

TECHNOTE



Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy inc.

Tél. : (418) 659-4225 | Courriel : info@cerfo.qc.ca | www.cerfo.qc.ca



NOTE TECHNIQUE • 2013-01 • SEPTEMBRE 2013

Depuis quelques décennies, on ne peut plus nier la réalité des changements climatiques à l'échelle mondiale. La hausse constante de la température (observée¹ et projetée) ainsi que la présence de périodes de températures extrêmes, en particulier en été, accentueront vraisemblablement un problème déjà connu : **l'effet des îlots de chaleur urbains**. Il devient donc urgent de mettre en place des mesures pour lutter contre les effets nocifs de ces îlots de chaleur en milieu urbain et minimiser leurs impacts. Une gestion efficace de la végétation et de l'eau en milieu urbain, créant des **zones de fraîcheur urbaines (ou îlots de fraîcheur)**, est l'une des principales solutions à ce problème. L'élaboration d'un outil permettant de localiser les îlots de chaleur et les îlots de fraîcheur, à une échelle relativement fine et pour tout le Québec urbain, devient très pertinente pour la lutte aux effets des îlots de chaleur, en plus d'être un appui à l'aménagement urbain axé sur la qualité de vie de ses habitants. C'est dans ce contexte que l'Institut national de santé publique du Québec a confié au CERFO le mandat de développer un modèle de prédition de la température de surface, dans le but d'identifier et de localiser les îlots de chaleur et de fraîcheur en milieu urbain.

Identification et localisation des îlots de chaleur et de fraîcheur pour tout le Québec urbain

Cadre méthodologique général et principales étapes du projet

Une première cartographie des îlots de chaleur a été élaborée en 2010 (Kestens *et al.*, 2011). Suite aux demandes des utilisateurs de cet outil, il a été décidé de le bonifier et de développer une nouvelle cartographie. Cette dernière devait être d'une résolution plus fine, étendue aux zones moins peuplées qui sont contiguës aux zones urbaines et présenter non seulement la localisation des îlots de chaleur urbains, mais aussi celle des îlots de fraîcheur. La nouvelle cartographie des îlots de chaleur et de fraîcheur repose sur un modèle spatial de prédition de la **température relative de surface**, appliquée à l'ensemble des zones habitées par plus de 400 habitants par km² au Québec.

La méthode utilisée est une adaptation du modèle de prédition de la température de surface, utilisé pour produire la première cartographie des îlots de chaleur à partir d'images Landsat (Kestens *et al.*, 2011) : même cadre méthodologique et sensiblement les mêmes variables explicatives. Les variables explicatives à tester dans le nouveau modèle prédictif ont donc été choisies *a priori*, et l'amélioration du pouvoir prédictif du nouveau modèle de température devait provenir principalement de l'augmentation de la résolution du type d'image satellitaire utilisé. En effet, la nouvelle approche propose d'utiliser des images satellites du capteur SPOT-5 dont la résolution est de 20 m, comparativement à 60 à 100 m dans le cas des bandes thermiques des images Landsat, utilisées par Kestens *et al.* (2011). L'utilisation d'images SPOT et Landsat pour générer une carte de températures de surface a déjà fait l'objet de projets de recherche (Bhang and Park, 2009).

Qu'est-ce qu'un îlot de chaleur urbain ?

Ce phénomène se définit par des températures estivales plus élevées dans les milieux urbains que dans les zones rurales avoisinantes, pouvant entraîner des problèmes de santé importants, voire la mort chez certains groupes de populations (Figure 1). Les populations les plus vulnérables sont principalement les individus plus fragiles (personnes âgées, malades, jeunes enfants) et les personnes défavorisées (ayant moins facilement accès à des mesures permettant d'atténuer les effets des îlots de chaleur telles que l'accès à des climatiseurs, des piscines, des cours ombragées, etc.), vivant souvent dans des quartiers plus exposés aux îlots de chaleur.

Schéma de l'îlot de chaleur urbain

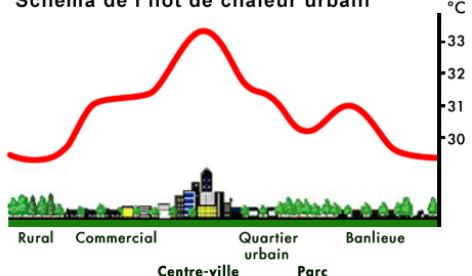


Figure 1. Îlots de chaleur urbains

¹ Selon le GIEC, onze des douze années les plus chaudes jamais observées ont été enregistrées depuis 1995. Au Québec, les dix années les plus chaudes du siècle ont été enregistrées à partir des années 1980.

