie (figure 11). La présence d'un arbre mature et d'un jardin communautaire adjacents à la station Limoilou (figure 1) pourrait expliquer que cette station soit absente du groupe des stations chaudes malgré sa localisation.

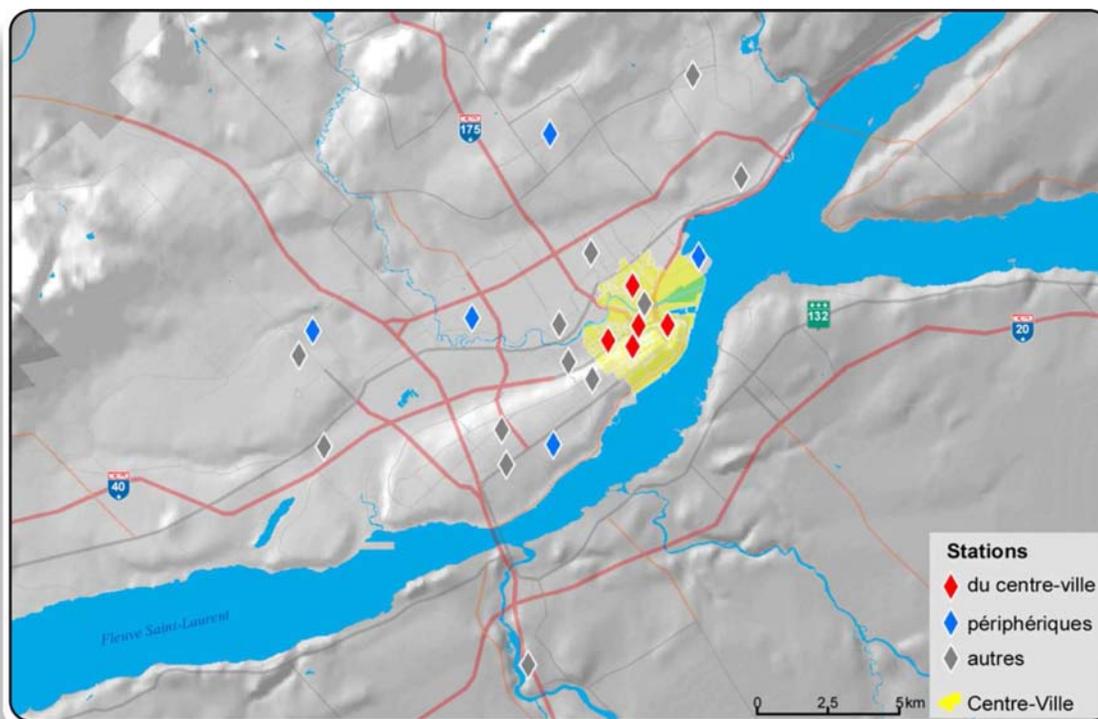


Figure 11 : Localisation des cinq stations les plus chaudes (du centre-ville) et les plus froides (périphériques).

5.2 Variables temporelles

La figure 12 montre la relation entre les dT de nuit et la température quotidienne minimale mesurée à la station de référence pour le groupe des stations chaudes et le groupe des stations froides durant toute la période de mesure. Les journées avec précipitation (précipitation cumulée des quatre stations permanentes supérieure à 5 millimètres) ont été exclues puisque les différences de température sont atténuées lorsque les surfaces sont mouillées. Tant aux stations chaudes qu'aux stations froides, les dT de nuit tendent à augmenter avec une diminution de la température quotidienne minimale observée à la station de référence. Le chauffage des bâtiments et le refroidissement radiatif supérieur d'un milieu rural ouvert, comme à la station de référence, expliqueraient ces résultats.

Il est à noter que, pour des températures quotidiennes minimales supérieures à 5 °C, c'est-à-dire principalement des conditions estivales, la variabilité des dT est considérable, ce qui laisse penser que d'autres paramètres météorologiques peuvent aider à expliquer la variabilité temporelle des dT en conditions estivales.

Le brassage de l'air entraîne son homogénéisation sur un territoire, ce qui amenuise les différences de température de l'air. Par ailleurs, la présence de nuages réduit la capacité de refroidissement radiatif de toute surface terrestre en conditions nocturnes. En effet, la base des nuages est plus chaude que l'atmosphère, ce qui diminue le gradient de température entre la surface et le ciel « vu » par cette dernière. La figure 13 montre la relation entre la dT de nuit et la vitesse du vent mesurée à la station de référence, stratifiée par classes d'ennuagement, pour les périodes estivales 2011 et 2012. La vitesse du vent et l'ennuagement à 4 h HNE ont été utilisés puisque la température quotidienne minimale est généralement observée à cette heure. Comme on pouvait s'y attendre, les dT diminuent avec une augmentation de la vitesse du vent et avec l'ennuagement. Il est à noter qu'en conditions dégagées, une vitesse du vent supérieure à 15 km/h et à 30 km/h est nécessaire pour annuler les différences de température ($dT = 0\text{ °C}$) aux stations froides et chaudes, respectivement. En conditions ennuagées, ces seuils passent respectivement à 25 et 40 km/h.

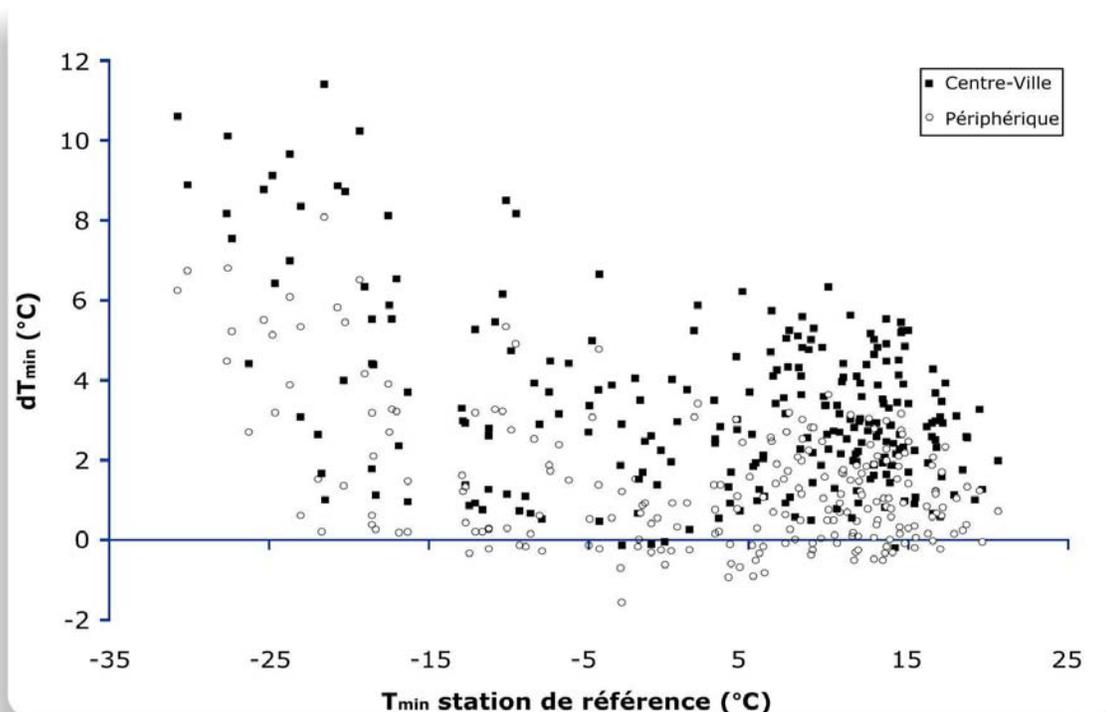


Figure 12 : Différences de température quotidienne minimale (dT_{min}) aux cinq stations chaudes et froides en fonction de la température quotidienne minimale (T_{min}) observée à la station de référence durant toute la période de mesure

