



technote

cerfo

FORMATION
ACCOMPAGNEMENT
RECHERCHE
EN FORESTERIE

NOTE TECHNIQUE NO 2023-05

JANVIER 2024 

Cartes des îlots de chaleur et de fraîcheur urbains : clés pour les interpréter et les utiliser

- 3 → [Pourquoi une cartographie des îlots de chaleur et de fraîcheur urbains ?](#)
- 3 → [Quelles cartes ont été produites et comment y accéder ?](#)
- 8 → [Diverses possibilités d'utilisation des cartes](#)
- 10 → [Comment interpréter les cartes et quelles sont leurs principales limites ?](#)
- 12 → [Annexe : Comment les écarts de température ont-ils été prédits ?](#)

ÉQUIPE DE RÉALISATION
Brindusa Cristina Budei, Ph. D.
Batistin Bour, M. Sc.
Marc-Antoine Genest, M. Sc.
Fiston Nininahazwe, M. Sc.
Emmanuelle Boulfroy, M. Sc.
Marc-Antoine Martineau, techn. géom.
Mathieu Varin, M. Sc.



Les îlots de chaleur urbains (ICU) sont des zones urbaines où la température est plus élevée que celle mesurée dans une zone rurale avoisinante, non ou peu perturbée par l'activité humaine (Figure 1). Selon la cartographie réalisée par le CERFO, les valeurs des écarts de températures de surface peuvent être aussi élevées que 20 °C.

Les ICU peuvent agraver les effets des grandes chaleurs et générer un impact néfaste important sur la santé. Ils sont aussi susceptibles d'affecter davantage les populations vulnérables, comme celles souffrant de maladies chroniques, les jeunes enfants, les personnes âgées ainsi que les personnes défavorisées qui vivent généralement dans les quartiers les plus exposés aux ICU.

Les îlots de fraîcheur urbains (IFU), quant à eux, représentent des lieux recherchés par la population lors des vagues de chaleur, car ils sont souvent végétalisés et donc plus frais [1].

Quels sont les facteurs qui favorisent les îlots de chaleur et de fraîcheur urbains?

La présence des îlots de chaleur urbains est favorisée par les matériaux qui ont une capacité de stockage et d'émission de chaleur plus importante qu'un milieu naturel végétalisé, par exemple des surfaces recouvertes d'asphalte ou de béton. Les larges surfaces imperméables en milieu urbain limitent aussi l'infiltration de l'eau dans les sols, l'eau étant un facteur modérateur très important de la température.

En contrepartie, les îlots de fraîcheur sont notamment favorisés par la présence des arbres ou la proximité des plans d'eau qui rafraîchissent l'air particulièrement lors des journées ensoleillées. Dans un contexte de réchauffement climatique, l'effet des îlots de chaleur est accentué, surtout dans les périodes de canicule si des mesures d'atténuation ne sont pas mises en place.

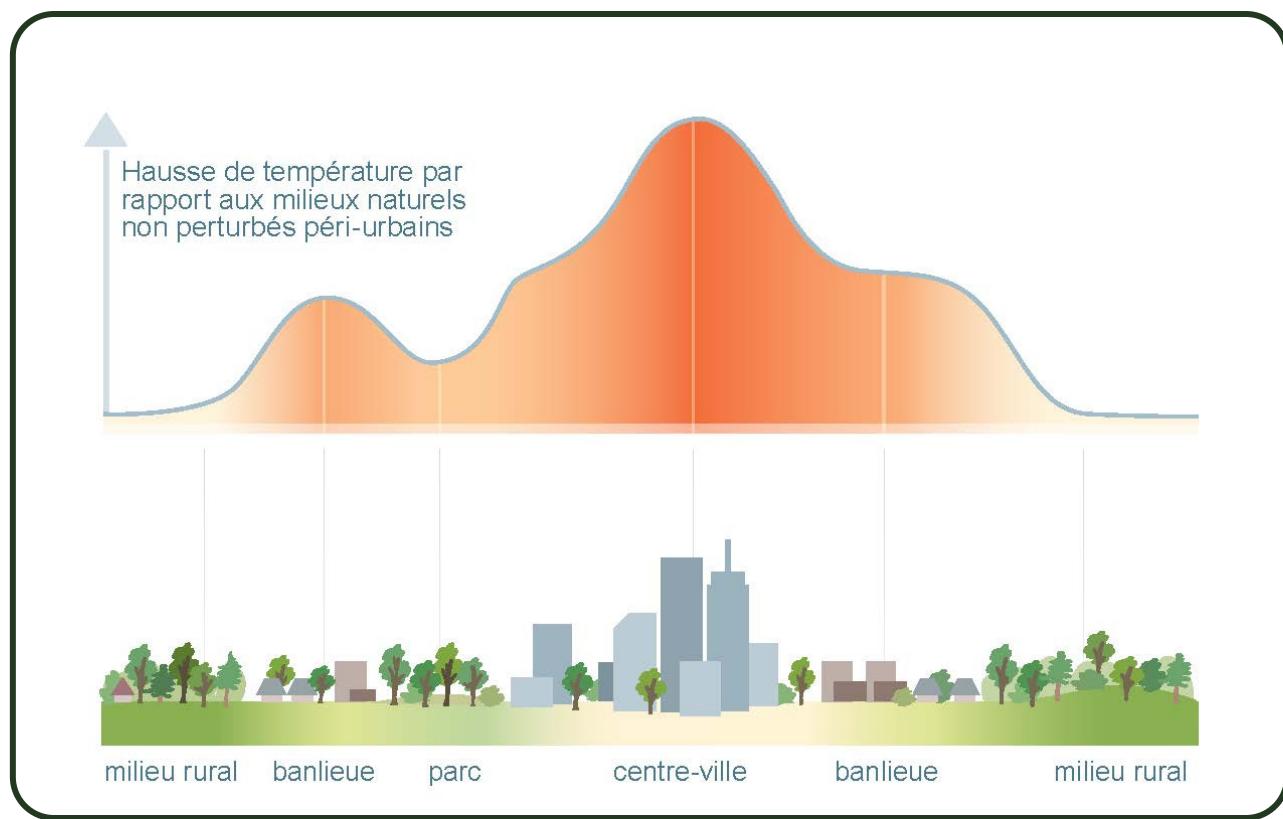


FIGURE 1. Îlot de chaleur urbain – écart de température entre le centre-ville et les zones rurales avoisinantes



Pourquoi une cartographie des îlots de chaleur et de fraîcheur urbains?

La localisation des ICU et des IFU constitue un outil de planification et d'intervention en santé publique et en protection civile, tant pour les autorités sanitaires, municipales ou autres organisations de tous types souhaitant s'impliquer dans la lutte contre les ICU.

Ainsi, une telle cartographie peut être utilisée pour :

- Planifier des mesures de réduction des effets des ICU en fonction de la présence actuelle des ICU et des IFU. Le verdissement ou la modification de matériaux urbains, en priorisant ceux qui réfléchissent davantage le rayonnement solaire et qui émettent moins de chaleur, représentent des mesures possibles;
- Réaliser des suivis de l'évolution dans le temps des ICU et IFU, en fonction des projets d'urbanisation et de la mise en œuvre de mesures d'atténuation (p. ex., des projets de verdissement).

Une première cartographie couvrant tout le Québec habité (l'écoumène du Québec) a été réalisée par le CERFO en 2012 avec des données de 2005 à 2011 [2]. Afin d'obtenir un portrait actuel des ICU et de leur évolution depuis la dernière décennie, deux nouvelles cartographies ont été produites pour les années 2013 et 2022. La nouvelle méthode développée pour les cartes de 2013 et 2022 a l'avantage d'utiliser des données satellitaires d'une qualité spectrale supérieure, acquises par Landsat 8 et 9 (satellites disponibles seulement depuis 2013) et des algorithmes plus performants d'intelligence artificielle [3].

Quelles cartes ont été produites et comment y accéder?