Quelques exemples des bienfaits de la végétation en ville

Des baisses de température de l'ordre de plusieurs degrés peuvent être observées à proximité d'espaces verts, atténuant alors les effets des îlots de chaleur. En plus d'agir comme un climatisateur naturel en diminuant la température ambiante des villes et en favorisant une meilleure ventilation, les espaces boisés urbains sont également responsables de plusieurs autres bienfaits sur la santé : ils réduisent les gaz polluants présents dans l'air, ils filtrent les poussières fines et les aérosols en suspension dans l'air, ils contribuent à réduire les risques de cancer de la peau et de cataractes et constituent un milieu propice à la tenue d'activités physiques et récréatives en plein air. Bien entendu, les espaces verts en milieu urbain remplissent aussi de nombreuses autres fonctions éco-
logiques, sociales et économiques.

La figure 2 présente les principales étapes suivies lors de l'élaboration de la cartographie des températures de surface :

1. Préparation du jeu de données utilisé pour construire le modèle (variables explicatives et température de surface);
2. Élaboration du nouveau modèle;

3. Validation statistique du nouveau modèle;
4. Application du modèle sur l'ensemble du territoire d'étude.

Données utilisées pour l'élaboration du modèle

Sous-échantillonnage du territoire d'étude

Un sous-échantillonnage du territoire d'étude a été réalisé pour l'élaboration et la validation du modèle. Seize images acquises avec le capteur SPOT-5 ont été sélectionnées, de manière à couvrir l'ensemble de l'étendue géographique du territoire d'étude et toute la diversité du tissu urbain retrouvé au Québec (Tableau 1). Il a été nécessaire d'avoir recours à des images prises sur plusieurs années afin de respecter les critères de sélection (images prises pendant les saisons où les arbres sont en feuilles, images sans nuages, etc.). Pour chaque secteur couvert par une scène SPOT-5, la sélection d'une image acquise par le capteur Landsat ETM+ a été réalisée dans le but d'obtenir la mesure réelle de température, étant donné que les images SPOT-5 ne disposent pas de bande thermique. La sélection des 15 images Landsat dans les archives disponibles a été réalisée de manière à ce que leur date d'acquisition soit la plus proche possible (en termes de date journalière) de celle des images SPOT-5 correspondantes. Dans certains cas, il a été nécessaire d'avoir recours à des images prises à des années différentes mais rapprochées le plus possible de l'année de référence.

Tableau 1. Dates d'acquisition des 16 images SPOT-5 et Landsat ETM+ correspondantes

Date de la scène de l'image SPOT-5				Date de l'image Landsat correspondante		
Année	Mois	Jour	id*	Année	Mois	Jour
2005	8	26		2005	8	6
2006	7	19		2006	7	19
			a	2007	7	29
2006	8	30	a	2008	8	21
2006	8	30	b	2007	7	25
2007	6	18		2011	6	15
2007	8	2		2007	8	21
2007	8	28		2007	8	5
2007	9	4	a	2007	8	21
2007	9	4	b	2008	8	21
2008	7	7		2010	7	23
				2005	7	17
2008	8	21		2008	8	26
2009	8	15		2010	8	20
2009	9	6		2010	6	17
2010	6	21		2010	6	17
2010	9	1		2010	8	20
2011	7	2		2011	7	10

* Deux images ont été prises la même journée mais ne sont pas localisées au même endroit.

Figure 2. Principales étapes suivies lors de l'élaboration de la cartographie de températures de surface

Variable dépendante du modèle

La variable dépendante du modèle, soit la température de surface, est calculée à partir de la bande thermique (bande 6) du capteur ETM+ de Landsat (Figure 3). Le choix d'utiliser des images Landsat pour calculer la variable dépendante du modèle se base sur la décision d'utiliser le même cadre méthodologique que pour le modèle développé par Kestens *et al.* (2011).

Étant en présence de plusieurs images Landsat prises dans des conditions météorologiques pouvant être très différentes, la plage de températures de surface couverte sur chaque image peut être, elle aussi, très variable d'une image à l'autre. Il a été décidé de ne pas utiliser une donnée de température normalisée, mais plutôt les valeurs brutes de température calculées à partir du canal thermique pour chaque image Landsat, car la normalisation des données de température n'a pas permis d'obtenir un modèle plus performant ni plus simple.

Variables explicatives testées

Les variables explicatives testées (figure 5) sont celles qui figuraient déjà dans le modèle développé par Kestens *et al.* (2011) :

- des données climatiques (température moyenne de l'air lors de la journée d'acquisition de l'image Landsat et moyenne des températures 72 heures avant la date d'acquisition, provenant de relevés météorologiques);
- l'indice de végétation normalisé (NDVI), calculé à partir des images SPOT-5 (voir encadré à la page suivante pour la définition);
- la distance par rapport à l'eau;
- le positionnement en X et Y;
- le numéro de semaine d'acquisition de l'image Landsat.