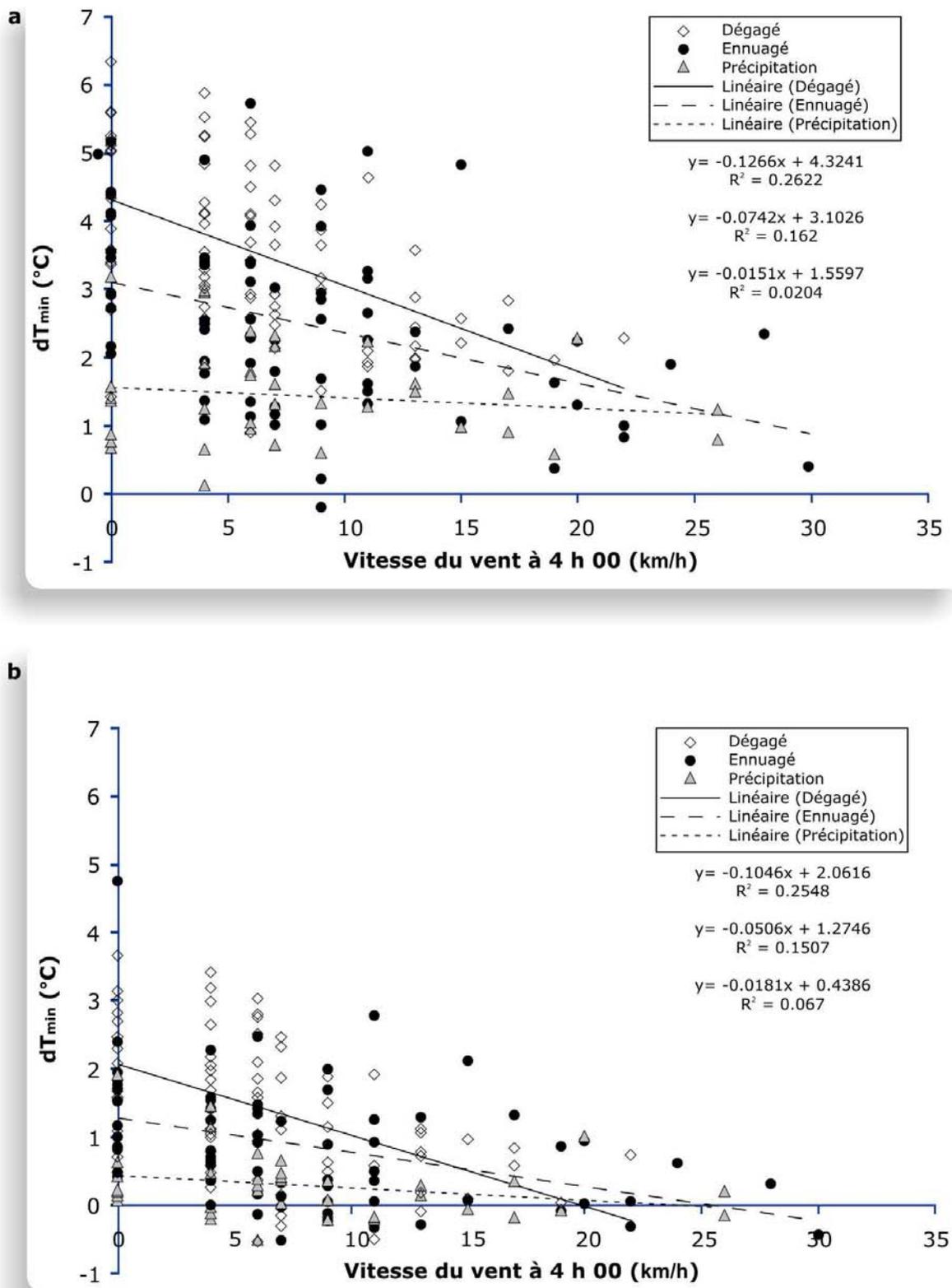


Figure 13 : Différences de température quotidienne minimale (dT_{min}) au centre-ville (A) et en périphérie (B) en fonction de la vitesse du vent à 4 h HNE observée à la station de référence au cours des périodes estivales 2011 et 2012

Ces résultats contribuent à expliquer les différences de température observées la nuit et sont résumés dans le tableau 2. Ce tableau permet d'apprécier rapidement l'étendue des différences de température quotidienne minimale attendues en général à Québec en fonction des conditions de vent et d'ennuagement et du caractère central ou périphérique d'un quartier.

Tableau 2 : Synthèse des différences de température quotidienne minimale (dT_{\min}) en fonction des classes de vent et d'ennuagement en conditions estivales. Le nombre de jours mesurés (n) par classe est également présenté.

Vent (km/h)	Ennuagement	dT_{\min} (°C)		n
		Centre-ville	Périphérie	
0-10	Dégagé	3,8	1,6	61
	Ennuagé	2,7	1,0	50
	Précipitation	1,5	0,4	26
10-20	Dégagé	2,5	0,5	15
	Ennuagé	2,4	0,8	15
	Précipitation	1,3	0,0	8
20-30	Dégagé	2,3	0,7	1
	Ennuagé	1,6	0,3	6
	Précipitation	1,4	0,3	3
> 30	Ennuagé	1,1	-0,1	2

En ce qui concerne les différences de température quotidienne maximale, les relations avec les paramètres météorologiques sont moins évidentes puisque les dT sont moins variables de jour que de nuit. Néanmoins, deux paramètres ont été retenus.

La relation entre les dT_{\max} et la température quotidienne maximale mesurée à la station de référence au cours des deux périodes estivales, en conditions ennuagées (sans précipitation), est présentée à la figure 14. Cette relation montre que les dT de jour ont tendance à augmenter avec la température maximale à la station de référence lorsque le ciel est couvert. Toutefois, cette relation est relativement faible ($R^2 < 0,05$) et les pentes des droites de régression sont près de zéro. En ce qui concerne les conditions ensoleillées ou avec précipitation, la relation entre les dT de jour et la température maximale mesurée à la station de référence n'est pas significative (résultats non montrés).

Le jour, la présence de nuages diminue les quantités de radiations solaires qui atteignent les surfaces. Cela laisse moins d'énergie disponible pour réchauffer les surfaces, ce qui contribue à amoindrir les différences de température entre un milieu urbain et un milieu rural voisin. Le tableau 3 présente les moyennes par classe d'ennuagement et par sous-classe de température pour les conditions ennuagées afin de refléter la relation avec la T_{\max} décrite plus haut. L'ennuagement à 15 h HNE a été utilisé puisque la température quotidienne maximale est généralement observée à cette heure. Ce sommaire montre que la dT de jour est supérieure en conditions ensoleillées, qu'elle est intermédiaire en conditions ennuagées, où elle diminue avec la température quotidienne maximale, et qu'elle est inférieure en conditions de précipitation. Il est à noter que des dT de jour supérieures à 1 °C représentent la norme au centre-ville.

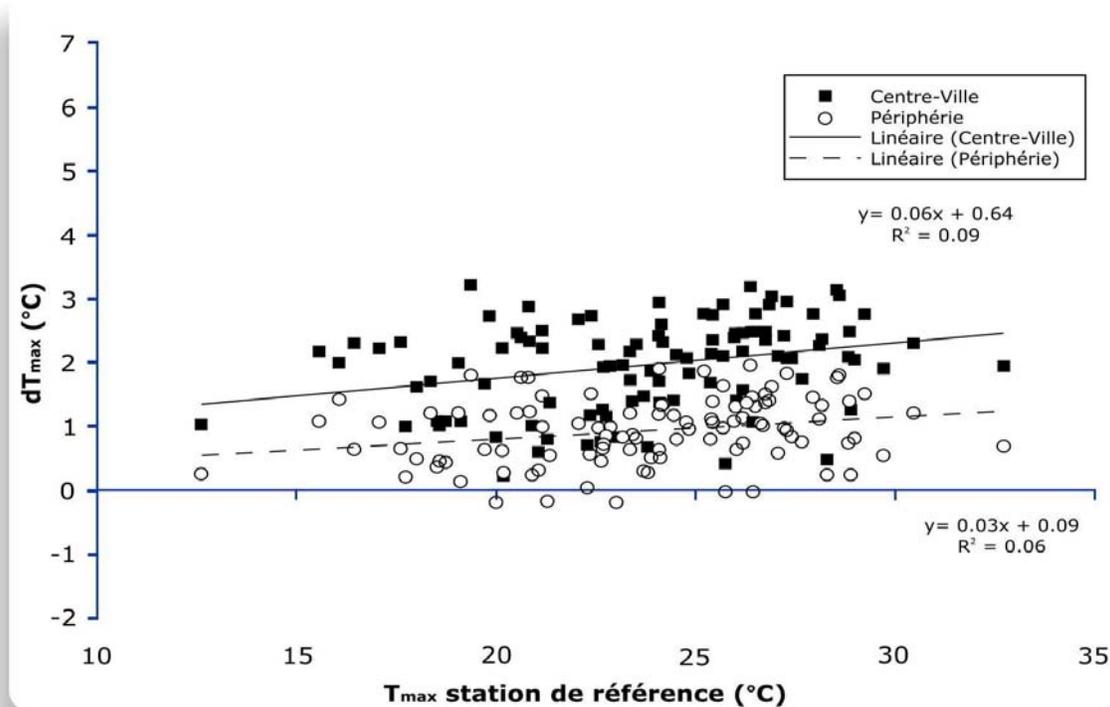


Figure 14 : Différences de température quotidienne maximale (dT_{\max}) en fonction de la température quotidienne maximale (T_{\max}) observée à la station de référence au cours des périodes estivales en conditions ennuagées au centre-ville et en périphérie

Tableau 3 : Synthèse des différences de température quotidienne maximale (dT_{\max}) en fonction des classes de température quotidienne maximale (T_{\max}) et d'ennuagement en conditions estivales. Le nombre de jours de données (n) par classe est également présenté. Les moyennes suivies d'une lettre différente, pour le centre-ville et la périphérie séparément, sont significativement différentes.

Ennuagement	T_{\max} (°C)	dT_{\max} (°C)		n
		Centre-ville	Périphérie	
Dégagé	Toutes	2,3a	1,2a	66
Ennuagé	Toutes	2,0b	0,9b	103
	> 26	2,3	1,1	35
	22-26	1,9	0,9	30
	< 22	1,7	0,8	38
Précipitation	Toutes	1,7c	0,8b	19

5.3 Variables spatiales

Pour expliquer la variabilité des températures entre les stations, les médianes des dT de l'été 2011 et de l'été 2012 ont été mises en relation, selon une régression pas à pas (seuils d'entrée et de sortie = 0,15). Pour ce faire, les proportions de surface naturelle (λ_n) et pavée (λ_p) issues de la CUTUC, l'altitude (alt), la latitude (lat) et la longitude (long) projetées (projection conique conforme de Lambert) de chaque point de mesure ont été considérées. Les proportions de couverts de surface dans des zones tampons de 500 mètres de rayon autour des stations fixes ont été utilisées. Les modèles finaux retenus sont les suivants ($n = 22$) :

$$dT_{\min} = 721,543 - 3,014 \lambda_n + 6,769 \text{ long} - 5,044 \text{ lat} - 0,005 \text{ alt}$$

$$dT_{\max} = 5,630 - 0,012 \text{ alt} - 4,578 \lambda_n - 4,614 \lambda_p$$

Les modèles expliquent respectivement 88 et 82 % de la variabilité de dT_{\min} et dT_{\max} entre les stations au cours des périodes estivales 2011 et 2012. Tant les différences de température quotidienne minimale que les différences de température quotidienne maximale diminuent en fonction de la proportion de surface naturelle et de l'altitude. La variabilité de dT_{\min} est principalement attribuable à la proportion de surface naturelle (R^2 partiel = 0,65) et, secondairement, à la position géographique et à l'altitude. Quant à la dT_{\max} , la majeure partie de sa variabilité s'explique par l'altitude et par la proportion de surface naturelle (R^2 partiels combinés = 0,76). Les surfaces naturelles correspondent principalement à des surfaces végétales, ce qui laisse croire que la végétation a un effet prédominant sur la variabilité spatiale de la température de l'air dans la ville de Québec et, possiblement, sur un territoire urbain en général. Toutefois, plusieurs classes de surfaces naturelles de la CUTUC sont estimées empiriquement ou arbitrairement, ce qui constitue une limite de cette classification (Leroux et coll. 2009). Quant à l'altitude, sa relation avec la température de l'air est bien connue lors des périodes relativement longues. Cette relation ne s'appliquerait pas nécessairement à des mesures quotidiennes en raison de la variabilité des conditions météorologiques d'une journée à l'autre qui pourrait dominer l'effet de l'altitude.

