

Rapport scientifique

Cartographie de la vulnérabilité et de l'exposition aux vagues de chaleur accablante des populations vivant dans les logements des communautés canadiennes



UNIVERSITÉ
LAVAL

Faculté de foresterie,
de géographie et de géomatique
Département de géographie



Canada

Financement :

Le département de géographie de l'Université Laval, dans le cadre du projet de cartographie de la vulnérabilité et de l'exposition aux vagues de chaleur accablante des populations, a reçu du financement dans le cadre du cycle Fondé sur les données du Défi d'offre de logement, Cependant, les opinions exprimées sont les opinions des auteurs et la SCHL n'accepte aucune responsabilité pour ces opinions.

Mots-clés :

Vagues de chaleur, vulnérabilité, exposition, îlots de chaleur urbain, indice synthétique, écoumène, cartographie dasymétrique, analyse en composante principale, télédétection, apprentissage machine, logement.

Référence à citer :

Brousseau, Y., Lalonde, B., Robitaille, M.-J., Vandersmissen, M.-H., Barrette, N., Tessier, K., Gilbert, J.-P., Giguère, M., Juteau, J., Lapointe, J., Piché, S. (2023). Rapport scientifique du projet de Cartographie de la vulnérabilité et de l'exposition aux vagues de chaleur accablante des populations. Département de géographie de l'Université Laval. 130 pages.

Les données contenues dans le document peuvent être citées, à condition d'en mentionner la source.

©Département de géographie de l'Université Laval

Résumé

De plus en plus fréquentes à travers le monde, les vagues de chaleur n'épargnent pas le Canada, où leur fréquence et leur intensité augmentent avec les changements climatiques. Cette menace pèse sur la santé de la population alors que la chaleur accablante est associée à une augmentation de la mortalité et de nombreux problèmes de santé. La vulnérabilité et l'exposition de la population varient dans le temps et dans l'espace, faisant en sorte que certains groupes sont plus à risque. Les effets des vagues de chaleur sur la santé et le bien-être des communautés sont majoritairement modulés par la capacité des personnes à accéder à des ressources, notamment à un logement adéquat. L'objectif principal de ce projet est d'élaborer une application cartographique interactive en ligne fournissant des informations valides sur la distribution géographique de la vulnérabilité et de l'exposition des populations de 156 régions urbaines du pays en spécifiant, à l'échelle de l'aire de diffusion, leur intensité. L'outil est destiné aux professionnels du milieu tout en demeurant accessible au grand public. Quatre indices ont été calculés (sensibilité, capacité à faire face, vulnérabilité et exposition) à partir de données socio-économiques, démographiques, de proximité des services et de caractérisation de l'environnement bâti et naturel associé à la vulnérabilité et l'exposition de la population aux vagues de chaleur accablante. Une carte des îlots de chaleur urbains a également été réalisée.

Abstract

Increasingly frequent around the world, heat waves are affecting Canada, where their frequency and intensity are increasing with climate change. This threat weighs on the health of the population, as oppressive heat is associated with increased mortality and many health problems. The vulnerability and exposure of the population vary over time and space, placing certain groups at greater risk. The effects of heat waves on the health and well-being of communities are mostly modulated by people's ability to access resources, including adequate housing. The main objective of this project is to develop an interactive online mapping application that provides valid information on the geographical distribution of populations' vulnerability and exposure in 156 urban regions of the country, specifying their intensity at the dissemination area scale. The tool is intended for professionals in the field while remaining accessible to the general public. Four indices were calculated (sensitivity, coping capacity, vulnerability, and exposure) based on socio-economic, demographic, proximity to services, and characterization of the built and natural environment data associated with the population's vulnerability and exposure to extreme heat waves. A map of urban heat islands has also been produced.

Équipe de travail

L'équipe de recherche du département de géographie de l'Université Laval qui a réalisé le présent projet est formée de membres du corps professoral, de personnel professionnel et étudiant.

Responsables du projet

Yves Brousseau, *chercheur principal, professeur agrégé*

Marie-Hélène Vandersmissen, *co-chercheuse, professeure titulaire*

Nathalie Barrette, *co-chercheuse, professeure titulaire*

Professionnels

Benoit Lalonde, *responsable de travaux pratiques et de recherche*

Marie-Janick Robitaille, *professionnelle de recherche*

Karine Tessier, *technicienne en travaux d'enseignement et de recherche*

Jean-Philippe Gilbert, *professionnel de recherche*

Étudiants

Mathilde Giguère, *étudiante à la maîtrise en sciences géographiques*

Janis Lapointe, *étudiante à la maîtrise en sciences géographiques*

Stéphanie Piché, *étudiante à la maîtrise en sciences géographiques*

Jérémi Juteau, *étudiant à la maîtrise en sciences géographiques*

Table des matières

1	Introduction.....	1
1.1	Problématique	1
1.2	Objectif	2
1.3	Territoire	3
2	Cartographie dasymétrique	5
2.1	Introduction.....	5
2.2	Validation de GHSL	6
2.2.1	Méthodologie	6
2.2.2	Analyses statistiques (tests d'accord interjuge)	10
2.2.3	Résultats.....	10
2.3	Cartographie dasymétrique	14
2.3.1	Méthodologie	14
2.3.2	Résultats.....	17
2.4	Discussion	18
2.5	Conclusion	19
3	Construction et cartographie des indices.....	20
3.1	Introduction.....	20
3.2	Objectifs.....	20
3.3	Cadre conceptuel et revue de la littérature.....	21
3.3.1	Pertinence de l'indice de vulnérabilité.....	21
3.3.2	Cadre conceptuel.....	21
3.3.3	Choix des indicateurs	22
3.3.4	Composition de l'indice	22
3.4	Méthodologie	23
3.4.1	Indice de sensibilité.....	23
3.4.2	Indice de capacité à faire face	31
3.4.3	Indice de vulnérabilité.....	36
3.4.4	Indice d'exposition.....	37
3.5	Résultats.....	44
3.5.1	Création des indices synthétiques	44
3.5.2	Représentation cartographique.....	72
3.6	Conclusion	78
4	Production de l'outil cartographique.....	79