Cartes produites et étendues couvertes par chacune

Trois cartographies documentant les ICU et IFU à l'échelle du Québec habité ont été produites, à la fois pour 2013 et pour 2022. Deux cartes d'analyse de changement entre 2013 et 2022 sont également disponibles.

La zone couverte par les différentes cartes et l'unité minimale cartographique varient selon les cartes et sont illustrées dans la figure 2. Toutes les limites des unités géographiques proviennent de Statistique Canada (recensements de 2016 et 2021) :

- **L'écoumène du Québec** soit la surface habitée au Québec;
- **Les centres de population**, soient des zones avec un minimum de 1000 habitants et une densité d'au moins 400 habitants par km²;
- **Les îlots de diffusion**, soit la plus petite unité géographique couverte par Statistique Canada.

Des zones tampons de 5 km autour de l'écoumène du Québec et de 2 km autour des centres de populations ont été appliquées pour les analyses.

Les cartes suivantes ont été produites. La figure 3 représente les exemples de chacune des cartes produites localisés dans le centre-ville de Montréal :

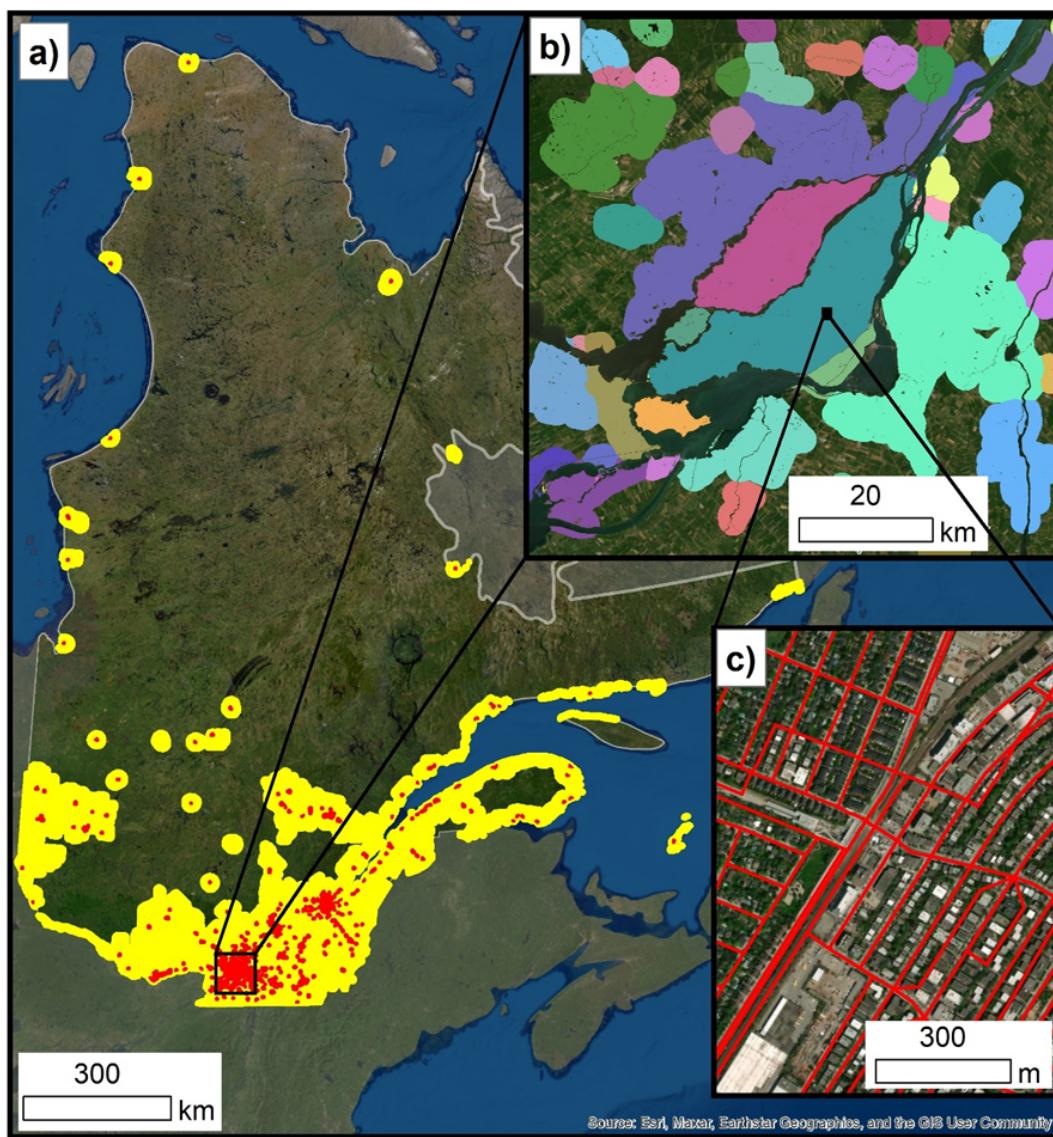
- **Écart de température 2020-2022 en °C et Écart de température 2013-2014 en °C** : ces deux cartes représentent la différence entre la température de surface locale du site analysé et la température de surface mesurée dans un milieu de référence situé à proximité, soit un milieu forestier peu ou non perturbé (voir l'encadré ci-après pour plus d'information sur la méthode de calcul de l'écart de température). Les écarts de température sont représentés en plages de valeurs continues, illustrées en vert pour les valeurs plus froides et en rouge pour les valeurs plus chaudes. Les cartes couvrent l'étendue de l'écoumène du Québec et ont une résolution spatiale de 15 m. La donnée des écarts de température a ensuite été utilisée pour produire les cartes suivantes.



- **Différence d'écart de température en °C (2020-2022 moins 2013-2014)** : cette carte est représentée en plages de valeurs allant du vert au rouge. Le vert correspond à une différence négative des écarts de température, ce qui illustre une diminution de l'écart de température (donc zone relativement plus fraîche) en 2022 par rapport à 2013. Le rouge représente une différence positive, soit une augmentation de l'écart de température (donc un site relativement plus chaud) en 2022 par rapport à 2013. La carte de la différence des écarts de température de surface couvre l'étendue de l'écoumène du Québec, à une résolution spatiale de 15 m.
- **Classes d'écart de température de surface 2013-2014 et Classes d'écart de température de surface 2020-2022** : ces deux cartes illustrent 9 classes d'écart de température de surface. La classe 9 (rouge) correspond au plus grand écart de température avec le milieu de référence, et est donc la classe où la température de surface est la plus chaude. La classe 1 (vert foncé) correspond au plus petit écart de température où la température est la plus fraîche. **Les îlots de chaleur urbains** sont représentés par les classes 8 et 9 et sont disponibles dans une carte indépendante. **Les îlots de fraîcheur urbains** sont quant à eux représentés par les classes 1, 2 et 3 et sont aussi disponibles dans une carte indépendante. Les cartes des classes d'écart de température couvrent l'ensemble des centres de population du Québec. L'analyse des classes a été réalisée individuellement pour chaque centre. Les limites (intervalles) des classes d'écart de température varient donc selon les centres, afin de considérer leur spécificité en termes de conditions bioclimatiques qui peuvent être très différentes (voir la section « Comment interpréter les cartes et quelles sont leurs principales limites » pour plus d'information). La résolution spatiale est de 15 m.
- **Indice SUHII 2013-2014 et Indice SUHII 2020-2022** : ces deux cartes représentent l'indice d'intensité des îlots de chaleur urbains (*Surface Urban Heat Island Intensity – SUHII*) calculé pour chaque îlot de diffusion se trouvant à l'intérieur des centres de population. Le SUHII est une moyenne pondérée calculée à partir des classes des écarts de température, accordant plus de poids aux classes les plus chaudes. Ce poids est proportionnel à la classe (p. ex., une surface de la classe 9 possède 9 fois plus d'importance dans l'indice que la même surface si elle est dans la classe 1). L'indice SUHII est conçu pour faire ressortir les zones à forte concentration d'ICU. L'indice est représenté en 5 classes. Le rouge correspond aux îlots de diffusion ayant une forte intensité des ICU, alors que le vert correspond à des îlots de diffusion ayant une intensité peu élevée. Ces deux cartes couvrent l'ensemble des centres de population.
- **Variation de l'indice SUHII entre 2020-2022 et 2013-2014 (%)** : cette carte représente le pourcentage de changement de l'indice entre les deux périodes, représenté en 5 classes. Le changement est illustré selon un gradient allant du vert au rouge. Les classes en vert avec des valeurs en dessous de 100 % représentent une diminution de l'intensité des ICU en 2022 par rapport à 2013. Les classes en rouge avec une valeur supérieure à 100 % représentent une augmentation de l'intensité des ICU entre 2013 et 2022. Les valeurs autour de 100 % correspondent à une absence de changement. La carte couvre l'étendue des centres de population et les valeurs sont calculées à l'échelle de l'îlot de diffusion.