5.4 Dépassements de seuils

Au cours des dernières années, plusieurs villes canadiennes ont élaboré des plans d'action en cas de chaleur accablante de façon à prévenir la surmortalité et la morbidité dans les populations vulnérables. La Ville de Québec a également produit son plan d'action dont le déclenchement dépend de l'atteinte de certains seuils météorologiques. En l'occurrence, le plan d'action en cas de chaleur accablante est déclenché lorsque les températures quotidiennes minimale et maximale dépassent respectivement 16 et 31 °C et que l'indice humidex dépasse 37, et ce, trois jours consécutifs. La Ville utilise les paramètres météorologiques mesurés à la station Québec/Jean-Lesage Intl, qui est la station de référence de la présente étude. Pour vérifier si les seuils sont dépassés plus souvent dans les secteurs de la ville où un effet d'îlot de chaleur urbain considérable est attendu (p. ex. au centre-ville), le nombre de dépassements de seuil, sans égard au critère des trois jours consécutifs, a été compté et est présenté aux figures 15 à 20. L'indice humidex a été calculé à partir des mesures de température et d'humidité de l'air (Masterton et Richardson 1979).

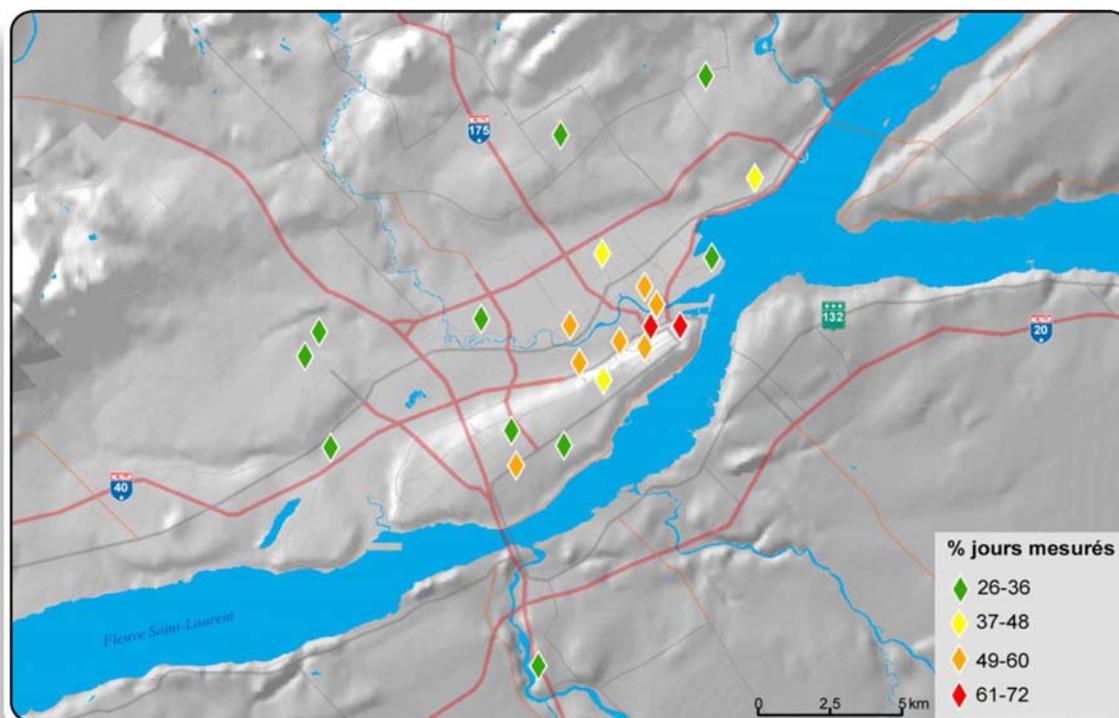


Figure 15 : Dépassement du seuil de température minimale au cours de la période allant du 27 juin au 15 septembre 2011

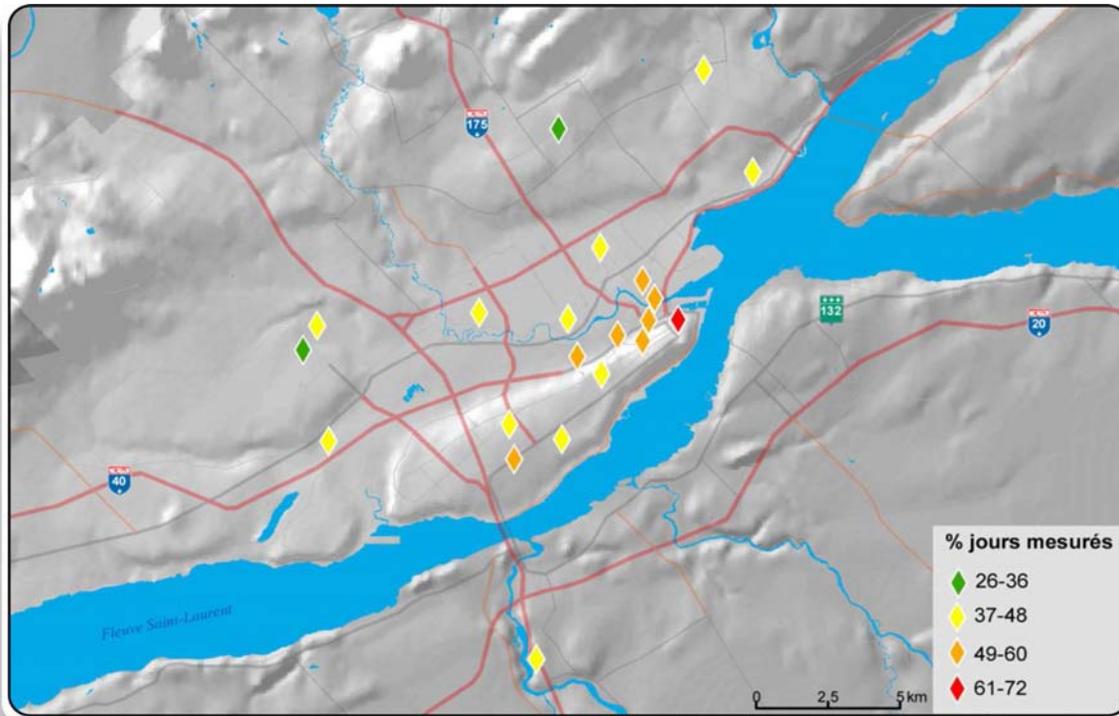


Figure 16 : Dépassement du seuil de température minimale au cours de la période allant du 1^{er} juin au 15 septembre 2012

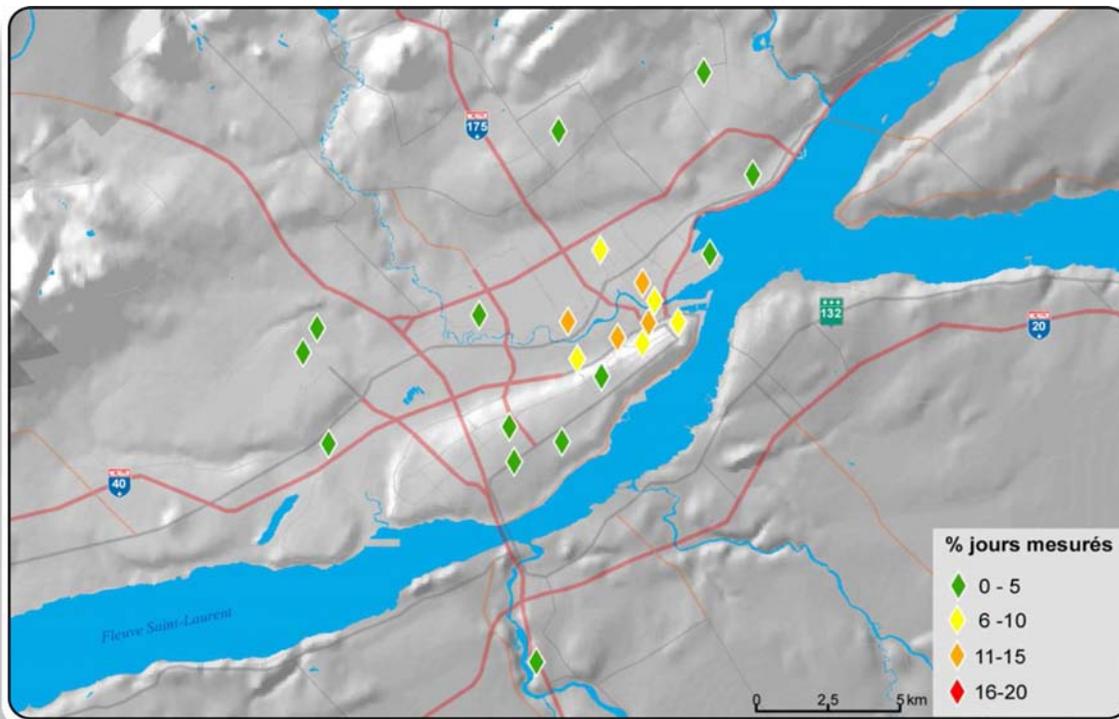


Figure 17 : Dépassement du seuil de température maximale au cours de la période allant du 27 juin au 15 septembre 2011