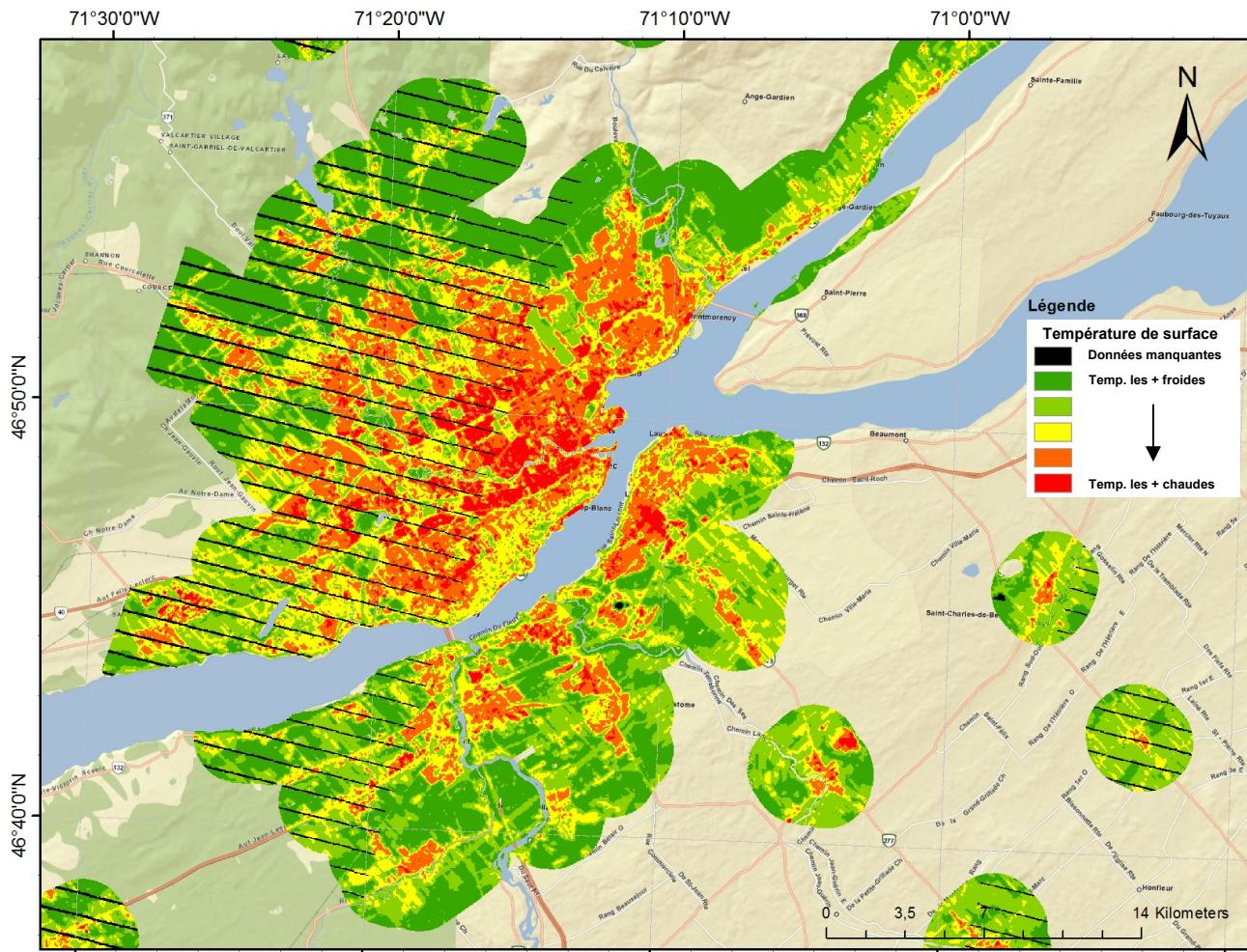


Figure 3. Exemple de carte des classes de température de surface calculées à partir de la bande thermique du capteur ETM+ de Landsat pour la région de Québec

Qu'est-ce-que le NDVI ?

Le NDVI permet d'estimer la quantité de végétation présente. Il se calcule à partir des bandes spectrales proche infrarouge et rouge du capteur optique de SPOT-5.

proche infrarouge - rouge

$$NDVI = \frac{\text{proche infrarouge} - \text{rouge}}{\text{proche infrarouge} + \text{rouge}}$$

proche infrarouge + rouge

Les valeurs de NDVI peuvent varier de -1 à +1. En présence de végétation, elles sont généralement comprises entre 0,1 et 0,7. Les valeurs supérieures de l'indice correspondent à la présence d'une couverture végétale dense et en bonne santé, alors que les nuages et la neige entraînent des valeurs de NDVI proches de 0.



Classe 1 : Bâti/sol nu pur²

Chaussée, toits de maisons, d'édifices, de grandes surfaces, pistes d'atterrissement...



Classe 2 : Bâti/sol nu mixte

Maisons et édifices avec présence de végétation



Classe 3 : Végétation basse

Champ agricoles, parcs (jardins communautaires, aires récréatives...), terrains de sport (golf, soccer, baseball...), terrains ouverts...



Classe 4 : Végétation arborescente dominante

Zones végétalisées dominées par les arbres

De nouvelles variables ont par la suite été ajoutées :

- la hauteur de la surface par rapport au niveau de la mer (MNA);
- un indice d'imperméabilité des surfaces (IS) calculé à partir des images SPOT-5 (voir encadré à la page suivante pour la définition);
- une classification de l'occupation du sol, passant de 2 classes dans Kestens *et al.* (2011) à 4 classes (Figure 4).