Comment est calculé l'écart de température de surface?

L'écart de température de surface représente la différence entre la température de surface locale du site analysé (qui peut avoir différents types d'utilisation du sol : urbain, agricole, végétation basse, forêt) et la température de surface d'un milieu de référence en forêt. Ce milieu de référence a la particularité de ne pas être affecté par les perturbations reliées aux activités humaines. De plus, son emplacement est relativement proche du centre urbain concerné, sur la même image satellitaire. Les températures des deux sites sont donc captées par le satellite au même moment, ce qui garantit une comparaison cohérente de température entre les deux sites. Ces écarts de température mesurés sur un grand échantillon de points sont ensuite utilisés pour entraîner le modèle de prédiction des écarts de température qui génère les données pour tout le territoire d'étude. Pour en savoir plus sur la méthode suivie, vous pouvez consulter l'annexe méthodologique.



a) Centres de population + zone tampon de 2 km
 Écoumène du Québec + zone tampon de 5 km



b) Centres de population + zone tampon de 2 km,
 même couleur : mêmes limites des classes d'écart de température

c) îlots de diffusion

FIGURE 2: Zones couvertes par les cartes et unités minimales cartographiques

a) Écoumène du Québec avec une zone tampon de 5 km (Étendue de la carte des écarts de température et la carte des différences des écarts de température entre 2013 et 2022) et Centres de population avec zones tampons de 2 km (Étendue couverte par la classification des écarts de température, les cartes des ICU et IFU, la carte de l'indice SUHII [indice d'intensité des ICU] et la carte de la variation de l'indice SUHII)

b) Exemple des centres de population avec zones tampons de 2 km dans la grande région de Montréal

c) Exemple des îlots de diffusion à Montréal (unité minimale cartographique des cartes de l'indice d'intensité des ICU et de la variation de l'indice d'intensité des ICU)

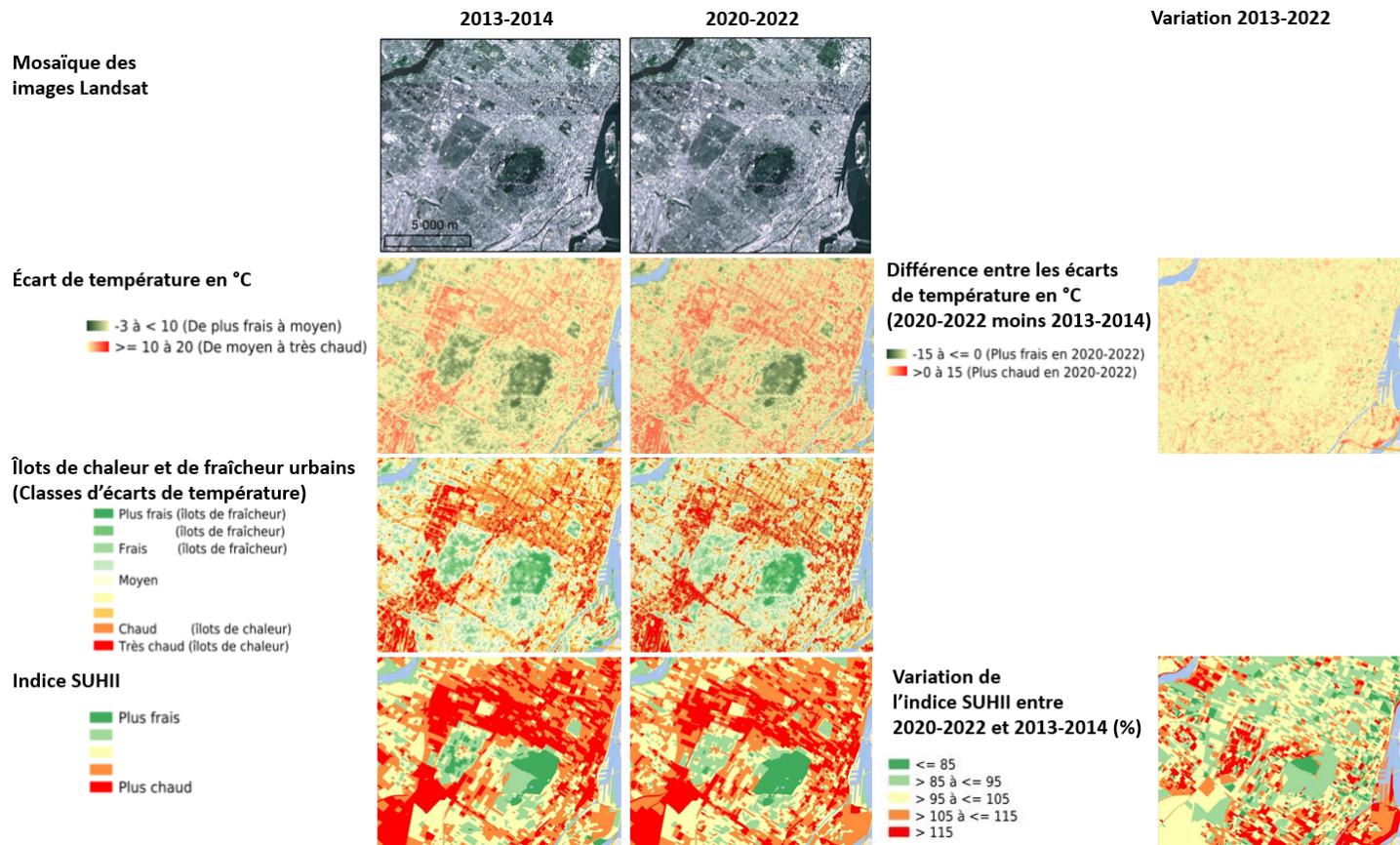


FIGURE 3: Exemple de cartes produites pour le centre-ville de Montréal.

Comment accéder aux cartes produites?

Deux voies d'accès aux cartes sont possibles :

- Via le « [Géoportal de santé publique du Québec](#) », dans la section « Climat et adaptation aux changements climatiques » pour une consultation interactive des cartes. Le « [Guide d'utilisation : Géoportal de santé publique du Québec](#) » est également accessible à partir de cette page. La figure 4 donne un aperçu des cartes consultables sur le Géoportal. Il est aussi possible de visualiser et comparer les données des ICU avec d'autres données pertinentes qui peuvent aider à la compréhension de la présence des ICU ou à l'estimation des risques qui y sont reliés, comme la couverture de la canopée ou l'indice de défavorisation matérielle et sociale.

Les cartes représentant les métadonnées (p.ex., l'étendue de l'écoumène plus la zone tampon de 2 km et l'étendue des centres de population enregistrant les limites spécifiques des classes d'écart de température) peuvent aussi être affichées. Un fond de carte des données topographiques (routes, hydrographie et toponymes) est fourni pour faciliter la navigation. Une recherche par toponyme (p. ex., nom de ville) est également disponible. Le Géoportal permet finalement d'exporter la carte en PDF et/ou l'imprimer, partager un lien avec les couches pertinentes et la zone d'intérêt.