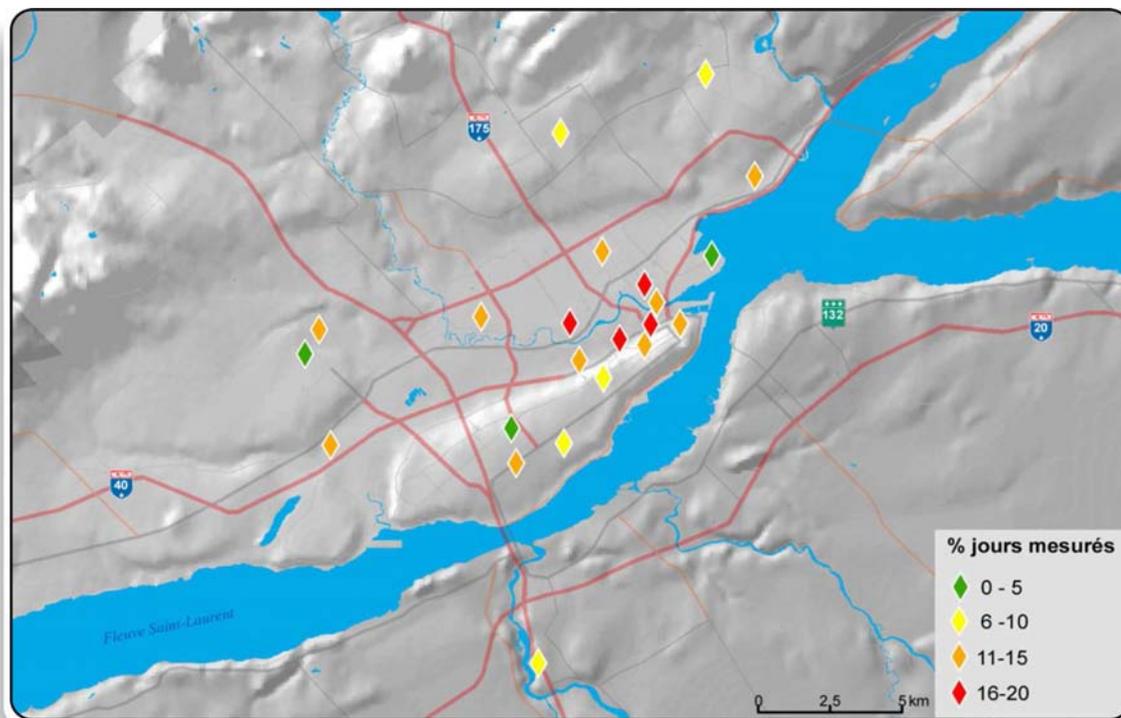


Figure 18 : Dépassement du seuil de température maximale au cours de la période allant du 1^{er} juin au 15 septembre 2012

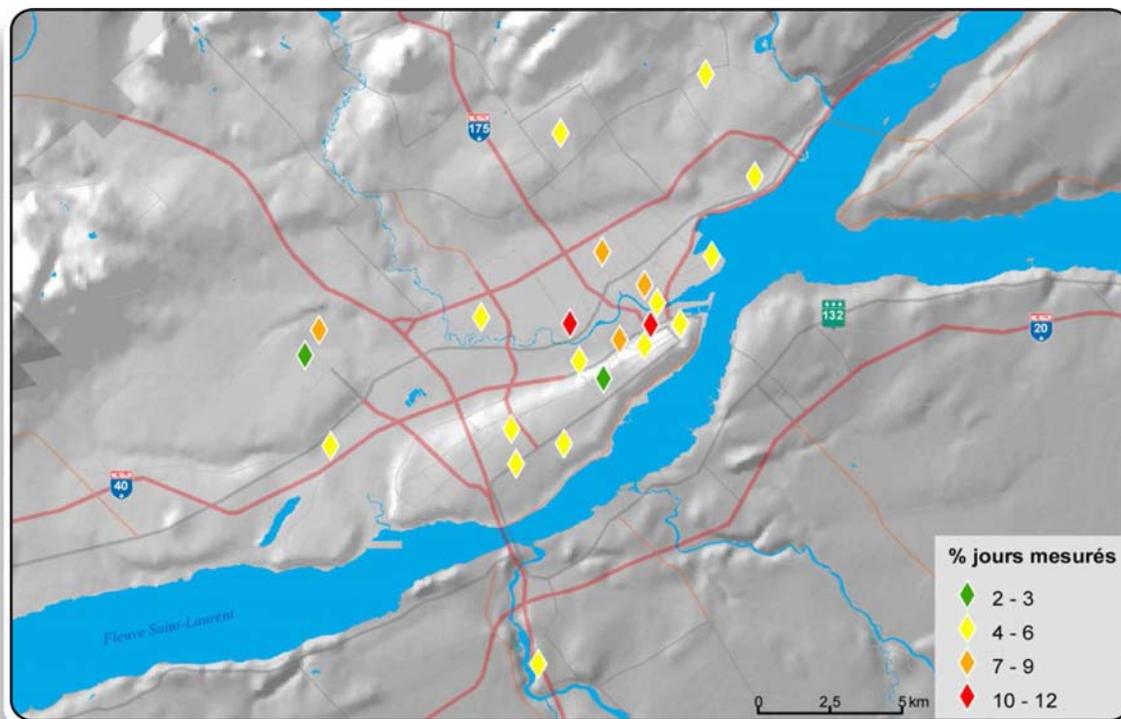


Figure 19 : Dépassement du seuil d'humidex au cours de la période allant du 27 juin au 15 septembre 2011

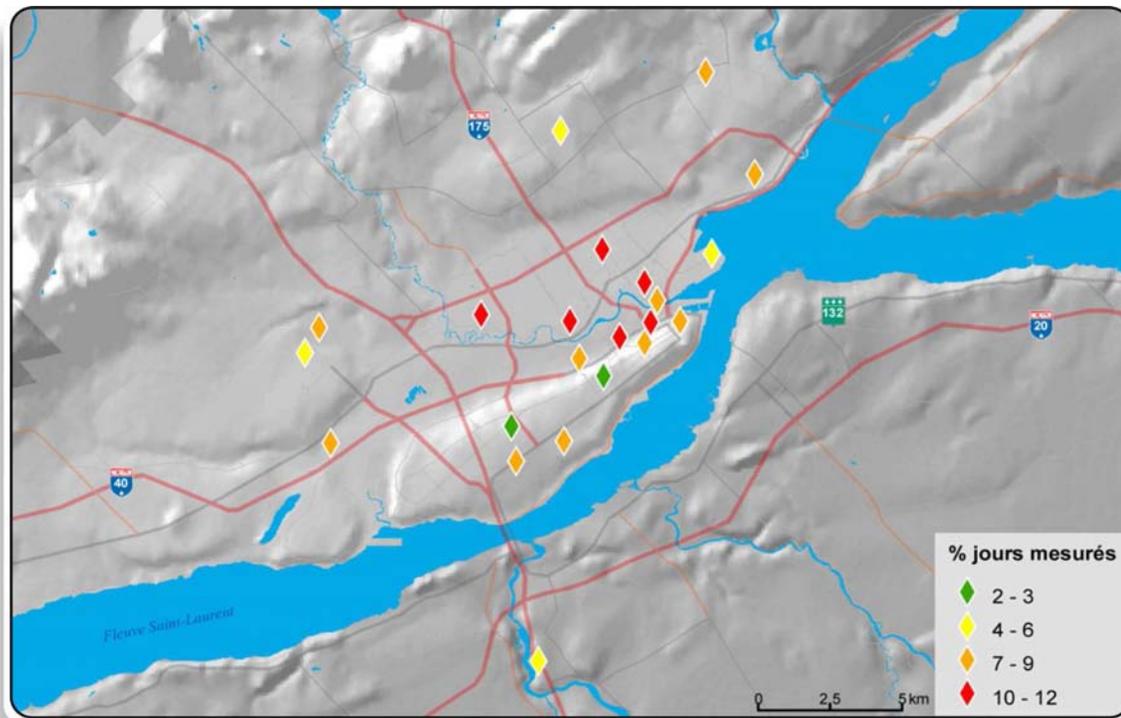


Figure 20 : Dépassement du seuil d'humidex au cours de la période allant du 1^{er} juin au 15 septembre 2012

Les dépassements du seuil de température minimale surviennent jusqu'à deux fois plus souvent dans le centre-ville que dans les quartiers périphériques (figures 15 et 16). Au cours des deux étés à l'étude, la station de référence enregistre les dépassements de seuil les moins fréquents. Il est à noter que les dépassements du seuil de température minimale surviennent de 26 à 68 % du temps sur le territoire de la ville de Québec, tandis que les conditions qui se rapprochent d'une période de chaleur accablante sont limitées à quelques jours. Cela permet de croire que le critère de température quotidienne minimale seul est peu efficace quand vient le temps de décider de déclencher le plan d'action en cas de chaleur accablante.

Les dépassements du seuil de température maximale sont beaucoup moins fréquents, se limitant à moins de 17 % du temps (figures 17 et 18). À la station de référence, très peu de dépassements du seuil sont détectés, c'est-à-dire 1 et 2 % du temps respectivement à l'été 2011 et à l'été 2012. Dans le centre-ville, les dépassements du seuil ont été observés plus de 6 et 10 % du temps respectivement à l'été 2011 et à l'été 2012. Les quartiers qui enregistrent les dépassements du seuil les plus fréquents sont Saint-Roch, Saint-Sauveur et Limoilou, trois quartiers fortement urbanisés situés dans la Basse-Ville.

Le seuil d'humidex a été dépassé respectivement 2 et 5 % du temps à la station de référence à l'été 2011 et à l'été 2012, tandis qu'il a été dépassé plus de 10 % du temps dans certains quartiers plus urbanisés (figures 19 et 20). À la différence des dépassements des seuils de température minimale et maximale qui sont cohérents avec le gradient d'urbanisation du centre-ville vers la périphérie, les dépassements du seuil d'humidex suivent un patron légèrement différent avec des dépassements de seuil fréquents dans les quartiers mitoyens, comme Vanier, Lairet et Duberger. Dans ces quartiers, la présence accrue de végétation, par rapport au centre-ville, permet la transpiration de l'eau du sol dans l'atmosphère, ce qui induit une hausse de l'humidité de l'air. Ce phénomène, combiné à un effet d'îlot de chaleur dû au caractère urbain de ces quartiers, provoquerait une température ressentie égale, voire supérieure à celle ressentie au centre-ville, où l'effet d'îlot de chaleur urbain est maximal, mais où la végétation est peu présente.

5.5 Conditions marginales de chaleur accablante

Environnement Canada diffuse des messages d'avertissement public relativement à plusieurs phénomènes dangereux de nature météorologique, dont la chaleur accablante. Pour ce faire, les prévisionnistes utilisent les sorties de modèles numériques afin d'évaluer le dépassement possible des seuils établis, l'indice humidex et la température de l'air dans le cas de la chaleur accablante. Toutefois, à cause de la résolution insuffisante des modèles et de l'absence de représentation adéquate du milieu urbain, ces sorties de modèles ne tiennent pas compte de l'altération du climat causée, à l'échelle locale, par la présence d'un milieu urbain. De plus, les observations qui servent à caler le modèle de prévision ne proviennent pas de milieux fortement urbanisés, lesquels sont particulièrement exposés aux chaleurs accablantes. Ainsi, dans des conditions marginales, c'est-à-dire près des seuils, il devient difficile d'évaluer si le dépassement de seuils est possible dans les quartiers les plus urbanisés d'une ville.