4.1	Introduction.....	79
4.2	Objectifs.....	79
4.3	Choix de la solution technologique de cartographie Web	80
4.4	Élaboration et évaluation d'un prototype.....	80
4.4.1	Élaboration.....	80
4.4.2	Évaluation de l'outil par les intervenants du milieu.....	81
4.5	Élaboration d'une version finale de l'application	90
4.5.1	Couches cartographiée	90
4.5.2	Fonctionnalités sélectionnées.....	91
4.6	Site Web.....	92
4.7	Conclusion	94
5	Conclusion générale.....	95
6	Bibliographie.....	96
7	Annexes.....	106
7.1	Annexe 1 : Liste des 156 RMR et AR cartographiées	106
7.2	Annexe 2: Utilisation du prototype de l'outil cartographique par la ville de Victoria à l'été 2022	110
7.3	Annexe 3: Aide à la navigation (version ordinateur)	111
7.4	Annexe 4: Aide à la navigation (version tablette).....	114
7.5	Annexe 5: Aide à la navigation (version téléphone).....	116

Liste des figures

Figure 1: Modèle de géotraitements pour la production de la couche dasymétrique.....	17
Figure 2: Résultats de la représentation cartographique des zones résidentielles (couche dasymétrique). (A) Secteur de Calgary, Alberta. (B) Secteur de Toronto, Ontario. (C) Secteur de Québec, Québec. (D) Secteur de Halifax, Nouvelle-Écosse.....	18
Figure 3: Matrice de diagrammes de dispersion représentant l'effet du changement des paramètres sur l'optimisation des modèles.....	43
Figure 4: Contribution des variables à chaque composante de l'indice de sensibilité pour l'Alberta.....	46
Figure 5: Contribution des variables à chaque composante de l'indice de sensibilité pour la Colombie-Britannique.....	47
Figure 6: Contribution des variables à chaque composante de l'indice de sensibilité pour l'Île-du-Prince-Édouard.....	48
Figure 7: Contribution des variables à chaque composante de l'indice de sensibilité pour le Manitoba....	49
Figure 8: Contribution des variables à chaque composante de l'indice de sensibilité pour le Nouveau-Brunswick.....	50
Figure 9: Contribution des variables à chaque composante de l'indice de sensibilité pour la Nouvelle-Écosse.....	51
Figure 10: Contribution des variables à chaque composante de l'indice de sensibilité pour l'Ontario.....	52
Figure 11: Contribution des variables à chaque composante de l'indice de sensibilité pour le Québec.....	53
Figure 12: Contribution des variables à chaque composante de l'indice de sensibilité pour la Saskatchewan.....	54
Figure 13: Contribution des variables à chaque composante de l'indice de sensibilité pour Terre-Neuve-et-Labrador.....	55
Figure 14: Contribution des variables à chaque composante de l'indice de sensibilité pour les Territoires du Nord-Ouest et le Yukon.....	56
Figure 15: Contribution des variables à chaque composante de l'indice de capacité à faire face pour l'Alberta.....	59
Figure 16: Contribution des variables à chaque composante de l'indice de capacité à faire face pour la Colombie-Britannique.....	60
Figure 17: Contribution des variables à chaque composante de l'indice de capacité à faire face pour l'Île-du-Prince-Édouard.....	61
Figure 18: Contribution des variables à chaque composante de l'indice de capacité à faire face pour le Manitoba.....	62
Figure 19: Contribution des variables à chaque composante de l'indice de capacité à faire face pour le Nouveau-Brunswick.....	63
Figure 20: Contribution des variables à chaque composante de l'indice de capacité à faire face pour la Nouvelle-Écosse.....	64

Figure 21: Contribution des variables à chaque composante de l'indice de capacité à faire face pour l'Ontario	65
Figure 22: Contribution des variables à chaque composante de l'indice de capacité à faire face pour le Québec	66
Figure 23: Contribution des variables à chaque composante de l'indice de capacité à faire face pour la Saskatchewan	67
Figure 24: Contribution des variables à chaque composante de l'indice de capacité à faire face pour Terre-Neuve-et-Labrador	68
Figure 25: Contribution des variables à chaque composante de l'indice de capacité à faire face pour les Territoires du Nord-Ouest et le Yukon	69
Figure 26: Valeurs prédites et erreurs produites par le modèle, jeu de données test, province de Québec	71
Figure 27: Indice de sensibilité aux vagues de chaleur – Région d'Ottawa	73
Figure 28: Indice de capacité à faire face aux vagues de chaleur – Région d'Ottawa.....	74
Figure 29: Indice de vulnérabilité aux vagues de chaleur – Région d'Ottawa	74
Figure 30: Îlots de chaleur urbains– Région d'Ottawa	75
Figure 31: Indice d'exposition aux vagues de chaleur – Région d'Ottawa	76
Figure 32: Vulnérabilité et exposition (carte bivariée) – Région d'Ottawa.....	77
Figure 33: Historique des consultations de l'outil cartographique en ligne.....	110
Figure 34: Emplacement des widgets dans l'interface cartographique	111