Figure 4. Description des classes d'occupation du sol

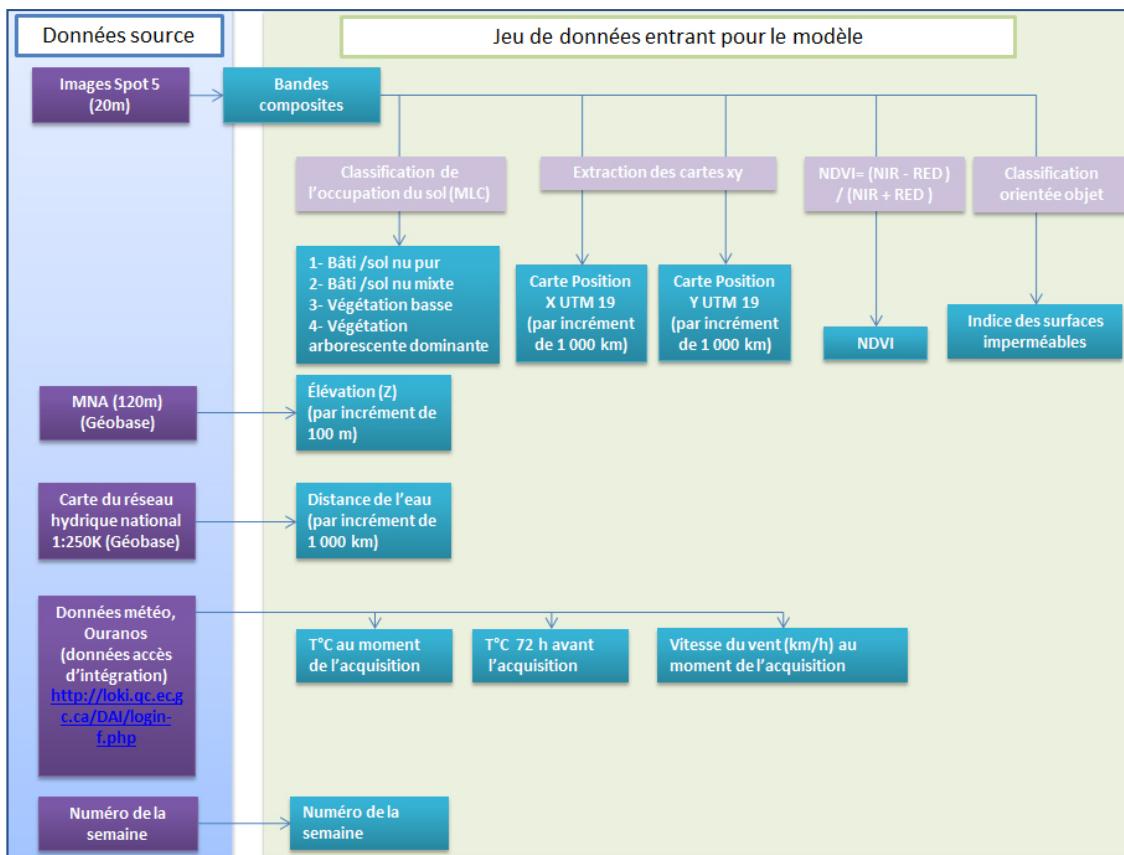


Figure 5. Schéma général du jeu de données utilisées comme variables explicatives potentielles du modèle de prédiction de la température de surface

²Il s'est avéré que cette classe inclut, dans certains cas, des champs labourés sans végétation en raison de leur signature spectrale qui s'apparente à celle des zones urbaines pures.

Qu'est-ce-que l'indice d'imperméabilité des surfaces ?

Le calcul de l'imperméabilité des surfaces informe sur le degré d'anthropisation d'une région, mais aussi sur la quantité de matériaux ayant une masse thermique élevée et donc une forte capacité à capter et à stocker l'énergie provenant du rayonnement solaire. Les surfaces fortement imperméables sont principalement des surfaces anthropiques comme les routes, les trottoirs, les cours et allées pavées, les stationnements et les toitures.

Le calcul des surfaces imperméables est estimé à partir des données des bandes 2, 3 et 4 de l'image SPOT-5, c'est-à-dire la bande rouge (0,61 - 0,68 µm), la bande du proche infrarouge (0,78 - 0,89 µm) et celle du moyen infrarouge (1,58 - 1,75 µm).

Sur chaque scène SPOT-5, plusieurs régions d'intérêt correspondant aux surfaces imperméables dites pures (ex : grands stationnements avec peu ou pas de peinture, grandes intersections routières, pistes d'aéroport composées d'asphalte ou de bitume) ont été identifiées manuellement en utilisant les données des bandes 2, 3 et 4 ainsi que l'imagerie à haute résolution spatiale disponible dans Google Maps (Figure 6). Ces régions d'intérêt ont ensuite été reportées dans le logiciel ENVI 4.8 de EXEILS et un démixage spectral a été appliqué sur les scènes, dans le but de déterminer l'abondance des composantes spectrales correspondant aux surfaces imperméables dans chaque pixel, en se basant sur la similitude des régions d'intérêt préalablement identifiées concernant l'imperméabilité des surfaces.