Afin de soutenir la prise de décision dans les conditions marginales, les températures minimale et maximale et l'indice humidex dans les quartiers échantillonnés ont été caractérisés dans des conditions marginales mesurées à la station de référence. Les seuils utilisés dans le plan d'action en cas de chaleur accablante de la Ville de Québec ont été appliqués pour cette analyse. Les conditions marginales ont été définies comme la plage de température (humidex) comprise entre trois degrés sous le seuil et le seuil lui-même. Les résultats, sous forme de diagrammes en boîte, sont présentés dans les figures 21 à 23.

Tant pour les températures quotidiennes minimale et maximale que pour l'humidex quotidien maximal, les quartiers Saint-Roch et Saint-Sauveur connaissent des conditions supérieures aux seuils 75 % du temps (1^{er} quartile > seuil) en conditions marginales à la station de référence. Quant aux stations Vieux-Québec, Limoilou-2 et Vanier, les conditions y sont supérieures au seuil au moins 50 % du temps (médiane > seuil). Il est à noter qu'à la station Vanier, l'indice humidex est supérieur au seuil plus de 75 % du temps en conditions marginales à la station de référence. Aux autres stations, la proportion est inférieure à 50 % pour la T_{\min} , la T_{\max} ou l'indice humidex. Ces résultats indiquent que dans des conditions légèrement inférieures aux seuils à la station de référence, il est fort probable que les seuils soient excédés dans les quartiers Saint-Roch, Saint-Sauveur, Vieux-Québec, Limoilou et Vanier. L'inverse est vrai pour les cinq stations permanentes, outre la station de référence, et pour les quartiers périphériques.

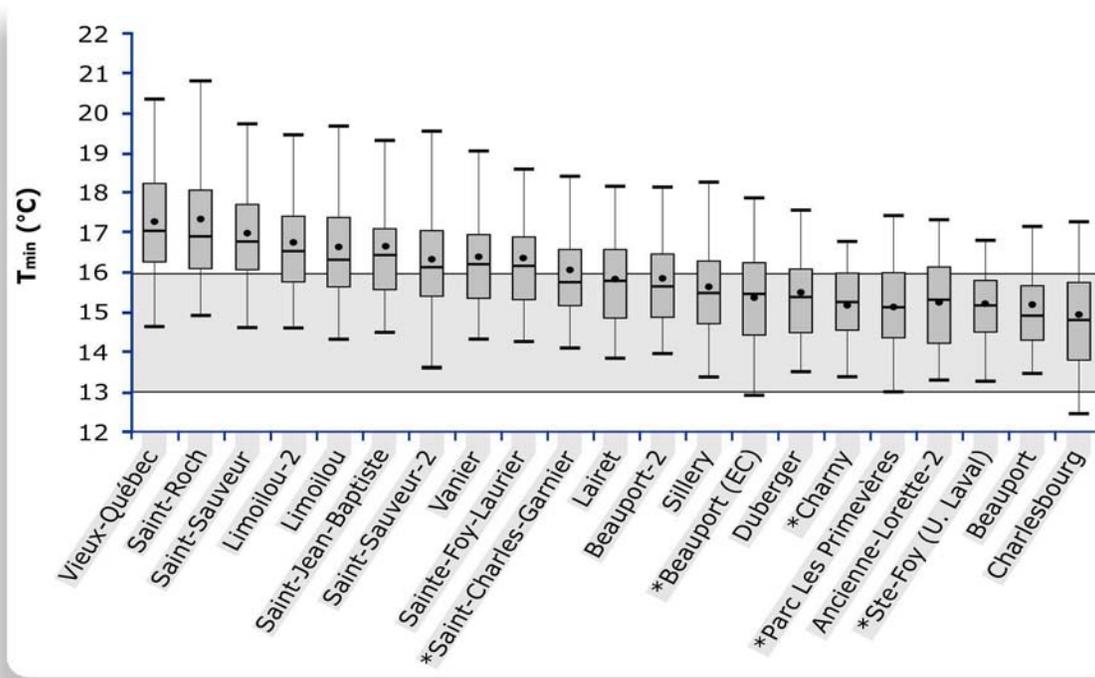


Figure 21 : Température minimale quotidienne (T_{\min}) en conditions marginales (zone ombragée) à la station de référence (n = 69)

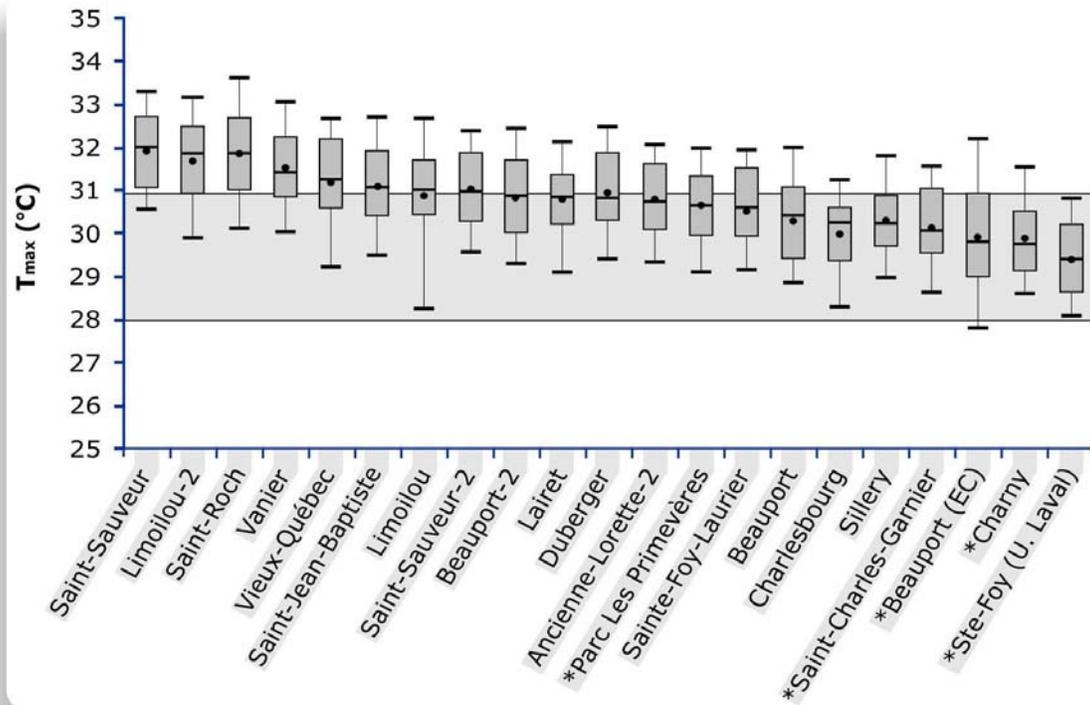


Figure 22 : Température maximale quotidienne (T_{max}) en conditions marginales (zone ombragée) à la station de référence (n = 35)

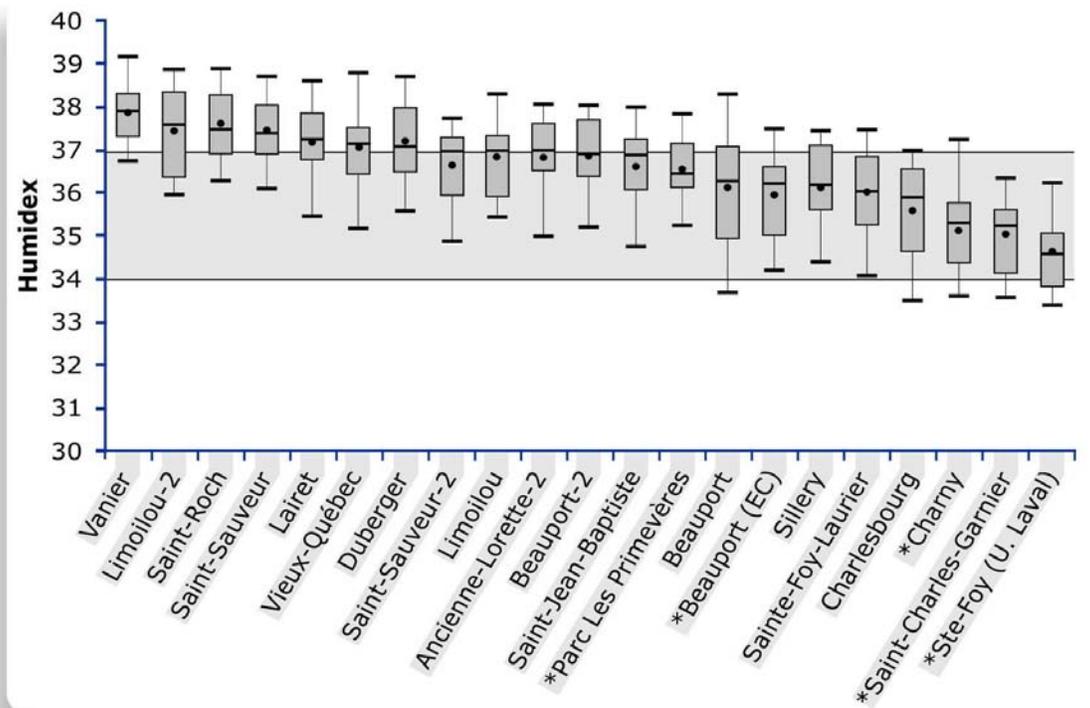


Figure 23 : Humidex maximal quotidien en conditions marginales (zone ombragée) à la station de référence (n = 17)

5.6 Cycles gel-dégel

Les cycles gel-dégel ont une incidence sur les infrastructures et sont généralement pris en compte lors de la conception d'un nouvel ouvrage ou de la réfection d'une infrastructure existante. Les cycles gel-dégel peuvent également affecter la planification des travaux publics comme le déneigement et le déglacage des rues. Or, la variabilité du climat local en milieu urbain peut influencer l'occurrence des cycles gel-dégel d'un quartier à l'autre dans une ville. Ainsi, pour la période du 1^{er} octobre 2011 au 20 mars 2012, le nombre de cycles gel-dégel a été recensé à chaque station en comptant le nombre de jours où les températures quotidiennes minimale et maximale ont été respectivement inférieures et supérieures à 0 °C. Les résultats sont rapportés comme la proportion du nombre de cycles gel-dégel sur le nombre total de jours mesurés (figure 24).