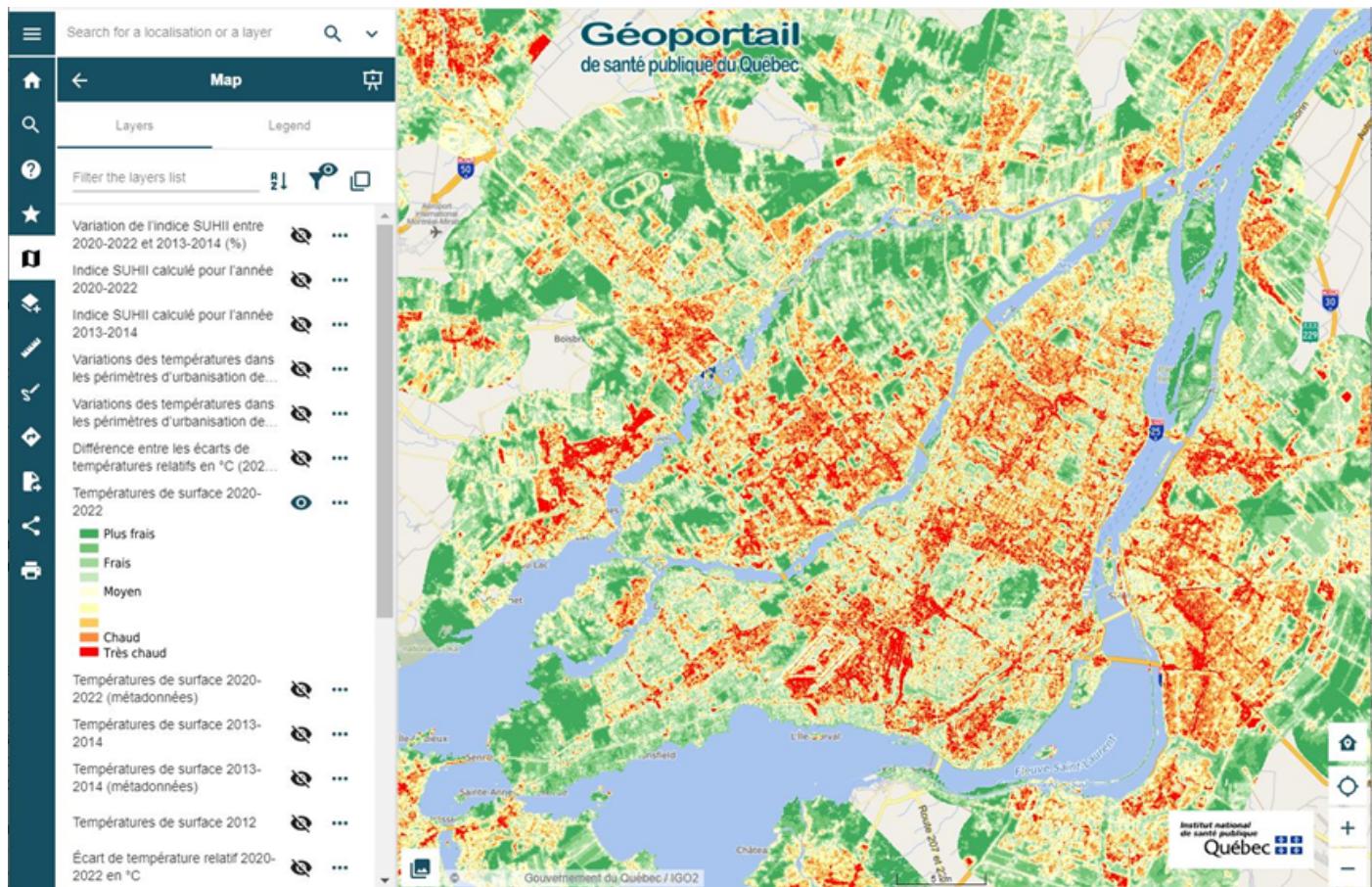


FIGURE 4: Géoportail de santé publique du Québec, exemple de la carte des Températures de surface (classes des écarts de température ou ICU/IFU).

→ **Via le site Données Québec** pour télécharger les données et les analyser dans un logiciel de géomatique (Système d'information géographique). Consulter les pages suivantes : [Îlots de chaleur/fraîcheur urbains et écarts de température relatifs 2013-2014](#), [Îlots de chaleur/fraîcheur urbains et écarts de température relatifs 2020-2022](#) et [Analyse de changement entre la cartographie des îlots de chaleur/fraîcheur 2013-2014 et 2020-2022 et Indice d'intensité d'îlots de chaleur urbains](#). À partir des pages mentionnées ci-haut, les liens sont accessibles vers la carte interactive (Géoportail).

Les données peuvent être téléchargées en format GÉOTIFF et/ou Shapefile en fonction de leur type. Les métadonnées comme l'étendue de l'écoumène et les centres de population avec l'information sur les limites des classes peuvent également être téléchargées. Les informations sur la symbologie utilisée permettent de reproduire dans un logiciel indépendant les mêmes tons de couleurs utilisés sur le Géoportail pour représenter différentes couches. Deux [rapports méthodologiques](#) détaillés pour les années 2013 et 2022 et les analyses de changement sont par ailleurs disponibles.



Diverses possibilités d'utilisation des cartes

Les cartes produites peuvent constituer des outils pour guider les intervenants de divers milieux, notamment le municipal et la santé publique, dans leur prise de décision. Ainsi, les cartes des ICU peuvent être utilisées lors d'une planification à court, moyen ou long terme de mesures de lutte contre les ICU à une échelle locale.

Pour les interventions à court terme, la carte des îlots de chaleur et la carte de l'indice SUHII permettent par exemple d'identifier efficacement les zones les plus critiques en matière de présence et intensité des ICU et pourraient être utilisées pour réaliser des plans d'intervention en période de canicule :

- Des haltes fraîcheur, des points d'humidification et d'autres services pourraient alors être offerts dans les zones les plus critiques, comme l'ouverture sur une plus longue période d'édifices climatisés (p. ex., les bibliothèques, les salles communautaires, les gymnases) et des infrastructures aquatiques (p. ex., les piscines publiques, les plages municipales et les jeux d'eau).
- Des recommandations relatives aux zones trop chaudes à éviter et aux trajets alternatifs à emprunter pourraient être émises pour les populations les plus vulnérables.
- D'autres recommandations peuvent concerner des mesures à prendre lors de rassemblements extérieurs prévus (p. ex., des concerts, des événements sportifs) pour limiter les risques d'expositions à la chaleur lors de ces événements (p. ex., le report de l'évènement, la distribution gratuite d'eau, l'installation de tentes).
- Dans un autre ordre d'idées, les parcours d'arrosage des plantations de la ville pourraient aussi être modulés en fonction de ces données.
- L'augmentation de la canopée urbaine;
- L'utilisation de matériaux moins émetteurs de chaleur dans la construction de bâtiment ou de routes;
- La construction de structures aquatiques (p. ex., des piscines, des jeux d'eau);
- La protection de la végétation existante.