Figure 6. Exemple de région d'intérêt (centres commerciaux du boulevard Saint-Pierre)

La méthode utilisée présente certaines limites importantes à connaître. Comme il a été mentionné, elle repose sur l'identification de régions d'intérêt sur chaque scène, qui servent de référence pour le démixage spectral partiel. Une attention particulière a été portée pour l'obtention d'une référence d'imperméabilité maximale pour chacune des scènes et des valeurs spectrales de ces régions d'intérêt idéalement équivalentes d'une scène à l'autre. Mais dans les scènes les moins urbaines où les régions d'intérêt sont plus petites que 20 mètres de côté, le référent n'est pas aussi pur en surface imperméable que dans les secteurs très urbanisés où l'on retrouve de grandes surfaces imperméables. Une résolution spatiale plus fine limiterait certainement les différences inter-scènes.

De plus, il s'avère que le choix des bandes spectrales sélectionnées pour l'analyse du démixage spectral fait ressortir certains champs agricoles comme étant fortement imperméables. Ainsi, les champs labourés, comportant peu de végétation et de matière organique et avec une composition élevée en minéraux, apportent une confusion dans le calcul de l'indice d'imperméabilité des surfaces.

Construction et validation du modèle prédictif de température de surface

Construction du modèle

Un échantillonnage aléatoire stratifié dans l'ensemble des 16 scènes SPOT-5 a été réalisé selon les classes d'occupation du territoire. Finalement, 35 099 pixels ont été retenus pour l'élaboration du modèle de température de surface. Le modèle de prédiction de la température a été établi selon une approche par modèle mixte.

À l'exception de la vitesse du vent, qui était considérée dans le modèle de Kestens *et al.* (2011) et qui ne s'est pas avérée significative dans le nouveau modèle, toutes les variables qui ont été testées ont été retenues dans le nouveau modèle, parfois même en interaction. La région de provenance des images et le numéro de la semaine de prise des images LANDSAT ont été utilisés comme effets aléatoires.

L'analyse statistique a montré que le NDVI et l'occupation du sol sont les deux variables complémentaires qui présentent les plus fortes valeurs explicatives dans le modèle. Le coefficient de corrélation (R^2) du modèle est de 0,67, avec une erreur quadratique moyenne (RMSE) de 2,35°C, soit 9,6 %.

Validation du modèle

Le modèle théorique obtenu a été validé à partir de points d'échantillonnage non utilisés pour la construction du modèle. À cette fin, des valeurs prédites ont été obtenues par itération pour l'ensemble des données de l'échantillon. À chaque itération, 90 % des données ont servi à prédire le 10 % restant utilisé pour la validation. La validation du modèle montre également un coefficient de corrélation (R^2) de 0,67 entre les valeurs observées et prédites. Quant à l'erreur quadratique moyenne (RMSE) de validation, elle est de 2,36°C, soit 10,1 %. La relation linéaire entre les valeurs observées et prédites présente une pente de 1 et une ordonnée à l'origine qui n'est pas significativement différente de zéro (Figure 7).

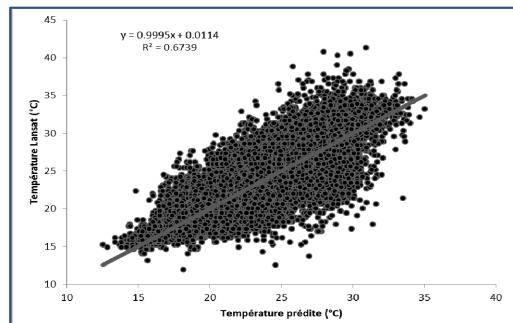


Figure 7. Température Landsat observée en fonction de la température prédite pour les 3 509 points d'échantillonnage non utilisés lors de la construction du modèle

Application du modèle prédictif de température de surface à l'ensemble du territoire d'étude

Territoire couvert par le modèle prédictif

Le modèle développé a été appliquée à chacune des 67 images SPOT-5 acquises entre 2005 et 2011 et couvrant toutes les zones urbaines du Québec (Figure 8). Parmi ces 67 images, la grande majorité (85 %) a été acquise en 2007 ou lors d'années ultérieures. Toutes les images ont été prises entre le 15 juin et le 9 septembre (pendant la période où la végétation est en feuilles) et toujours à la même heure (entre 15 et 16h). En s'étalant sur une période plus récente que celle couverte par le modèle développé par Kestens *et al.* (2011), qui utilisait des images acquises entre 1987 et 2002, le présent modèle constitue une grande amélioration de la cartographie des îlots de chaleur ayant été produite. L'utilisation de données satellites les plus récentes possibles prend toute son importance en milieu urbain où, dans un contexte de développement immobilier important, le paysage urbain peut changer très rapidement et de manière draconienne.