De façon générale, le nombre de cycles gel-dégel est inférieur au centre-ville qu'en périphérie, avec une diminution qui peut atteindre 10 % du nombre de jours mesurés. Outre la station Beauport (EC), qui est située près du fleuve, le nombre de cycles gel-dégel le plus élevé a été observé à l'ouest de la ville. Ces occurrences plus fréquentes sont généralement dues à un nombre plus élevé de journées où la température minimale est inférieure à zéro, ce qui est cohérent avec l'idée que les milieux moins urbanisés permettent un refroidissement radiatif plus prononcé.

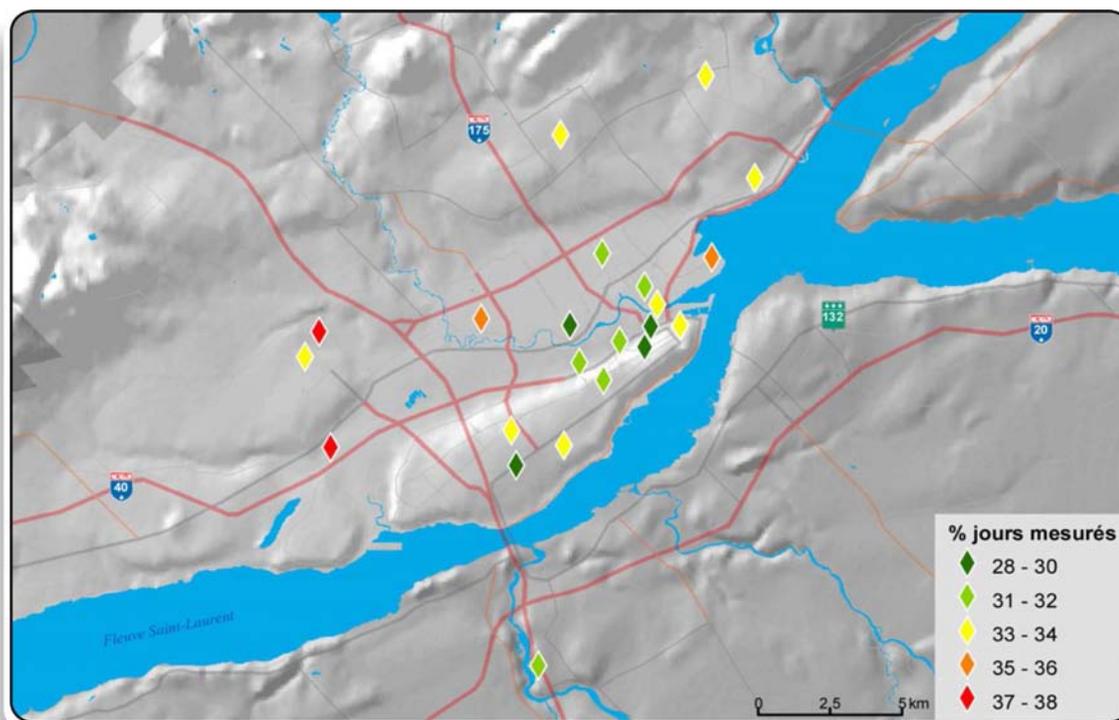


Figure 24 : Nombre de cycles gel-dégel au cours de la période allant du 1^{er} octobre 2011 au 20 mars 2012

5.7 Cartographie de l'échantillonnage mobile

L'échantillonnage mobile a permis de cibler des journées particulièrement chaudes au cours des étés 2011 et 2012 afin de caractériser finement la variabilité spatiale de la température de l'air sur le territoire de la ville de Québec. Deux exemples de dT, un de jour (16 juillet 2011 à 14 h HNE) et un de soir (11 juillet 2012 à 23 h HNE), sont présentés aux figures 25 et 26.

L'échantillonnage de jour du 16 juillet 2011 montre une variabilité spatiale de la température de l'air limitée à un maximum de 3 °C. Les secteurs au sud de l'autoroute de la Capitale sont 1 à 2 °C plus

chauds que la station de référence, avec quelques points plus chauds près du centre-ville dans l'arrondissement La Cité-Limoilou et des secteurs plus froids dans les secteurs boisés et près du fleuve de l'arrondissement Sainte-Foy-Sillery-Cap-Rouge. Ces résultats sont cohérents avec les mesures fixes continues prises à l'été 2011 (figure 8).

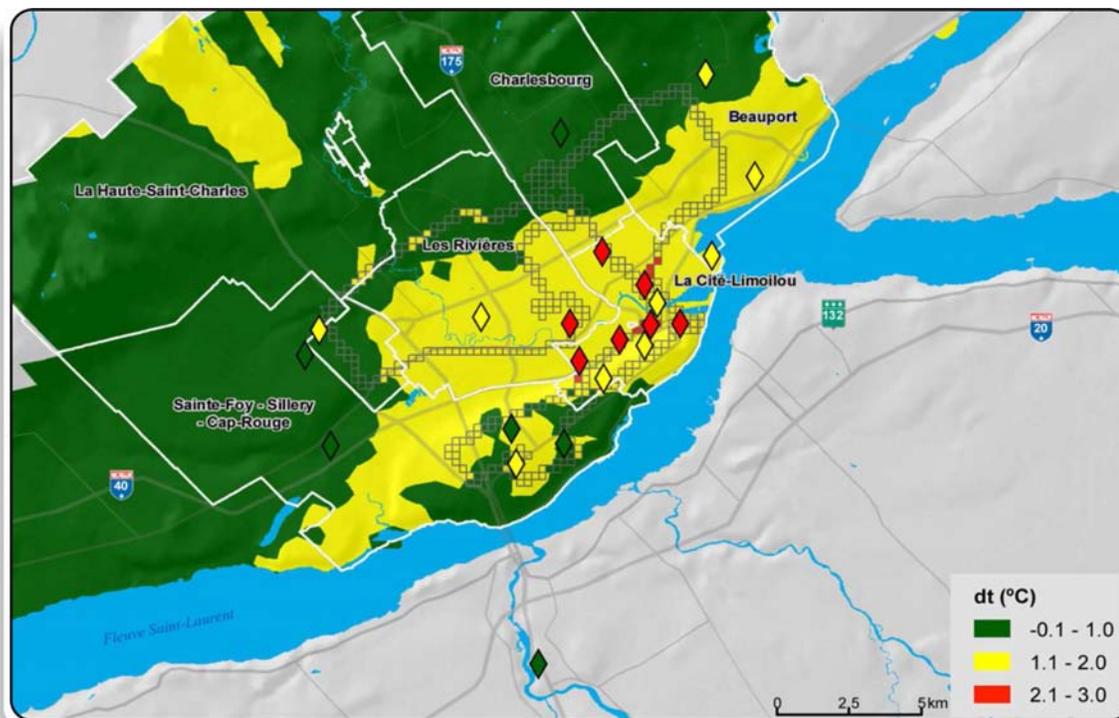


Figure 25 : Différences de température avec la station de référence (dT) le 16 juillet 2011 à 14 h HNE pour l'échantillonnage mobile et les stations fixes. La température moyenne à cette heure à la station de référence est de 28,4 °C.

L'échantillonnage effectué le soir du 11 juillet 2012 montre des dT atteignant jusqu'à 9 °C dans les quartiers Saint-Roch et Vieux-Québec de l'arrondissement La Cité-Limoilou. L'ensemble de l'arrondissement La Cité-Limoilou et la partie est de l'arrondissement Sainte-Foy-Sillery-Cap-Rouge montrent des températures au moins 6 °C supérieures aux conditions mesurées à la station de référence (figure 26). La différence de température varie de 4 à 6 °C dans la majeure partie des arrondissements Charlesbourg et Beauport. Dans l'arrondissement Les Rivières, la différence de température varie de 2 à 6 °C d'ouest en est.

Malgré certaines contraintes de la méthode d'échantillonnage liées aux ressources humaines à déployer, au temps alloué à l'échantillonnage et à la normalisation des données à l'heure ciblée, les résultats de l'échantillonnage mobile ponctuel peuvent être utiles pour circonscrire avec précision les secteurs d'intérêt pour la surveillance climatologique en milieu urbain. Ainsi, la partie centrale de l'arrondissement La Cité-Limoilou est particulièrement exposée à des conditions de température de l'air ambiant supérieures aux conditions régionales mesurées à la station de référence. Une analyse de la vulnérabilité socioéconomique de la ville de Québec combinant les indices de défavorisation matérielle et sociale (Pampalon et Raymond 2003), la proportion de personnes âgées de 65 ans ou plus et la densité de la population a permis de retenir le quartier Saint-Sauveur pour l'installation d'une station météorologique compacte permanente (résultats non montrés).

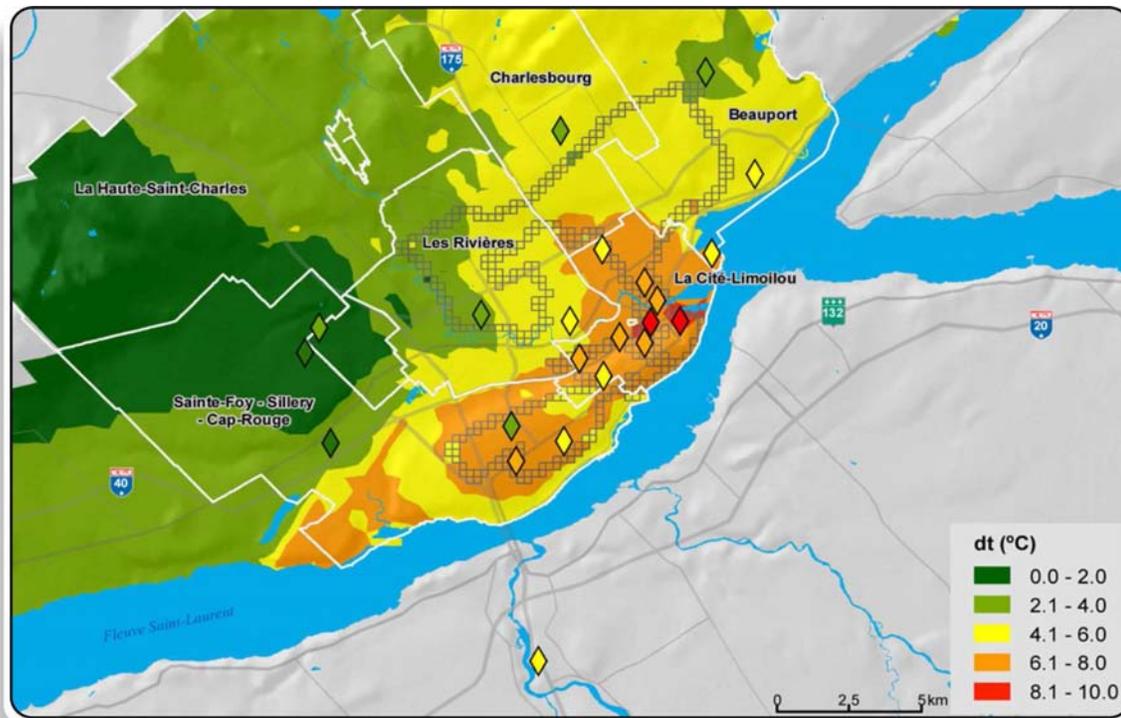


Figure 26 : Différences de température avec la station de référence (dT) le 11 juillet 2012 à 23 h HNE pour l'échantillonnage mobile et les stations fixes. La température moyenne à cette heure à la station de référence est de 16,5 °C.