Liste des tableaux

Tableau 1: Description du territoire d'étude	3
Tableau 2: Description du territoire d'étude par province ou territoire	4
Tableau 3: Matrice de confusion de l'analyse de la validation des données GHSL	12
Tableau 4: Analyse thématique des erreurs répertoriées dans la validation des données GHSL.....	14
Tableau 5: Variables de l'indice de sensibilité	24
Tableau 6: Nombre d'aires de diffusion par province ou territoire.....	28
Tableau 7: Calcul des variables de l'indice de sensibilité.....	30
Tableau 8: Jeux de données utilisés pour l'estimation de la dimension capacité à faire face de la vulnérabilité	32
Tableau 9: Données manquantes pour chaque province et territoire	34
Tableau 10: Nombre de pixels et paramètres utilisés pour la modélisation, par grande région canadienne	42
Tableau 11: Résultats du test de sphéricité de Bartlett pour l'indice de sensibilité	44
Tableau 12: Résultats de l'indice Kaiser-Meyer-Olkin pour l'indice de sensibilité	45
Tableau 13: ACP de l'indice de sensibilité pour l'Alberta	46
Tableau 14: ACP de l'indice de sensibilité pour la Colombie-Britannique	47
Tableau 15: ACP de l'indice de sensibilité pour l'Île-du-Prince-Édouard	48
Tableau 16: ACP de l'indice de sensibilité pour le Manitoba	49
Tableau 17: ACP de l'indice de sensibilité pour le Nouveau-Brunswick.....	50
Tableau 18: ACP de l'indice de sensibilité pour la Nouvelle-Écosse.....	51
Tableau 19: ACP de l'indice de sensibilité pour l'Ontario	52
Tableau 20: ACP de l'indice de sensibilité pour le Québec.....	53
Tableau 21: ACP de l'indice de sensibilité pour la Saskatchewan	54
Tableau 22: ACP de l'indice de sensibilité pour Terre-Neuve-et-Labrador	55
Tableau 23: ACP de l'indice de sensibilité pour les Territoires du Nord-Ouest et le Yukon.....	56
Tableau 24: Résultats du test de sphéricité de Bartlett pour l'indice de capacité à faire face	57
Tableau 25: Résultats de l'indice Kaiser-Meyer-Olkin pour l'indice de capacité à faire face	58
Tableau 26: ACP de l'indice de capacité à faire face pour l'Alberta.....	59
Tableau 27: ACP de l'indice de capacité à faire face pour la Colombie-Britannique	60
Tableau 28: ACP de l'indice de capacité à faire face pour l'Île-du-Prince-Édouard.....	61
Tableau 29: ACP de l'indice de capacité à faire face pour le Manitoba.....	62
Tableau 30: ACP de l'indice de capacité à faire face pour le Nouveau-Brunswick	63

Tableau 31: ACP de l'indice de capacité à faire face pour la Nouvelle-Écosse	64
Tableau 32: ACP de l'indice de capacité à faire face pour l'Ontario	65
Tableau 33: ACP de l'indice de capacité à faire face pour le Québec	66
Tableau 34: ACP de l'indice de capacité à faire face pour la Saskatchewan.....	67
Tableau 35: ACP de l'indice de capacité à faire face pour Terre-Neuve-et-Labrador.....	68
Tableau 36: ACP de l'indice de capacité à faire face pour les Territoires du Nord-Ouest et le Yukon	69
Tableau 37: Coefficients de détermination et erreur quadratique moyenne des modèles.....	70
Tableau 38: Corrélation en la température prédite par le modèle et des données externes	72
Tableau 39: Discrétisation et palettes de couleurs utilisées dans la représentation graphique des différentes couches.....	72
Tableau 40: Résultats de l'analyse qualitative des textes (Évaluation de la forme et du contenu de l'outil cartographique)	84
Tableau 41: Résultats de l'analyse qualitative des textes (Grands thèmes abordés).....	87
Tableau 42: Description de l'utilisation des widgets sélectionnés pour la version finale de l'application cartographique.....	91
Tableau 43: Widgets disponibles selon les différents types d'appareil informatique.....	92
Tableau 44: Liste complète des 156 RMR/AR de la zone d'étude	106

Liste des équations

Équation 1: Calcul de la température au sol à l'aide de la méthode Single-Channel	38
Équation 2: Indice de végétation par différence normalisée (NDVI)	39
Équation 3: Indice de cadre bâti par différence normalisée (NDBI).....	39
Équation 4: Erreur quadratique moyenne (RMSE).....	42
Équation 5: Coefficient de détermination (R2).....	43

Liste des abréviations, sigles et acronymes

ACP	Analyse en composantes principales
AD	Aire de diffusion
AR	Agglomération de recensement
AGOL	ArcGIS Online
BCCS	British Columbia Coroners Service
CERFO	Centre d'enseignement et de recherche en foresterie
DGUL	Département de géographie de l'Université Laval
ECDO	Environnement de couplage de données ouvertes
ESRI	Environmental Systems Research Institute
ExB	Experience Builder
FNCC	Fully convolutional neural networks
GHS	Global Human Settlement
GHSL	Global Human Settlement Layer
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
ICU	Îlot de chaleur urbain
ID	Îlot de diffusion
KMO	Test de Kaiser-Meyer-Olkin
NAD	North American Datum
NDBI	Indice de cadre bâti par différence normalisée
NDVI	Indice de végétation par différence normalisée
NIR	Bande du proche infrarouge
NRes	Non résidentiel
OSM	Open Street Map
ReLU	Rectified Linear Unit
Res	Résidentiel
RF	Random forest, forêts aléatoires
RMR	Région métropolitaine de recensement
RMSE	Root Mean Square Error