Production d'une carte à neuf niveaux de température de surface

La carte de la température de surface obtenue permet de localiser avec une précision aux 20 m près, selon un gradient relatif, les zones couvertes par le spectre des températures les plus chaudes (îlots de chaleur) et les zones couvertes par le spectre des températures les plus froides (îlots de fraîcheur) en milieu habité (Figure 9).

Neuf niveaux de températures relatives ont été définis, dans le but de distinguer les îlots de fraîcheur des îlots de chaleur. La représentation spatiale de la distribution des neuf niveaux de température a été réalisée scène par scène, étant donné que l'amplitude des températures observées au sein d'une même scène varie d'une scène à l'autre. Ces différences entre scènes s'expliquent par le fait que les images n'ont pas toutes été prises dans des conditions météorologiques semblables.

La représentation spatiale de la température en neuf niveaux utilise la méthode de Jenks, disponible dans ArcGIS, qui est une méthode inductive consistant à choisir les seuils qui maximisent la variance interclasse et minimisent la variance intraclasse. Si la distribution comporte des discontinuités (zones de faible densité des valeurs), celles-ci seront nécessairement détectées par la méthode de Jenks, qui constitue une variante rigoureuse de la méthode bien connue des « seuils naturels ».

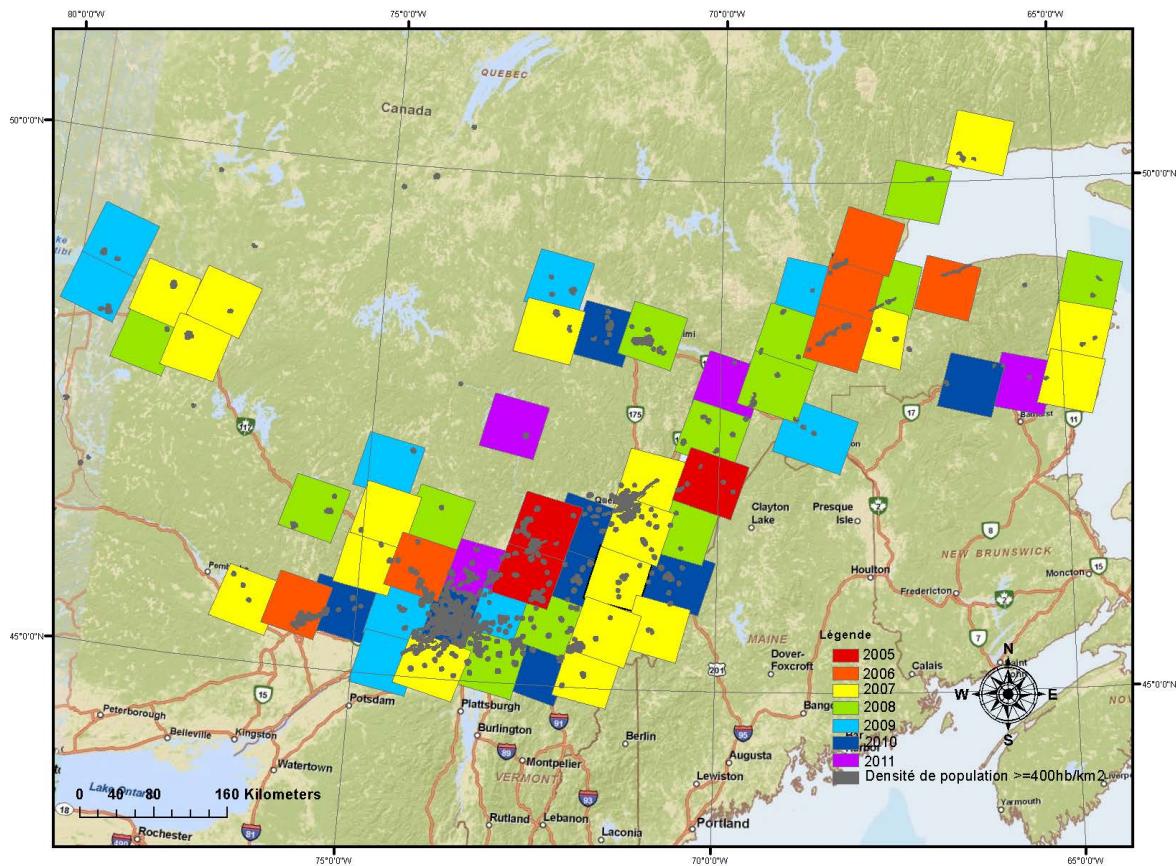
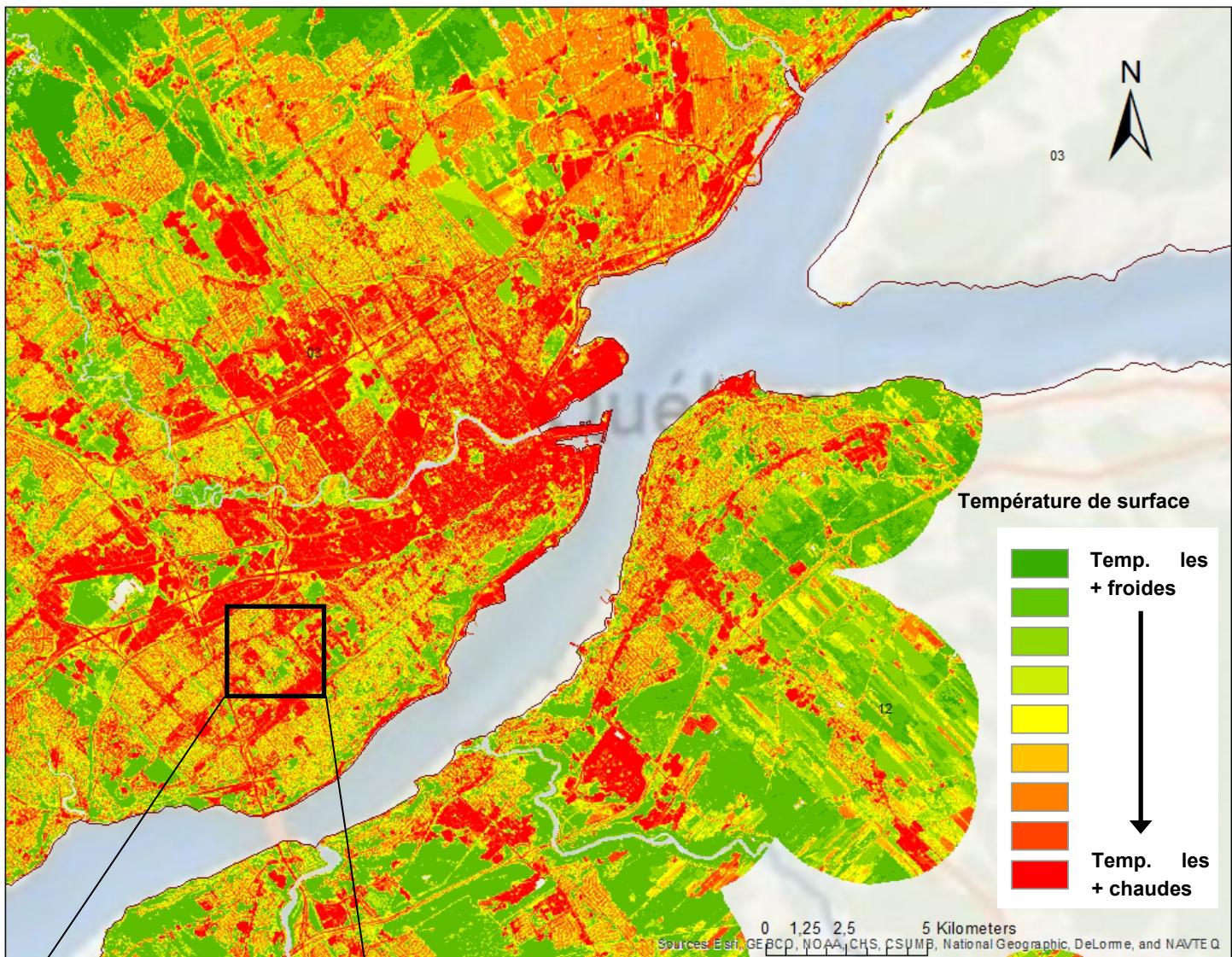
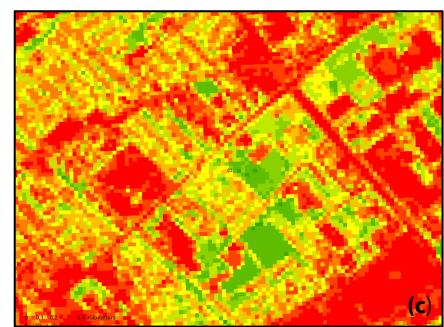
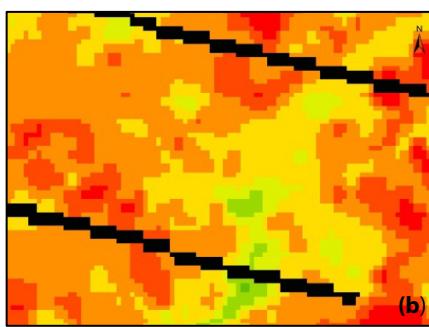


Figure 8. Localisation des images SPOT-5 utilisées pour couvrir tout le territoire d'étude et année de prise de chaque image



3 illustrations, pour le même secteur



a) carte des îlots de chaleur produite par Kestens *et al.* (2011)

b) carte de températures de surface extraites à partir du canal thermique du capteur optique de Landsat

c) carte de températures de surface prédites à partir des données SPOT-5 (nouvelle cartographie)

Figure 9. Carte de températures de surface pour les villes de Québec et de Lévis (carte générale et zooms)

Différents nombres de classes ont été testés et ont permis de confirmer que l'utilisation de 9 niveaux était optimale pour identifier les zones les plus chaudes correspondant à une concentration élevée de surfaces imperméables et recouvrant les zones identifiées comme des îlots de chaleur dans l'analyse de Kestens *et al.* (2011), mais avec une précision plus fine (20 m). Avec un découpage en neuf plages, il est également apparu qu'il était possible de distinguer, parmi les niveaux les plus frais, les zones boisées des zones végétalisées plus ouvertes. Le tableau 2 résume les niveaux de température retenus et leur description.