5.8 Comparaison des températures de l'air et de surface

L'Institut national de santé publique du Québec (INSPQ) a produit une première version d'une carte des îlots de chaleur dans le Québec urbain (Kestens et coll. 2011). Cette carte a été mise à jour par le Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy (Bouffroy et coll. 2012b), qui l'a bonifiée en étendant sa couverture spatiale et en améliorant sa résolution. Cette dernière carte regroupe cinq classes de température de surface relative (T_{sfc}) à une résolution spatiale de 20 mètres (figure 27). Elle présente l'avantage de permettre de déterminer les secteurs susceptibles de générer des îlots de chaleur ou de fraîcheur, et ce, parmi l'ensemble des villes du Québec. Cette information est fort utile, entre autres, pour prioriser des secteurs d'intervention (Bouffroy et coll. 2012a). Ainsi, les classes de T_{sfc} représentent le potentiel de création d'îlots de chaleur ou de fraîcheur des surfaces urbaines.

Toutefois, les T_{sfc} estimées ne représentent qu'indirectement la température de l'air ambiant à laquelle la population est exposée. Par exemple, le mouvement horizontal de l'air (advection) et la concentration de secteurs fortement urbanisés affectent l'intensité de l'effet d'îlot de chaleur tel que défini en fonction de la température de l'air ambiant. De plus, les T_{sfc} estimées correspondent en partie à des toits, des surfaces qui sont à l'extérieur du canyon urbain (c'est-à-dire l'espace compris entre deux rangées de bâtiments de part et d'autre d'une rue, d'une ruelle ou de cours arrière) et qui n'influencent que partiellement la température de l'air dans le canyon urbain, surtout dans les milieux où les bâtiments sont relativement hauts et rapprochés. Par ailleurs, la présence de grands arbres peut masquer le caractère urbain de la surface qui se trouve en dessous et qui n'est pas détectée par une image prise à vol d'oiseau.

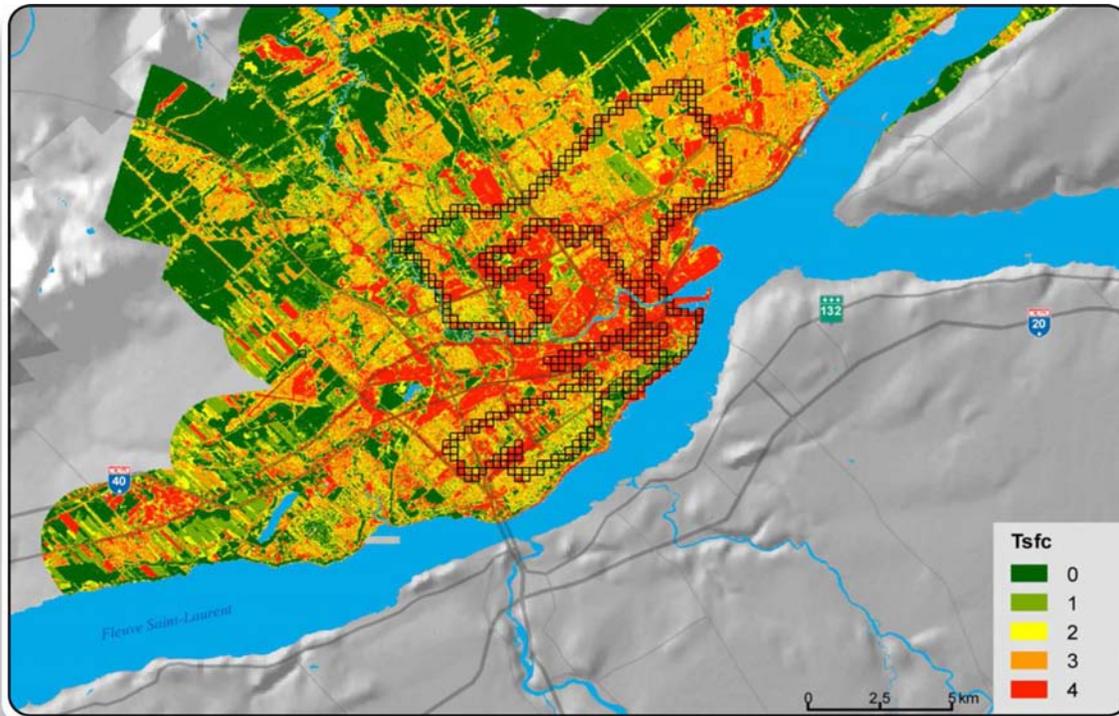


Figure 27 : Cartographie des classes de température de surface (T_{sfc}) de l'INSPQ et parcours de l'échantillonnage mobile du 11 juillet 2012 23 h HNE

Afin de vérifier la correspondance entre les T_{sfc} et la température de l'air réelle, les classes de T_{sfc} ont été agrégées à une résolution de 250 mètres et comparées aux dT mesurées sur le parcours de l'échantillonnage mobile effectué le 11 juillet 2012 à 23 h HNE (figure 28). De façon générale, les T_{sfc} suivent la même tendance que les dT (coefficient de corrélation de Spearman de 0,41) malgré que le nuage de points soit relativement dispersé. Par exemple, certains points s'éloignent passablement de la droite de régression pour des dT autour de 6 °C et des T_{sfc} inférieures à 2,5. Ainsi, les classes de température de surface représentent, dans une certaine mesure, la température de l'air réelle, mais le contexte des secteurs d'intérêt doit être considéré lors de l'interprétation de la carte de l'INSPQ.

La figure 29 illustre les différences entre les T_{sfc} et les dT de l'échantillonnage mobile effectué le 11 juillet 2012 à 23 h HNE. Aux fins de cette comparaison, les dT ont été normalisées sur une échelle de 0 à 4 afin de correspondre aux classes de T_{sfc} , et trois classes ont été définies ($dT < T_{sfc}$ correspondant à $dT - T_{sfc} \leq -1$, $dT = T_{sfc}$ à $-1 < dT - T_{sfc} \leq 1$ et $dT > T_{sfc}$ à $dT - T_{sfc} > 1$). Des différences notables existent entre les températures de surface estimées et la température de l'air ambiant mesurée et interpolée. Certains secteurs bordant le fleuve (dont les plaines d'Abraham) sont plus chauds que ce que laisseraient croire les températures de surface. Ces secteurs sont relativement végétalisés (faibles T_{sfc}) mais soumis à un effet d'îlot de chaleur important étant donné l'urbanisation des secteurs adjacents (fortes dT). À l'inverse, certains secteurs de part et d'autre de la rivière Saint-Charles et à l'ouest du domaine échantillonné (p. ex. à la station de référence) apparaissent comme des secteurs où la température de surface est élevée tandis que les mesures sur le terrain montrent des dT relativement faibles, et ce, même si les mesures de l'échantillonnage mobile sont systématiquement prises au-dessus de surfaces imperméables (rues). Ces secteurs correspondent à des zones résidentielles et industrielles. Dans les secteurs où les bâtiments sont principalement des résidences unifamiliales détachées (figure 30), les surfaces imperméables (toits et rues) semblent surreprésentées au détriment des surfaces végétales (pelouses), ce qui induit possiblement une surestimation des températures de surface. La présence de surfaces végétales, notamment les surfaces gazonnées, modifie significativement le bilan énergétique puisqu'elle permet de dissiper une partie du rayonnement solaire par évapotranspiration plutôt que par le réchauffement direct de l'air. Quant aux secteurs industriels, le modèle d'estimation de la température de surface semble montrer une surestimation systématique.