Dans une perspective à plus long terme, des analyses de risques climatiques intégrant les ICU peuvent être réalisées. Les municipalités doivent faire face aux événements météorologiques extrêmes, dont les canicules, qui touchent leur territoire et dont la fréquence et l'intensité devraient augmenter avec les changements climatiques. Pour devenir plus résilientes et réduire les effets néfastes de la chaleur sur la population, elles doivent mettre en place des mesures de mitigation. La carte des ICU constitue un outil de première ligne pour contribuer à cibler les secteurs les plus problématiques et prioritaires, par le biais par exemple d'analyses multicritères pouvant intégrer plusieurs paramètres dont les ICU et la vulnérabilité de la population. Différentes actions peuvent ensuite être planifiées et mises en place dans ces secteurs à moyens et longs termes pour diminuer les risques liés aux ICU, par exemple :



À titre d'exemple, le CERFO a été mandaté par la ville de Candiac pour cartographier les risques liés à la chaleur afin de cibler des solutions d'adaptation aux changements climatiques basées sur le verdissement. Les risques liés à la chaleur ont été évalués selon la matrice présentée dans le tableau 1. Ces risques intègrent 2 paramètres : la présence des ICU ainsi qu'un indice de vulnérabilité de la population à la chaleur, qui

combine deux indices produits par l'INSPQ (la multimorbidité et la défavorisation matérielle et sociale). La figure 5 présente les cartes (1) des ICU, (2) de l'indice combiné de vulnérabilité et (3) la carte synthèse des risques qui servira d'outil d'aide à la décision pour prioriser la planification de projets de verdissement dans la ville de Candiac.

		Indice de vulnérabilité de la population (matérielle, sociale et comorbidité)		
		Très faible à Faible	Modérée	Élevée à Très élevée
Îlot de chaleur urbain	Absence	Nul ou Négligeable	Faible	Moyen
	Chaud	Nul ou Négligeable	Moyen	Élevé
	Très chaud	Nul ou Négligeable	Élevé	Très élevé

TABLEAU 1. Matrice de risques liés à la chaleur

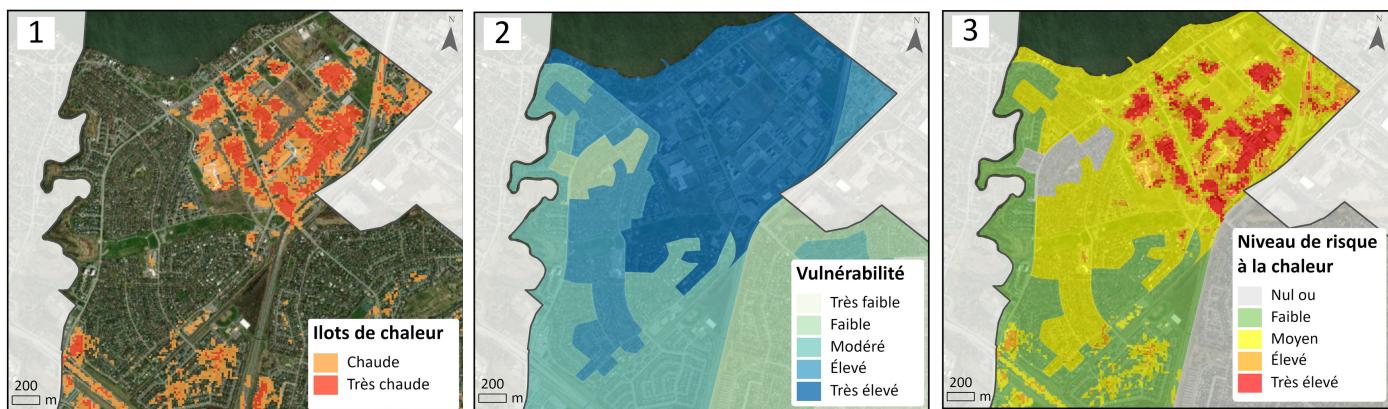


FIGURE 5: Exemple d'utilisation des îlots de chaleur pour estimer les risques liés à la chaleur. Ville de Candiac.

- 1-Présence des îlots de chaleur;
- 2-Indice de vulnérabilité à la chaleur de la population;
- 3-Niveau de risque synthétisé à la chaleur.



Comment interpréter les cartes et quelles sont leurs principales limites?

Interprétation des cartes à une échelle locale

Le modèle de prédiction des écarts de température tient compte des spécificités bioclimatiques locales du site d'étude. En effet, l'écart de températures est calculé entre un milieu urbain et un milieu forestier de référence, situé à proximité. Cette approche méthodologique a été choisie afin de considérer les grandes variations des écarts de températures observées à l'échelle du Québec urbain au complet :

- Ces écarts varient selon un gradient nord-sud et sont généralement supérieurs dans le sud du Québec. Ils sont influencés autant par la zone climatique que par le type de végétation (zone écoforestière) des points de référence.
- Ces écarts varient aussi en fonction du tissu urbain (taille, densité, utilisation des sols) et sont généralement plus élevés dans les grandes agglomérations que les petites villes.

Pour intégrer la dimension locale, il a été décidé de réaliser les cartes de classes d'écarts de température, d'ICU et d'IFU à l'échelle des centres de population.

Ainsi, à l'intérieur de chaque centre, toutes les classes de 1 à 9 sont présentes, mais les limites de ces classes varient d'un centre à l'autre pour tenir compte des différences d'amplitude des valeurs d'écarts de température. Par exemple, dans les centres de population situés dans la portion nord du Québec, les 9 classes couvrent une amplitude d'écarts de température pouvant aller de 2 à 6 °C (p. ex., les limites minimum et maximum des écarts de température à Chisasibi sont de -1,6 à 4,9 °C) alors que dans les centres de population plus au sud, l'amplitude des écarts de température est davantage comprise entre 6 et 20 °C (p. ex., les limites de -0,2 à 18,4 °C à Montréal, voir figure 6).

Les limites des classes de température peuvent aussi varier entre les cartes de 2013-2014 et de 2020-2022 en fonction de la variation temporelle des écarts de températures (amplitude et fréquence dans chaque centre de population).

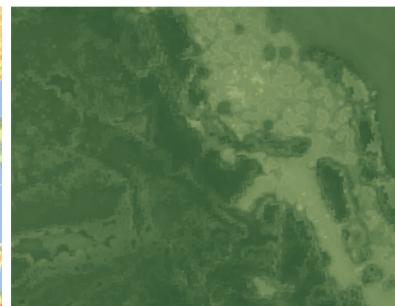
Écarts de température 2020-2022 en °C

- 3 à < 10 (De plus frais à moyen)
- >= 10 à 20 (De moyen à très chaud)

Montréal



Chisasibi



Îlots de chaleur et de fraîcheur urbains 2020-2022 (Classes d'écarts de température)

- Plus frais (îlots de fraîcheur)
- (îlots de fraîcheur)
- Frais (îlots de fraîcheur)
- Moyen
- Chaud (îlots de chaleur)
- Très chaud (îlots de chaleur)

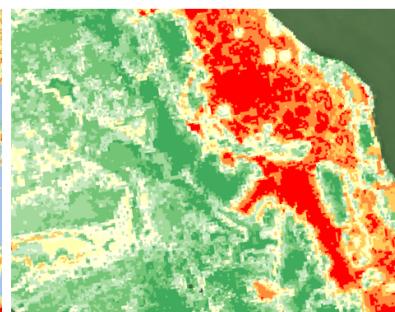


FIGURE 6 : Exemple de différences entre les limites des classes. À Montréal, les limites des classes 1 à 9 couvrent une amplitude d'écarts de température d'environ 18 °C (de -0,2 à 18,4 °C), et à Chisasibi environ 6 °C (de -1,6 à 4,9 °C).



Principales limites d'interprétation

Aucune donnée de température « absolue » disponible

Les cartes produites informent sur l'écart de la température de surface d'un site en milieu urbain en comparaison avec un milieu boisé, mais n'informent pas sur la valeur absolue de la température de surface. Les cartes des ICU doivent donc être interprétées selon la connaissance du climat régional, car un ICU dans une région nordique où la température estivale reste peu élevée est associé à une température plus faible et présentera des risques sanitaires moindres qu'un ICU dans le sud du Québec.

Comparaison entre différents centres de population

Étant donné que les limites des classes des écarts de température sont spécifiques pour chaque centre de population, des analyses comparatives des ICU entre plusieurs centres de population éloignés sont déconseillées ou exigent à minima de la prudence.

La consultation des limites des classes d'écart de température devient alors essentielle (Figure 6). Une reclassification des écarts de température selon les limites géographiques du projet envisagé serait une option à considérer.