SIG	Système d'information géographique
SSE	Somme des carrés des différences entre les valeurs observées de la variable dépendante (y) et les valeurs prédites par le modèle
SST	Somme des carrés des différences entre les valeurs observées de la variable dépendante (y) et la moyenne de la variable dépendante (y)
SWIR	Bande de l'infrarouge à longueur d'onde courte
TIN	Triangulated irregular network
WGS	World Geodetic System

1 INTRODUCTION

1.1 PROBLÉMATIQUE

Les changements climatiques sont inévitables et observables partout sur la planète (Masson-Delmotte *et al.*, 2021). Au Canada, le taux de réchauffement estimé pour la période 1948-2016 est beaucoup plus important qu'à l'échelle mondiale (1,7 °C versus 0,8 °C) (Bush & Lemmen, 2019). Les impacts du réchauffement climatique se font donc ressentir fortement au pays, notamment avec l'augmentation de la fréquence des journées extrêmement chaudes (Zhang *et al.*, 2019). Plusieurs facteurs exacerbent la problématique des vagues de chaleur. Premièrement, en milieu urbain, le phénomène des îlots de chaleur aggrave la situation, alors que la différence de température que l'on peut observer entre certains secteurs de la ville comme les aires de stationnement asphaltées et les milieux ruraux et naturels en périphérie peut atteindre plusieurs degrés Celsius (Oke, 1987; Oke *et al.*, 2017). Or, en 2021, près de trois Canadiens sur quatre (73,7 %) vivaient dans l'un des grands centres urbains du Canada (Statistique Canada, 2022e). Deuxièmement, la population est vieillissante au pays. Selon les dernières données du recensement de 2021, la proportion de la population canadienne âgée de 65 ans et plus était d'environ 18,1 %, soit environ un Canadien sur cinq et cette proportion devrait continuer d'augmenter dans les prochaines années pour atteindre près de 25% d'ici 2031 (Statistique Canada, 2022b). Finalement, le climat va continuer à se réchauffer au cours des prochaines années, alors que d'ici 2050, pour certaines régions du pays, le nombre de jours où la température atteindra 30°C ou plus pourrait doubler et qu'au cours de la période 2051-2080, certaines régions pourraient observer plus de 50 jours par année avec un mercure atteignant les 30 degrés Celsius (Atlas climatique du Canada, 2019).

Cette menace pèse sur la santé de la population alors que la chaleur accablante est associée à une augmentation de la mortalité (Gasparrini *et al.*, 2015; Martin *et al.*, 2012). Plusieurs études montrent que la chaleur accablante est associée à une augmentation des problèmes de santé, notamment la recrudescence des maladies et pathologies respiratoires et cardiovasculaires de même qu'à un nombre accru de syncopes, de périodes d'épuisement, d'insolations ou de coups de chaleur (Adam-Poupart *et al.*, 2021; Hajat *et al.*, 2010; Gough, W., Anderson, V., & Herod, K. 2016). À l'été 2021, en Colombie-Britannique, on a recensé 619 décès liés à la chaleur. Quatre-vingt-treize pour cent (93%) d'entre eux ont eu lieu la semaine du 25 juin au 1^{er} juillet seulement, alors que le mercure est monté jusqu'à 49,6° degrés Celsius dans le village de Lytton (British Columbia Coroners Service, 2022).

La vulnérabilité et l'exposition de la population aux vagues de chaleur varient dans le temps comme dans l'espace, faisant en sorte que certains groupes sont plus à risque (Hajat *et al.*, 2010, Basu et Samet, 2002). À cet effet, une étude portant sur les effets de la vague de chaleur ayant sévi du 29 juin au 5 juillet 2018 dans la région de Laval montrait que les personnes habitant en zone de forte vulnérabilité étaient 1,5 fois plus susceptibles de mourir que celles en zone de moindre vulnérabilité (Centre intégré de santé et de services sociaux de Laval, 2019).

Les effets des vagues de chaleur sur la santé et le bien-être des communautés sont majoritairement modulés par la capacité des personnes à accéder à des ressources, notamment à un logement adéquat. Les organisations gouvernementales et non gouvernementales, qu'elles soient locales, régionales ou provinciales, ont à faire face aux conséquences sociales, sanitaires et économiques associées aux changements climatiques (Berry, Schnitter *et al.*, 2022).

Les données géographiques peuvent s'avérer particulièrement utiles afin d'identifier et de cartographier la vulnérabilité dans l'espace et le temps. De ce fait, celles-ci favorisent une meilleure compréhension des processus sous-jacents de la vulnérabilité, ce qui rend possible la formulation de stratégies d'atténuation plus efficaces. Les décideurs comme les citoyens et les citoyennes bénéficieraient du fait que les connaissances acquises par le biais de la recherche soient davantage accessibles au grand public, afin de rendre plus concrètes, au sein des instances locales et régionales, la prise de décisions, la définition de normes et l'établissement de procédures.