Un filtre de 3 pixels X 3 pixels (60 m X 60 m) a également été appliqué aux pixels associés aux deux niveaux les plus chauds (8 et 9), de manière à ne retenir, parmi les îlots de chaleur, que les zones de concentration de plus de 3 600 m².

Tableau 2. Description des niveaux de température représentés

Niveaux de température	Description
1 et 2 regroupés	îlots de fraîcheur les plus frais (généralement les zones boisées)
3 et 4 regroupés	îlots de fraîcheur moins frais (généralement des zones végétalisées plus ouvertes)
5, 6 et 7	Continuum de températures sans qualificatif particulier
8	îlots de chaleur un peu moins chauds (souvent mi-toyens aux îlots de niveau 9)
9	îlots de chaleur les plus chauds

Limites méthodologiques de l'étude et mise en garde

Cet exercice de cartographie des températures de surface relatives comporte des sources d'imprécision souvent incontrôlables, entre autres liées aux diverses dates d'acquisition des images satellitaires, qui entraînent des conditions météorologiques pouvant varier d'une image à l'autre et qui doivent être considérées lors de l'interprétation. De plus, après vérification des cartes de niveaux de température obtenus, il s'est avéré qu'il existait une confusion entre les champs agricoles nus et les îlots de chaleur. La température prédictive pour les terres agricoles nues s'apparente en effet à celle des îlots de chaleur, en raison de leur signature spectrale qui présente de fortes similitudes avec les zones hautement imperméables. Il est donc possible que certains jardins communautaires en ville soient identifiés comme des îlots de chaleur.

Certains choix méthodologiques ont également été faits en lien avec les contraintes budgétaires et temporales du projet (dont l'adaptation d'un modèle déjà existant).

Enfin, il est essentiel de garder en tête que l'objectif poursuivi par ce modèle n'était pas de produire une cartographie précise de températures absolues, mais une cartographie de températures

relatives, permettant de localiser les zones potentielles les plus chaudes et les plus fraîches. Les classes de températures de surface relatives doivent donc être considérées comme des indicateurs robustes, permettant d'identifier et de localiser les îlots de fraîcheur et de chaleur dans un milieu urbain.

Conclusion

Le nouveau modèle prédictif de la température de surface relative permet d'identifier, à l'échelle de tout le Québec urbain présentant une population supérieure à 400 habitants/km², la localisation des secteurs les plus chauds (îlots de chaleur) et les secteurs les plus frais (îlots de fraîcheur), à une échelle relativement fine (résolution de 20 m près). Une telle cartographie et les données numériques associées, disponibles sur <http://www.donnees.gouv.qc.ca/?node=/donnees-details&id=2f4294b5-8489-4630-96a1-84da590f02ee>, représente un outil fort utile aux fins de planification et d'intervention en santé publique et protection civile, tant pour les autorités sanitaires que municipales. Le rapport technique complet décrivant la méthodologie suivie est disponible au www.cerfo.qc.ca (Boulfroy *et al.*, 2013). Une méthode d'analyse multicritère pour prioriser la conservation des îlots de fraîcheur existants et l'implantation de nouveaux a aussi été développée par le CERFO pour l'INSPQ et est également disponible sur le même site (Boulfroy *et al.*, 2012).

Ce projet est financé en partie par le Fonds vert dans le cadre du Plan d'action 21 du Plan d'action 2006-2012 sur les changements climatiques (PACC) du gouvernement du Québec.

Nous tenons également à remercier M. Richard Fournier, professeur titulaire de l'Université de Sherbrooke, pour sa contribution au projet.

Principales références

- Bhang, K.J. and S.-S. Park. 2009.** Park evaluation of the surface temperature variation with surface settings on the urban heat island in Seoul, Korea, using Landsat-7 ETM+ and SPOT. IEEE Geosciences and Remote Sensing Letters, vol. 6, n° 4, p. 708-712.
- Boulfroy, E., G. Breton, J.-P. Gravel, G. Lessard, F. Grenon et J. Khaldoune. 2012.** 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 pages + 1 annexe.
- Boulfroy, E., J. Khaldoune, F. Grenon, R. Fournier et B. Talbot. 2013.** Conservation des îlots de fraîcheur urbains - Description de la méthode suivie pour identifier et localiser les îlots de fraîcheur et de chaleur (méthode en 9 niveaux). CERFO et Université de Sherbrooke. Rapport 2012-11c. 40 pages.
- Kestens, Y., A. Brand, M. Fournier, S. Goudreau, T. Kosatsky, M. Maloley and A. Smargiassi. 2011.** Modelling the variation of land surface temperature as determinant of risk of heat-related health events. International Journal of Health Geographics, vol. 10, n°7, p. 2-9.