Surestimation des ICU en zone agricole

Une autre limite concerne la surestimation possible, dans certaines zones agricoles, des écarts de températures qui s'avèrent plus élevés, même si la cause de l'écart de température n'est pas liée à l'urbanisation (Figure 7). Ceci s'explique par un comportement thermique similaire du sol nu et des surfaces des milieux bâties. Ainsi, en fonction de l'état de la production agricole et de la saison, un champ agricole peut présenter un écart de température plus élevé s'il est en sol nu ou moins élevé s'il est recouvert d'une culture. Des dates variables en termes d'acquisition des images en lien avec le calendrier du cycle de culture peuvent alors générer un changement important. Il est donc recommandé d'ignorer les éventuels ICU cartographiés en zones agricoles.

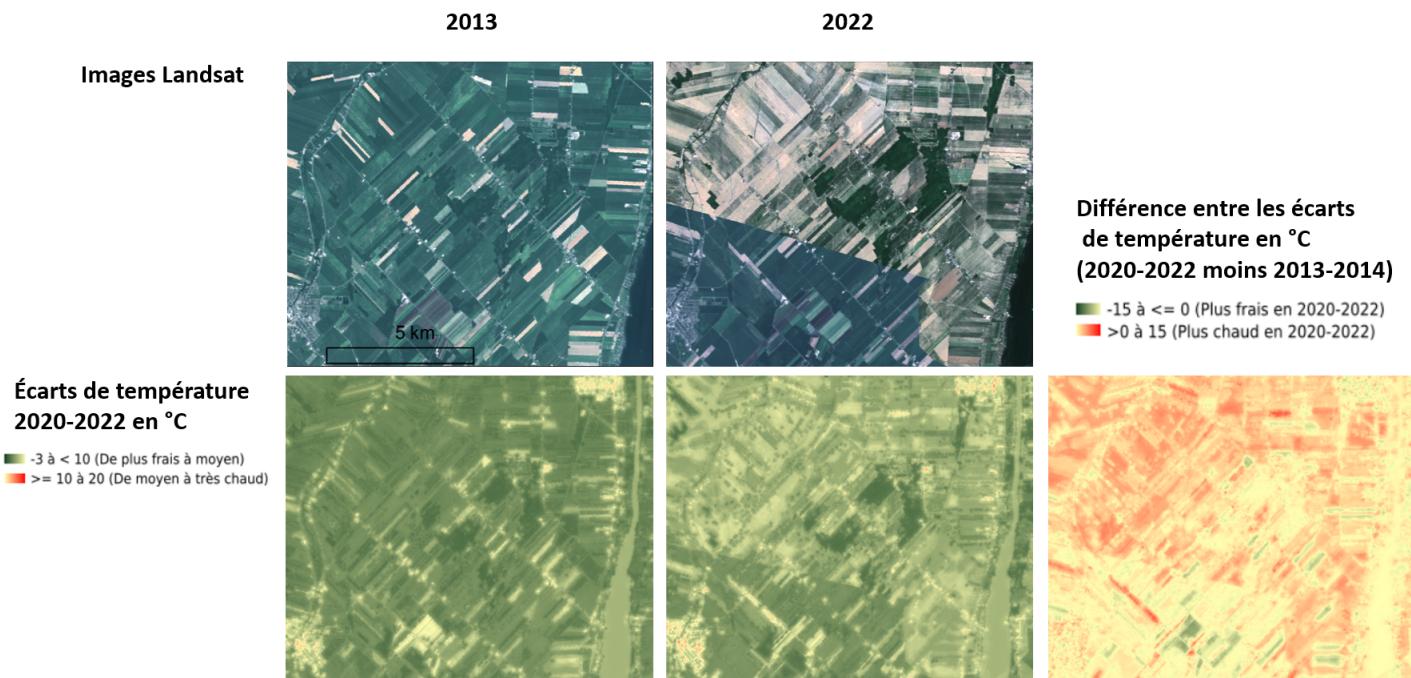


FIGURE 7 : Exemple de variation des écarts de température en fonction de l'état des travaux des champs (en culture ou sol nu).
Cet état change en fonction de la période d'acquisition de l'image. En 2013, les champs étaient en culture, alors qu'en 2022, dans la portion NE de l'image, une majorité des champs était à nu. De ce fait, les différences d'écarts de températures entre 2013 et 2022 sont plus importantes (prépondérance de la couleur rouge) dans la partie NE de l'image que dans le reste de l'image.



Annexe : Comment les écarts de température ont-ils été prédicts?

La méthode propose l'utilisation d'un modèle de prédiction des écarts de température de surface. Même si des données de température de surface modélisées à partir des données Landsat sont rendues disponibles par United States Geological Survey (USGS), celles-ci ne pouvaient être utilisées directement pour cartographier le territoire d'étude pour plusieurs raisons :

- Présence de nuages sur certaines portions d'images rendant la donnée de température indisponible;
- Différence des dates d'enregistrement des images ayant des conditions météorologiques diverses, rendant très complexe leur utilisation à l'échelle de l'écoumène du Québec;

→ Résolution faible de la donnée de température disponible (30 m de résolution) considérant les objectifs du projet (15 m de résolution).

Le modèle de prédiction proposé a permis de contourner ces enjeux en utilisant des variables qui sont moins susceptibles de fluctuer dans le temps et qui permettent ainsi d'obtenir une cartographie plus cohérente sur l'étendue spatiale du territoire d'étude.

La méthode suivie pour produire ces différentes cartes est résumée dans la figure 8. Elle présente (1) les données sources utilisées, (2) les activités de prétraitement, (3) l'élaboration du modèle de prédiction des écarts de températures de surface, et finalement les livrables, soit (4) les cartes de 2013 et 2022, et (5) les cartes d'analyses de changements entre 2013 et 2022. Les étapes menant à la carte des écarts de température sont décrites sommairement plus bas. Pour plus de détails, la méthodologie complète est disponible dans [5], [6].