1.2 OBJECTIF

L'objectif principal de ce projet est d'élaborer une application cartographique interactive en ligne fournissant des informations valides sur la distribution géographique de la vulnérabilité et de l'exposition des principales communautés canadiennes aux vagues de chaleur, en spécifiant, pour chaque unité géographique, leur intensité. Ces outils permettent, selon nous, de rendre accessibles publiquement des informations significatives et propres au contexte de l'analyse géographique de la vulnérabilité des communautés vivant dans les grandes agglomérations canadiennes. Munies de ces informations, les autorités pourront intervenir afin de réduire les effets sanitaires que pourraient causer ces vagues de chaleur et réagir plus adéquatement lorsque ces aléas surviendront.

Les objectifs spécifiques sont :

- Produire une cartographie dasymétrique de la zone d'étude afin de représenter les différentes zones de l'écosystème (zones habitées seulement).

- Construire plusieurs indices cartographiables afin d’estimer différentes dimensions de la vulnérabilité et de l’exposition aux vagues de chaleur en considérant l’échelle géographique appropriée pour que les autorités désignées élaborent adéquatement diverses mesures de prévention et d’intervention.
- Produire une application en ligne permettant de diffuser les indices de vulnérabilité et d’exposition aux vagues de chaleur pour 156 régions urbaines du Canada.

Afin de correspondre aux objectifs spécifiques du projet, ce rapport est divisé en trois chapitres, soit :

- Cartographie dasymétrique
- Construction et cartographie des indices
- Production de l’outil cartographique

1.3 TERRITOIRE

Le territoire auquel s’est intéressé notre projet est composé de 156 régions urbaines: 42 régions métropolitaines de recensement (RMR) et 114 agglomérations de recensement (AR) canadiennes (Tableaux 1 et 2), soit 83,9% de la population canadienne ou plus de 31 millions de personnes (Statistique Canada, 2022d). La liste complète des RMR se trouve en annexe 1. Les indicateurs ont été calculés à l’échelle de l’aire de diffusion de 2021, soit la plus petite région géographique normalisée pour laquelle toutes les données du recensement canadien sont diffusées. Une aire de diffusion regroupe généralement entre 400 et 700 citoyens (Statistique Canada, 2022c). L’année de recensement 2021 a été retenue puisqu’il s’agit du recensement le plus récent. Également, puisque nous cherchions à représenter la vulnérabilité de la population à l’échelle la plus fine possible, soit l’environnement dans lequel réside l’individu, une cartographie dasymétrique de l’écoumène a été appliquée sur les aires de diffusion pour déterminer les zones habitées et ne représenter que celles-ci (voir chapitre 2).

Tableau 1: Description du territoire d’étude

Pays	Type de région urbaine	Nombre de régions urbaines	Population en 2021	Pourcentage de la population sur la population totale du Canada
Canada	AR	114	3 753 167	10,1
	RMR	42	27 281 119	73,7
	Total	156	31 034 286	83,9

Tableau 2: Description du territoire d'étude par province ou territoire

Provinces	Type de région urbaine	Nombre de régions urbaines	Population en 2021	Pourcentage de la population sur la population totale par province
Alberta	AR	13	385 351	9,0
	RMR	4	3 124 615	73,3
	Total	17	3 509 966	82,3
Colombie-Britannique	AR	21	676 430	13,5
	RMR	7	3 801 318	76,0
	Total	28	4 477 748	89,5
Île-du-Prince-Édouard	AR	2	97 015	62,9
	RMR	0	0	0,0
	Total	2	97 015	62,9
Manitoba	AR	5	131 034	9,8
	RMR	1	834 678	62,2
	Total	6	965 712	72,0
Nouveau-Brunswick	AR	4	93 110	12,0
	RMR	3	396 940	51,2
	Total	7	490 050	63,2
Nouvelle-Écosse	AR	4	205 801	21,2
	RMR	1	465 703	48,0
	Total	5	671 504	69,3
Ontario	AR	27	1 057 651	7,4
	RMR	16	11 742 189	82,6
	Total	43	12 799 840	90,0
Québec	AR	25	817 111	9,6
	RMR	7	6 136 400	72,2
	Total	32	6 953 511	81,8
Saskatchewan	AR	8	180 382	15,9
	RMR	2	566 697	50,0
	Total	10	747 079	66,0
Terre-Neuve-et-Labrador	AR	3	57 029	11,2
	RMR	1	212 579	41,6
	Total	4	269 608	52,8
Territoires du Nord-Ouest	AR	1	20 340	49,5
	RMR	0	0	0,0
	Total	1	20 340	49,5
Yukon	AR	1	31 913	79,3
	RMR	0	0	0,0
	Total	1	31 913	79,3

2 CARTOGRAPHIE DASYMÉTRIQUE

2.1 INTRODUCTION

L'un des défis majeurs de ce projet se trouvait initialement dans l'élaboration d'une représentation cartographique fidèle de la distribution géographique des milieux résidentiels. Afin de mieux visualiser ces milieux, notre équipe a découpé les aires de diffusion à l'aide d'un fichier représentant l'écoumène de la zone habitée pour l'ensemble du pays. En d'autres termes, nous avons produit une carte dite dasymétrique.

On nomme cartographie dasymétrique un type de cartographie qui permet de circonscrire ou de pondérer des zones habitées à l'aide de données complémentaires. Il est ainsi possible d'ajouter de la précision aux divers types de données utilisées pour la représentation cartographique de la distribution de la population ou de la densité de population à l'intérieur d'une zone urbaine, par exemple. Bhaduri *et al.* (2007), Linard *et al.* (2011) et Archila Bustos *et al.* (2020) décrivent la cartographie dasymétrique comme étant une méthode qui repose sur la relation supposée entre la densité de population et différentes caractéristiques du territoire cartographié, notamment la présence de plans ou de cours d'eau, la topographie (pentes), la présence de route, etc. En fait, toute caractéristique ou donnée informant sur le nombre exact de personnes en un point précis ou une surface déterminée peut être utilisée pour affiner les données de recensement désagrégées à l'échelle d'une fine grille sur un territoire.