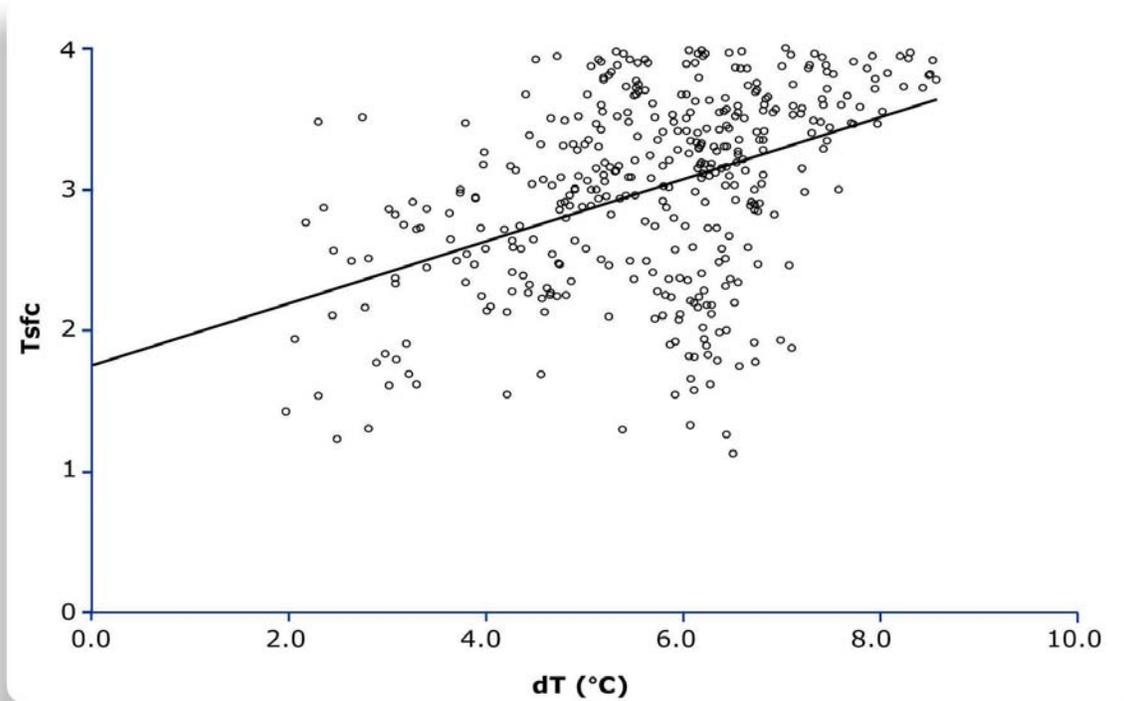


Figure 28 : Classes de température de surface relative (T_{sfc}) agrégées à 250 mètres en fonction des différences de température avec la station de référence (dT) mesurées le 11 juillet 2012 à 23 h HNE (n = 387)

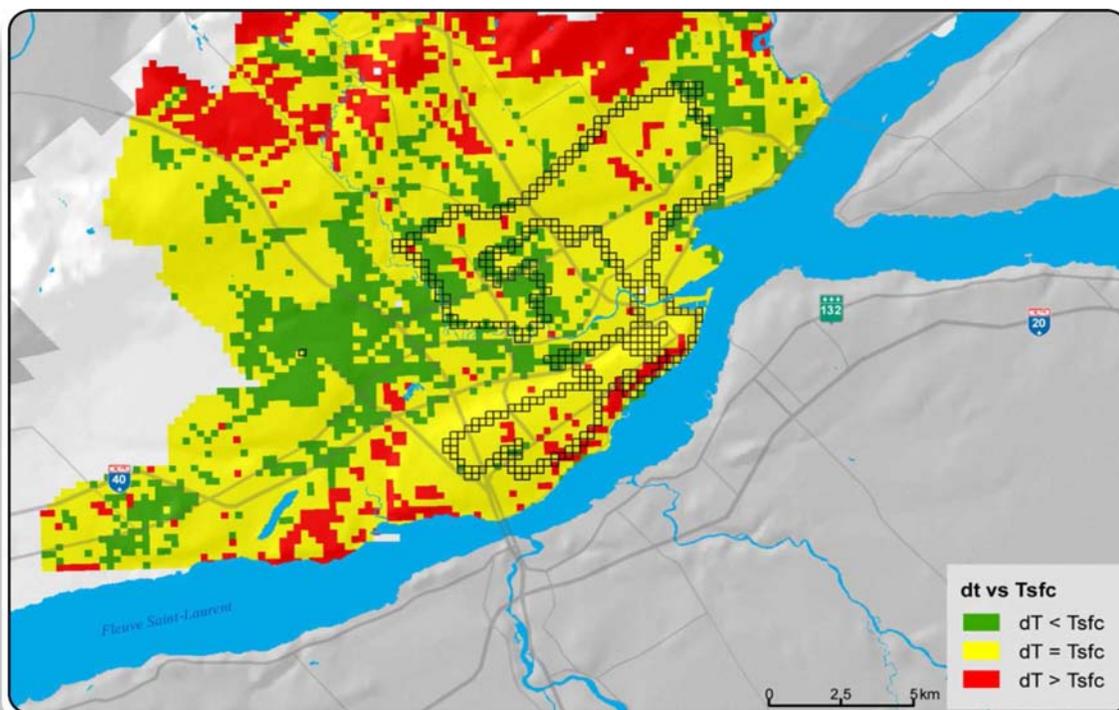


Figure 29 : Différence entre les classes de température de surface relative (T_{sfc}) agrégées à 250 mètres et les différences de température avec la station de référence (dT) mesurées le 11 juillet 2012 à 23 h HNE



Figure 30 : Classes de température de surface relatives (T_{sfc}) dans un secteur résidentiel de la municipalité de L'Ancienne-Lorette

Khaldoune et coll. (2013) ont montré que l'utilisation d'images à très haute résolution (p. ex. 2 m) permet de circonscrire une plus grande surface totale d'îlots de fraîcheur en raison d'une meilleure définition des contours de grands îlots et de la définition d'une grande quantité de petits îlots. De plus, ces auteurs ont utilisé des mesures de température de l'air ambiant, issues de la méthodologie présentée ici, afin de définir le modèle d'estimation de la température. Cette approche, basée sur la classification de l'occupation du sol, sur la présence de végétation à fine résolution et sur l'utilisation de mesure *in situ* de la température de l'air ambiant, pourrait aider à réduire les disparités entre les températures de surface et de l'air ambiant notées ici, ce qui améliorerait la représentation des conditions de l'air ambiant auxquelles est exposée la population.

6 CONCLUSION

La méthodologie de caractérisation de la variabilité de la température et de l'humidité de l'air ambiant élaborée par le MDDELCC permet de documenter avec précision la climatologie d'un milieu urbain en fonction des saisons, de conditions météorologiques spécifiques, de variables explicatives et d'autres conditions, au besoin. Cette méthodologie permet la cartographie fine de la température de l'air ambiant sur un territoire urbain et constitue donc un outil d'aide à la décision utile pour localiser les secteurs d'intervention en matière de lutte contre les îlots de chaleur urbains ou d'autres problématiques spécifiquement urbaines d'un point de vue météorologique ou climatologique. La cartographie issue de la méthodologie proposée peut également servir à soutenir l'interprétation d'outils existants tels que la cartographie des îlots de chaleur ou de fraîcheur produite par l'INSPQ. Cette méthodologie pourrait être appliquée à d'autres villes et à d'autres contextes, notamment l'étude de l'impact de mesures d'atténuation des îlots de chaleur urbains.

Les résultats de la campagne d'échantillonnage montrent que le centre-ville de Québec et le secteur de la Basse-Ville présentent des températures de l'air significativement plus élevées qu'à la station de l'aéroport de Québec (Québec/Jean-Lesage Intl). Dans le centre-ville en été, les différences de température peuvent atteindre 4 °C le jour, 6 °C la nuit et 9 °C le soir après le coucher du soleil. En hiver, des différences de température allant jusqu'à 12 °C ont été observées. Le couvert de surface naturelle

permet d'expliquer une bonne partie de la variabilité spatiale de la température de l'air sur un territoire urbain, tandis que les régimes de vent et d'enneigement aident à expliquer la variabilité dans le temps, principalement en conditions nocturnes.

Les seuils servant au déclenchement du plan d'action en cas de chaleur accablante sont dépassés de 2 à 11 fois plus souvent dans les secteurs du centre-ville qu'à la station météorologique de référence située à l'aéroport. En conditions marginales à la station de référence, c'est-à-dire lorsque les conditions sont légèrement sous les seuils, ces seuils sont dépassés 3 fois sur 4 dans les secteurs du centre-ville de la ville de Québec. Par ailleurs, les cycles gel-dégel sont observés moins souvent dans les secteurs du centre-ville qu'en périphérie. Ainsi, les stations météorologiques permanentes en place offrent une représentativité limitée des conditions météorologiques locales auxquelles la population est exposée. Le projet pilote mené à Québec a permis de documenter le besoin d'obtenir des mesures en temps réel dans les secteurs fortement urbanisés de la ville. Le quartier Saint-Sauveur a été retenu pour l'installation d'une station météorologique compacte permanente. Celle-ci est en opération depuis février 2012.

7 BIBLIOGRAPHIE

- BERGERON, O. 2012. Caractérisation de la variabilité intra-urbaine de la température selon une perspective géostatistique. *in* 8th International Conference on Urban Climate, University College Dublin, Dublin, Irlande.
- BOULFROY, E., G. BRETON, J.-P. GRAVEL, G. LESSARD, F. GRENON et J. KHALDOUNE. 2012a. Priorisation pour la conservation d'îlots de fraîcheur existants et l'implantation de nouveaux îlots de fraîcheur. Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy inc. (CERFO). Rapport 2012-20. 29 p.
- BOULFROY, E., J. KHALDOUNE, F. GRENON, R. FOURNIER et B. TALBOT. 2012b. Conservation des îlots de fraîcheur urbains - Description de la méthode suivie pour identifier et localiser les îlots de fraîcheur et de chaleur. Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy inc. (CERFO) et Université de Sherbrooke. Rapport 2012-11b. 38 p.
- KESTENS, Y., A. Brand, M. Fournier, S. GOUDREAU, T. KOSATSKY, M. MALOLEY et A. SMARGIASSI. 2011. Modelling the variation of land surface temperature as determinant of risk of heat-related health events. *International Journal of Health Geographics*, 10:9 p.
- KHALDOUNE, J., F. GRENON, E. BOULFROY et S. LAFLEUR-CAREAU. 2013. Caractérisation des îlots de fraîcheur urbains à l'échelle fine. Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy inc. (CERFO). 38 p.
- LEDUC, R., M. FERLAND, J. GARIÉPY, G. JACQUES, C. LELIÈVRE et G. PAULIN. 1980a. Îlot de chaleur à Québec: cas d'été. *Boundary-Layer Meteorology*, 19:471-480.
- LEDUC, R., G. JACQUES, M. FERLAND et C. LELIEVRE. 1980b. Ilot de chaleur à Québec : cas d'hiver. *Boundary-Layer Meteorology*, 21:315-324.
- LEROUX, A., J.-P. GAUTHIER, A. LEMONSU, S. BÉLAIR et J. MAILHOT. 2009. Automated urban land use and land cover classification for mesoscale atmospheric modelling over canadian cities. *Geomatica*, 63:393-406.
- MASTERTON, J. M. et F. A. RICHARDSON. 1979. HUMIDEX: a method of quantifying human discomfort due to excessive heat and humidity. Environment Canada, Downsview, Ontario. 45 p.
- PAMPALON, R. et G. RAYMOND. 2003. Indice de défavorisation matérielle et sociale : son application au secteur de la santé et du bien-être. *Santé, Société et Solidarité*, 1:191-208.