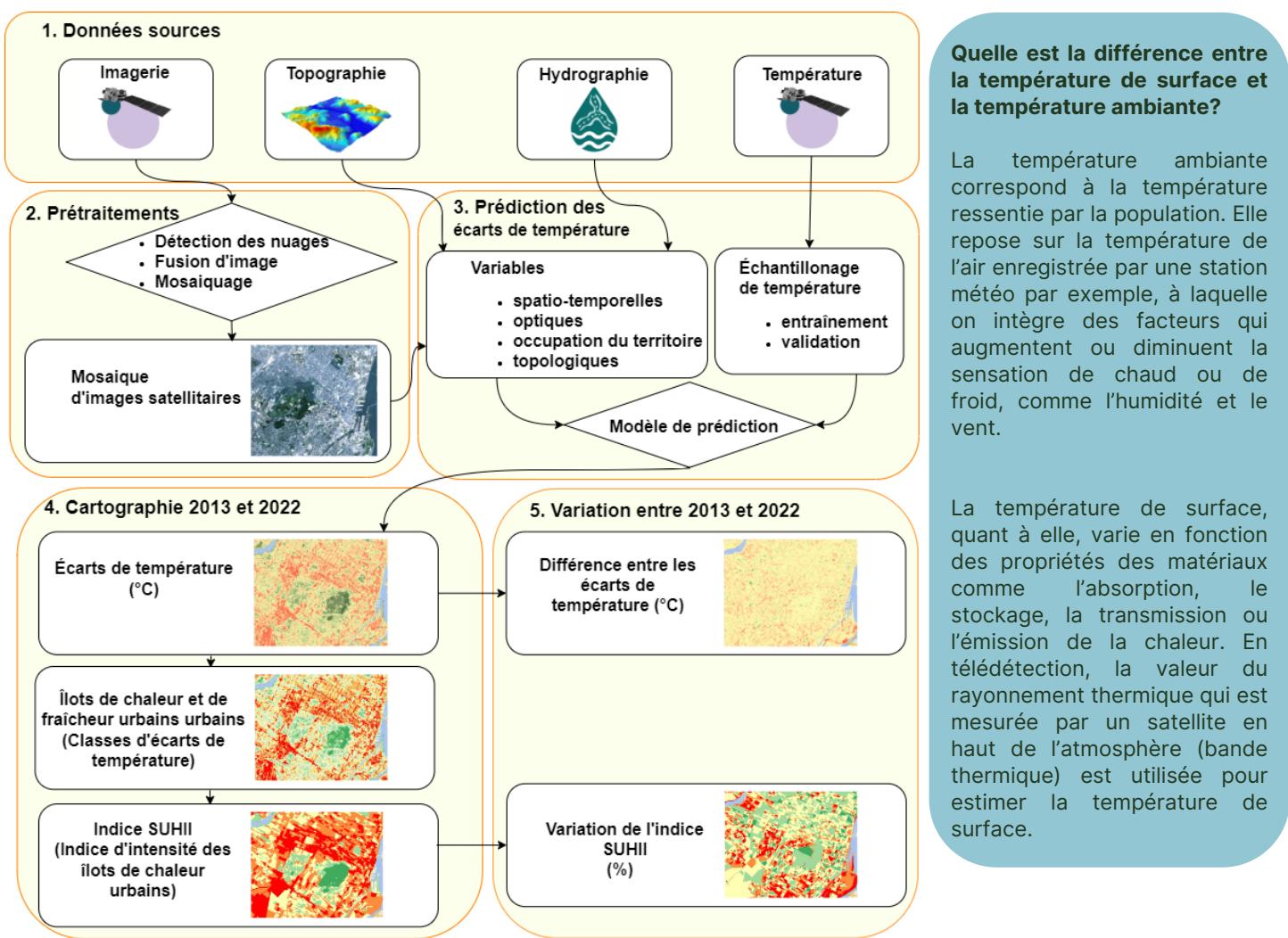


FIGURE 8: Schéma méthodologique



Données sources

Trois types de données ont été utilisées pour modéliser l'écart de température :

- **Imagerie** : images acquises avec les satellites Landsat 8 et 9 en période estivale. À cause de la présence importante des nuages dans certaines zones, les images n'étaient pas disponibles pour les deux années de référence visées. Des images de 2014 et 2021 ont alors été sélectionnées pour combler ce manque. Pour quelques zones, il a été nécessaire de prendre des images de 2015 et 2020 respectivement. La résolution spatiale des images est de 30 m pour les bandes multispectrales et 15 m pour la bande panchromatique;
- **Données topographiques** : elles proviennent du modèle numérique d'altitude de *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) produit par *United States Geological Survey*;
- **Données hydrographiques** : l'information provient de la Géobase du réseau hydrographique du Québec (GRHQ) et du Réseau hydrographique national (RHN);
- **Données de température** : Température de surface provenant du USGS, d'une résolution de 30 mètres.

Prétraitements

Le défi de réaliser la cartographie des écarts de température sur un grand territoire comme l'ensemble du Québec urbain consiste à avoir un jeu de données relativement homogène sur tout le territoire. Les images disponibles dépendent de la couverture nuageuse et du temps de revisite du satellite. Elles ont donc été acquises dans des conditions météorologiques très différentes, ce qui influence largement la température de surface enregistrée par le satellite. Plusieurs choix méthodologiques dans le prétraitement des images et dans le développement du modèle de prédiction des écarts de température ont été pris pour assurer la cohérence spatiale des résultats.

Les prétraitements suivants ont ainsi été apportés aux images satellitaires afin d'uniformiser le plus possible les données:

- **Détection de nuages** : Un algorithme d'apprentissage profond a été utilisé pour la détection de nuages et de leur ombrage sur le sol. Seules les parties des images sans nuages ont été retenues et intégrées à la mosaïque finale;
- **Fusion d'image** : Les bandes rouge, verte et bleue (résolution 30 m) ont été fusionnées (*pansharpening*) avec la bande panchromatique (15 m) pour augmenter à 15 m la résolution spatiale de l'image multispectrale utilisée;
- **Mosaïquage** : Le mosaïquage regroupe les parties d'images sans nuages pour en faire une image unique. Lorsque plusieurs images acquises à des dates différentes étaient disponibles pour un même pixel, un algorithme a été appliqué pour prioriser les images de l'année de référence (2013 ou 2022), les images acquises l'été (avec une priorité pour la semaine la plus chaude, soit la 30e) et les images qui permettent d'avoir une homogénéité dans la mosaïque (acquises à la même date sur une grande surface avec de très bonnes conditions météorologiques).

Prédiction des écarts de température

L'élaboration du modèle de prédiction comporte plusieurs étapes distinctes:

1. Sélection des données d'entraînement (à partir desquelles le modèle de prédiction est construit) et des données de validation du modèle;
2. Élaboration des relations mathématiques robustes entre les différentes variables explicatives retenues dans le modèle à partir des données d'entraînement;
3. Calcul des variables explicatives sur l'ensemble du territoire d'étude et application du modèle pour tout l'écoumène du Québec;
4. Validation du modèle et calcul de sa précision.



Données d'entraînement et de validation du modèle prédictif : Les données de température de surface de USGS (30 m de résolution) ont été utilisées pour l'entraînement du modèle. Ces données ont été obtenues elles-mêmes par modélisation à partir de la bande thermique de Landsat (100 m de résolution) et d'autres informations des satellites météorologiques.

Le modèle de prédiction des écarts de température a été entraîné à partir de données d'écarts de températures provenant de 46 images de 2013 sans nuages. Ces images ont été sélectionnées de manière à représenter la diversité des conditions rencontrées dans tout l'écoumène du Québec. Chaque image utilisée pour l'entraînement contient un seul point de référence en milieu forestier par rapport auquel ont été calculés les écarts de température des autres points échantillonnés sur la même image. Ainsi chaque paire de points constituée du point de référence et d'un autre point échantillonné servant à calculer les écarts de température pour l'entraînement du modèle a été acquise dans les mêmes conditions météorologiques. Les points d'échantillonnage ont été générés aléatoirement et stratifiés pour représenter de manière équilibrée chacune des catégories d'occupation du territoire (eau, sol, urbain mixte, urbain pur, végétation arborescente, végétation basse). Au total, 38 196 points ont été utilisés pour calculer les écarts de température à partir du produit de température de USGS. La majorité de ces points d'échantillonnage (80 %) a été utilisée pour entraîner le modèle d'apprentissage automatique du type Forêt aléatoire (Random forest) et ainsi créer une relation mathématique robuste permettant de prédire les écarts de températures à partir des variables explicatives. Les 20 % restants ont été utilisés pour la validation du modèle (voir page suivante).

Variables explicatives : Quatre types de variables ont été utilisées dans l'élaboration du modèle

- **Des variables spatio-temporelles** qui enregistrent la latitude, la longitude, l'altitude et la date de prise de l'image;
- **Des variables optiques** tirées des cinq bandes multispectrales de Landsat (B3 à B7) et huit indices spectraux (voir encadré « Qu'est-ce qu'un indice spectral? »);

- **Des variables d'occupation du territoire;** obtenues selon deux méthodes différentes et contenant les classes suivantes : eau, sol nu/agricole, urbain mixte, urbain pur, végétation arborescente et végétation basse pour la première classification (Figure 9) et surfaces imperméables, végétation, sol nu et eau pour la seconde;
- **Des variables topologiques** qui correspondent à une distance par rapport à des classes d'occupation de sol (Figure 9) ou de l'eau surfacique.