Plusieurs fichiers cartographiques existent pour représenter l'écoumène au Canada, par exemple [l'écoumène produit par Ressources naturelles Canada](#) ou encore [l'écoumène de population de Statistique Canada](#). Cependant, pour la majorité de ces fichiers, le niveau de précision ne répondait pas aux exigences minimales de représentativité du milieu résidentiel pour nos besoins de cartographie. Ainsi, une large revue de littérature portant sur la cartographie dasymétrique a été menée. Cette dernière a permis d'identifier et d'acquérir une couche de données géospatiales nettement plus précise ([Global Human Settlement Layer — GHSL](#)). Il s'agit d'une référence en termes de représentation de la distribution de la population sur un territoire. En effet, plusieurs auteurs identifient ce produit comme étant l'un des meilleurs produits de cartographie des milieux bâtis et de la population à ce jour (Klotz *et al.*, 2016; Florczyk *et al.*, 2020). Une rigoureuse validation a également été menée sur cette couche. Considérant les résultats concluants du processus de validation, une méthodologie de production d'une couche dasymétrique à partir de la couche GHSL a été élaborée.

Une revue de littérature inspirée des méthodes de revues systématiques a été menée à l'hiver et à l'été 2022. Cette revue avait pour objectif principal de guider l'équipe quant aux démarches à entreprendre pour obtenir des données géospatiales représentant la distribution géographique des milieux résidentiels. L'état des connaissances et des méthodes actuelles concernant la cartographie à fine échelle des populations a ainsi été mis en évidence. La revue de littérature s'est effectuée autour de deux concepts principaux, soit la notion d'établissement ou de population humaine et la notion de cartographie ou d'outils de cartographie. Les résultats de cette revue ont ensuite été triés en plusieurs étapes pour conserver uniquement les articles pertinents afin de poursuivre la réalisation du projet.

Plusieurs jeux de données représentant la distribution géographique de la population ont été inventoriés à cette étape. Différentes caractéristiques propres à chaque jeu de donnée (résolution spatiale, année de couverture, élément principal représenté, etc.) ont été recensées. Cette démarche a permis à l'équipe d'arrêter son choix et de continuer les démarches avec la validation du produit GHSL.

2.2 VALIDATION DE GHSL

2.2.1 Méthodologie

La couche de données ayant fait l'objet du processus de validation est le produit GHS BUILT C FUN E2018. Cette couche fait partie de la dernière version du projet Global Human Settlement Layer rendu disponible en ligne en juin 2022. Ce projet comprend un ensemble de jeux de données et d'outils disponibles gratuitement en ligne permettant d'évaluer la présence humaine sur la planète. Le projet est mené par le Centre commun de recherche de la Commission européenne. La couche validée possède la caractéristique d'identifier trois classes fonctionnelles d'occupation du sol, soit le non-bâti, le bâti résidentiel et le bâti non résidentiel (Schiavina et *al.*, 2022). C'est principalement en raison de cette caractéristique que la couche a été retenue par l'équipe pour le projet actuel.

Le processus de validation a débuté par un échantillonnage de zones dans la couche GHSL permettant de vérifier la cohérence des classes d'occupation du sol avec l'occupation actuelle réelle. La construction de la zone d'étude pour l'échantillonnage s'est faite en deux étapes. Premièrement, la couche GHS a été découpée pour que les limites de cette couche correspondent aux limites des grandes villes canadiennes. Deuxièmement, une zone tampon d'un kilomètre a été générée autour des zones classées comme bâties résidentielles et bâties non résidentielles afin de limiter le nombre de points d'échantillonnage dans les zones non habitées. Ainsi, les zones situées à l'intérieur du

périmètre des grandes villes canadiennes qui sont à plus d'un kilomètre d'un pixel identifié comme zone bâtie ont été exclues de la zone d'échantillonnage.

Par la suite, suivant les recommandations d'Olofsson et *al.* (2014), un plan d'échantillonnage stratifié par ville et classe d'occupation du sol a été élaboré afin de distribuer 33 010 points de validation dans la zone d'étude. Comme il était souhaitable de pouvoir valider l'exactitude des différentes classes d'occupation du sol, cette méthode d'échantillonnage était la plus appropriée (Stehman, 2009) Un semis de points aléatoires a été dispersé à l'aide d'une grille de 6,7 km². Un point par maille de la grille a été généré et les points n'étant pas situés dans la zone résidentielle agrandie (avec une zone tampon de 1 km) ont alors été retirés. Le paramètre de 6,7 km² a été choisi par un processus itératif pour obtenir un nombre de points total (33010) permettant une bonne couverture du territoire à l'étude tout en respectant les ressources disponibles en termes de temps et de main-d'œuvre au sein de l'équipe. De ce nombre, 25 142 points ont été dispersés sur l'ensemble de la zone décrite, sans distinction de classe. Les 7 868 points supplémentaires ont été ajoutés en suréchantillonnage uniquement dans les zones bâties résidentielles et non résidentielles (sans la zone tampon) pour permettre de mieux représenter et évaluer les zones habitées, considérant qu'une grande proportion de la zone d'étude est classée comme non bâtie.