L'ordre d'importance des variables prédictives utilisé par le modèle de prédiction des écarts de température met en évidence les principaux facteurs qui influencent les ICU :

- **Les variables spatio-temporelles** qui ont le plus grand pouvoir prédictif dans le modèle et génèrent des différences importantes en lien avec la latitude, l'altitude et la période d'acquisition de l'image;
- **Les variables topologiques** qui arrivent en deuxième rang, plus particulièrement la distance à la canopée arborescente et la distance au bâti qui rendent compte de l'influence de la proximité des arbres et des surfaces imperméables sur la température de surface et sur les ICU/IFU;
- **Des indices spectraux** qui rendent aussi compte de l'importance de la végétation et de l'humidité dans la prédiction des écarts de température.

Qu'est-ce qu'un indice spectral?

Les indices spectraux sont obtenus par calculs de rapports de bandes spectrales du capteur ou des équations plus complexes appliquées aux bandes spectrales.

Un indice couramment utilisé est le NDVI, le Normalized difference vegetation index, calculé à partir des bandes spectrales B4 et B5. Il s'obtient ainsi : $(B5-B4)/(B5+B4)$. Les valeurs comprises entre 0 et 1 indiquent la présence et la vigueur de la végétation.

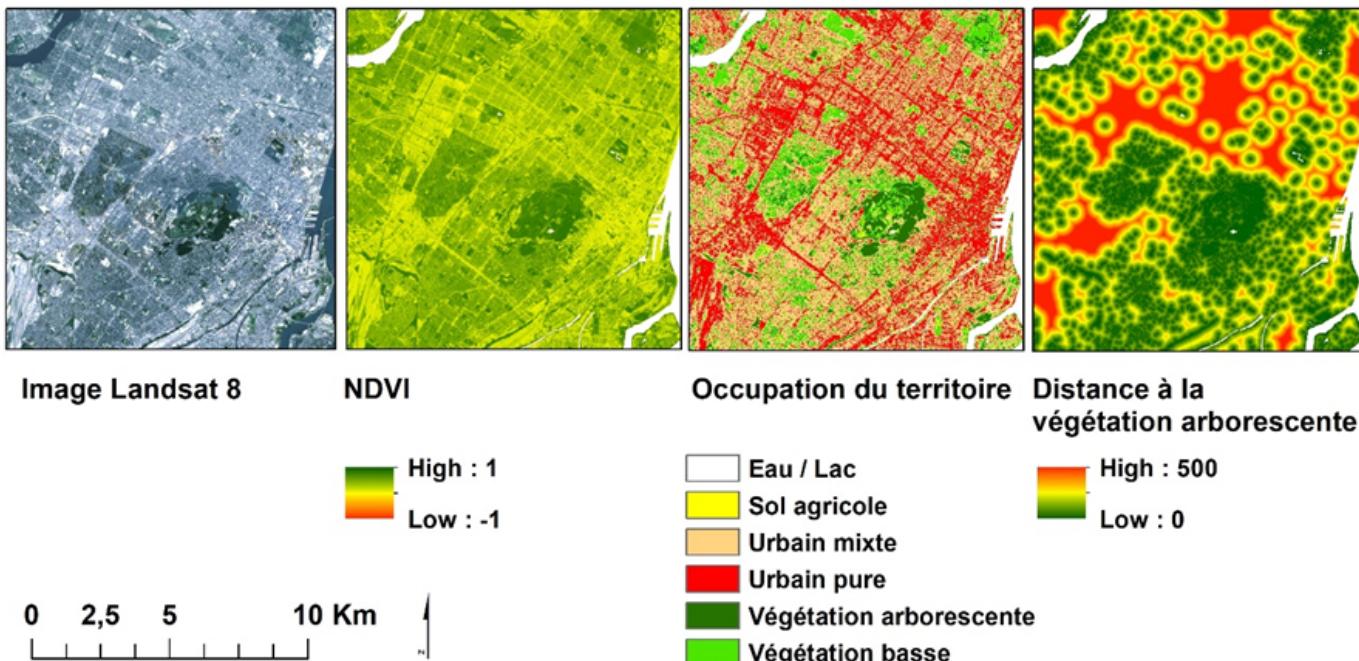


FIGURE 9: Exemple de variables optiques (NDVI), d'occupation du territoire (6 classes) et topologiques (distance par rapport à la végétation arborescente), Montréal.

Validation et précision du modèle : Une validation du modèle a été réalisée avec 20 % des points qui n'ont pas été utilisés pour développer le modèle (résiduels des points d'entraînement). La précision du modèle est satisfaisante, présentant une erreur quadratique moyenne (RMSE) de 1,99 °C et un coefficient de détermination R² de 0,81.

Certaines différences entre la valeur prédite par le modèle et la donnée de validation ne représentent pas en soi des erreurs de prédiction. Elles peuvent plutôt être expliquées tout d'abord par l'augmentation de la résolution spatiale de la donnée prédite, qui passe de 30 m pour la donnée de température issue du USGS ayant servi à la validation du modèle à 15 mètres pour la valeur de température prédite par le modèle (résolution des variables explicatives). Cette variation de la résolution peut entraîner des différences entre les valeurs prédites et celles utilisées pour la validation, sans pour autant que la valeur prédite soit une erreur.

Une autre explication des différences observées provient du choix des variables du modèle qui a été conçu pour générer un produit plus cohérent spatialement et réduire les effets de la différence de dates d'acquisition des images. Dans ce contexte, la valeur de température prédite est parfois plus représentative des conditions moyennes rencontrées et s'avère différente de la valeur issue du USGS qui est spécifique pour la journée d'acquisition de l'image.



Références

- [1] L.-M. Drapeau, M. Beaudoin, L. Vandycke, et M. Brunstein, « Mesures de lutte contre les îlots de chaleur urbains : mise à jour 2021 », Institut national de santé publique du Québec, Synthèse des connaissances, 2021.
- [2] E. Boulfroy, J. Khaldoune, F. Grenon, R. Fournier, et B. Talbot, « 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) », Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy inc. (CERFO) et Université de Sherbrooke, 2013.
- [3] Institut National de Santé publique du Québec (INSPQ), « Îlots de chaleur/fraîcheur urbains et écarts de température relatifs 2020-2022 », Données Québec. Consulté le : 31 octobre 2023. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/ilots-de-chaleur-fraicheur-urbains-et-ecarts-de-temperature-relatifs-2020-2022>
- [4] J. Augustine, G. Hodges, E. Dutton, J. Michalsky, et C. Cornwall, « An aerosol optical depth climatology for NOAA's national surface radiation budget network (SURFRAD) », Journal of Geophysical Research, vol. 113, juin 2008, doi : 10.1029/2007JD009504.
- [5] B. C. Budei, J. Marchal, F. Nininahazwe, M.-A. Genest, B. Bour, et M. Varin, « Cartographie des îlots de chaleur et de fraîcheur dans le Québec urbain à l'aide d'imagerie satellitaire Landsat-8/9 (2020-2021-2022) et analyse de changement », Rapport technique 2023-01, 2023.
- [6] J. Marchal, B. Bour, B. C. Budei, F. Nininahazwe, C. Armellin, et M. Varin, « Cartographie des îlots de chaleur et de fraîcheur dans le Québec urbain à l'aide d'imagerie satellitaire Landsat-8 (2013-2014) », Centre d'enseignement et de recherche de Sainte-Foy inc. (CERFO), Rapport 2022-29, 2022.

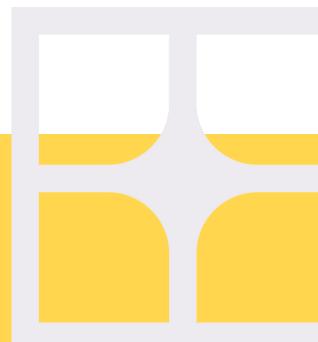
Remerciements : INSPQ (Madalina Burtan, Ray Bustinza, Laurie-Maude Drapeau, Antoine Saint-Amand)

Ce projet de technote est financé dans le cadre du Plan pour une économie verte 2030.



FORMATION
ACCOMPAGNEMENT
RECHERCHE
EN FORESTERIE

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



Communiquez avec notre équipe :

Mathieu Varin, M. Sc. mvarin@cerfo.qc.ca