Le processus de validation a été effectué à l'aide d'une application cartographique web déployée sur ArcGIS online. L'application a permis de compiler efficacement l'entrée de données des cinq membres de l'équipe simultanément mobilisés pour la validation. Le territoire à l'étude a été séparé par secteurs qui étaient attribués aux différents membres. Pour chaque point échantillonné, les membres ont comparé la classe indiquée par la couche de données GHS aux observations faites à l'aide d'images satellitaires. L'information a été saisie pour chaque point de l'échantillon. Un menu déroulant permettait de choisir la classe d'occupation du sol observée sur l'imagerie satellitaire et de la comparer avec la classe indiquée par la couche GHS. Ces enregistrements ont permis de produire et d'analyser une matrice de confusion, qui représente la base d'une analyse quantitative dans la validation d'une couche géospatiale (Strahler et *al.*, 2006; Stehman, 2009). Parallèlement, une observation générale de la couche GHS sur l'image satellitaire a été effectuée, tel que suggéré par Olofsson et *al.* (2014). Cette observation générale avait pour but de repérer des erreurs en dehors des points de l'échantillon. Les erreurs en dehors des points de l'échantillon n'ont donc pas toutes été relevées, mais une partie de celles-ci ont été répertoriées sous la forme de points supplémentaires. Ainsi, pour chaque point ajouté à leur discrétion, les membres devaient inscrire la catégorie de la couche GHS, la catégorie des observations d'imagerie satellitaire ainsi qu'une explication sommaire de l'erreur observée. Cette étape supplémentaire a permis de produire une analyse qualitative de

qualité de la couche GHS complémentaire à la matrice de confusion. Cette approche est suggérée par Strahler et al. (2006).

Au niveau technique, il est important de prendre en considération le fait que certains aspects hors du contrôle de l'équipe de recherche ont pu engendrer des biais dans les résultats du processus de validation. Deux principales sources d'incertitudes ont été identifiées. La première concerne la correspondance entre l'année de production de l'imagerie satellitaire par rapport à l'année de production de la couche de données GHS. Dans l'application cartographique utilisée pour la validation, la date de production de l'imagerie satellitaire affichée varie en fonction des secteurs géographiques ainsi que de la résolution spatiale. La couche GHS, pour sa part, intègre des données produites en 2018 uniquement. Certaines erreurs identifiées peuvent donc être causées par cette non-concordance temporelle. La deuxième concerne une problématique de projection cartographique. En effet, une imprécision a été introduite dans les données en raison des systèmes de coordonnées différents de la couche GHS (Mollweide [monde] avec datum WGS 1984) et de la couche de points pour la validation (NAD 1983). Lorsque la jointure spatiale entre les deux couches a initialement été réalisée, les bonnes transformations de projections n'ont pas été appliquées. Cela a entraîné des erreurs dans le résultat de la jointure, faisant en sorte que certains points ont été associés à une mauvaise catégorie de la couche GHS. Le problème est le suivant : sur la carte, un point superpose une classe GHSL (bâti résidentiel, non résidentiel ou non bâti) qui n'est pas la même que la classe GHSL indiquée dans les données descriptives de la couche. Pour résoudre ce problème, quelques étapes ont dû être mises en œuvre. Tout d'abord, la couche GHS a été convertie correctement en NAD 1983. Une nouvelle jointure spatiale entre la couche GHS convertie en NAD 1983 et la couche des points (également en NAD 1983) a ensuite été réalisée. Les résultats de la jointure initiale et de la nouvelle jointure ont enfin été comparés dans le but d'identifier et de corriger les points contenant des informations erronées. Ce sont 468 points sur le total de 33 010 qui ont dû être corrigés. Les erreurs générées par les projections cartographiques ont également entraîné quelques décalages au niveau de la position des plans d'eau sur une certaine partie du territoire. Cette erreur était cependant marginale. Aucune correction particulière n'a été apportée puisque l'équipe juge que cette erreur n'a pas eu d'effet considérable sur les résultats du processus de validation.

Certains aspects liés à la nature humaine du jugement porté par les personnes effectuant la validation sont également à prendre en considération. Olofsson et al. (2014) explique d'ailleurs très bien cette source de variabilité et de biais dans les résultats de tout processus de validation. La principale source d'hétérogénéité dans l'interprétation faite par les juges concerne les limites entre les différentes classes identifiées par la couche GHS. En effet, malgré l'utilisation de critères de décision, les limites

des zones restent plus ambiguës de manière générale que l'intérieur des différentes zones de classes d'occupation du sol. À première vue, l'identification de la classe du bâti non résidentiel de GHSL est moins constante que pour les autres types de classes. Cela entraîne nécessairement plus d'incertitude pour les juges au niveau de la validation lorsqu'il est question de cette classe d'occupation du sol. Pour contrôler ces éventuels biais et s'assurer de la validité du processus, deux tests d'accord interjuge ont été réalisés (voir 2.2.2 Analyses statistiques (tests d'accord interjuge)). De plus, comme l'échantillon a été bâti en fonction des classes d'occupation de la couche GHS, il est possible que certaines erreurs internes aient été induites. Cette manière de procéder a pu rendre certaines erreurs plus difficiles à repérer pour les juges puisque la couche GHS donne des points de repère même si c'est elle qui est validée.

Les critères de décision quant aux modalités de la classification ont été établis lors des discussions de groupe avant de faire un retour sur le test initial d'accord interjuge. De manière générale, tout bâtiment de nature résidentielle (maison, immeuble à logements, camping, hôtel, etc.) a été considéré comme du bâti résidentiel. À cette catégorie s'ajoutent également les immeubles mixtes, ayant par exemple un étage commercial et un étage résidentiel. Pour ce qui est des routes, des bordures et de la végétation urbaine, quelques principes bien définis permettent de prendre une décision quant à la catégorie à choisir. Les routes à l'intérieur de quartiers résidentiels, par exemple, sont considérées comme une surface résidentielle puisqu'il s'agit du même environnement construit et habité. De manière générale, une surface est considérée comme résidentielle si elle est entourée d'un milieu résidentiel, mais qu'elle n'est pas suffisamment grande (plus ou moins un pixel) pour contenir un autre type de milieu. Par contre, dans le contexte d'un bâtiment résidentiel plus isolé, le critère de distance de 10 m du bâtiment a été établi. C'est-à-dire que si le point échantillonné est situé à plus de 10 m du bâtiment, la catégorie choisie correspondra plutôt à du non-bâti. Ce même critère est également appliqué à la marge des milieux résidentiels. La distance critique a été définie à 10 m afin de ne pas s'attarder à des imprécisions plus petites que la résolution de la couche.

Dans le cas des bordures, par exemple entre quartiers résidentiels, zones industrielles, forêts, terrains vacants, etc., le critère de distance de 10 m s'applique de la même façon que pour les routes. Enfin, dans le cas de la végétation, si un parc urbain a des dimensions supérieures à 10 m par 10 m, il est considéré comme un espace non-bâti. Si les dimensions de l'espace végétalisé sont inférieures à 10 m par 10 m, l'espace végétalisé est plutôt considéré comme étant intégré au milieu bâti qui l'entoure (souvent résidentiel).

Pour ce qui est des zones bâties non résidentielles, le critère général de distance de 10 m s'applique également. Ainsi, tout bâtiment ou structure de nature non résidentielle et son environnement immédiat (moins de 10 m de distance) sont considérés comme une surface bâtie non résidentielle.

En ce qui concerne la catégorie du non-bâti, tout élément du territoire correspondant à autre chose que des bâtiments, tels que la végétation, les routes, les surfaces minérales, les cultures, etc., est considéré comme tel. Il peut y avoir une certaine ambiguïté si l'on pense à certaines structures humaines n'étant pas des bâtiments en soi, par exemple les carrières, les mines, les structures portuaires, etc. Dans ces cas, les structures bâties ont généralement été considérées comme des zones bâties non résidentielles auxquelles la règle de distance de 10 m a été appliquée.

2.2.2 Analyses statistiques (tests d'accord interjuge)

Le processus de validation s'est poursuivi avec un test préliminaire pour permettre de mieux définir les paramètres se rapportant au plan d'échantillonnage et aux critères de décision ainsi que pour évaluer l'accord interjuge entre les cinq membres de l'équipe mobilisés pour la validation. Deux types d'échantillonnage (point unique et points multiples) ont été vérifiés en séparant les points à valider dans deux zones géographiques distinctes, soit Kingston en Ontario et Sherbrooke au Québec. Pour la région de Kingston, 20 points multiples (5 points par localisation avec un décalage de 10 m et de 20 m) ont été générés, alors que, pour la région de Sherbrooke, 20 points simples ont été générés. Dans les deux cas, 10 points ont également été ajoutés dans les zones bâties identifiées par la couche GHS pour assurer une meilleure représentativité de ces secteurs. C'est donc un total de 140 points qui ont été validés. Pour ce test et l'ensemble du processus, cinq membres de l'équipe ont pris part à la validation. Ce test d'accord interjuge avait donc comme objectif d'assurer la cohérence entre les décisions des personnes effectuant la validation. Il s'agit d'une mesure quantitative statistique du degré de consensus pour une mesure qualitative. Une fois le processus de validation terminé, un deuxième test d'accord interjuge a été mené dans le but de contrôler le biais lié à la part d'interprétation dans la validation des points échantillonnés. Pour ce deuxième test, un échantillon de 500 points situés dans la RMR de Saguenay au Québec a été validé, encore une fois, par cinq membres de l'équipe.

2.2.3 Résultats

De manière globale, une forte concordance entre les décisions des juges a été observée (Kappa de Fleiss et de Light = 0,85). Cependant, la concordance entre les différentes paires de juges varie (kappas entre 0,73 et 0,96), indiquant une certaine variabilité dans la concordance des décisions entre

quelques membres de l'équipe. Cet exercice a permis de préciser les critères de décision avant de commencer la validation de la couche de GHSL, ce qui a conséquemment permis d'obtenir une plus grande cohérence entre les membres de l'équipe dans la réalisation du processus. En outre, le test a permis de déterminer plus précisément le temps et les ressources humaines à prévoir pour effectuer l'ensemble du processus. De manière globale, la cohérence entre les décisions des différents juges était toujours forte lors du deuxième test et même légèrement supérieure que lors du premier test (kappa de Fleiss et de Light = 0,87). La cohérence était par ailleurs plus constante entre tous les membres de l'équipe (kappas variant de 0,83 et 0,93) pour les différentes paires de juges.

Une fois les points échantillonnés évalués un par un par l'équipe, l'information recueillie pendant le processus a été traitée statistiquement. Une matrice de confusion (tableau 3) a été générée pour lire et analyser les résultats du processus de validation, c'est-à-dire l'exactitude de la couche GHS par type de classe fonctionnelle d'occupation du sol.

La matrice de confusion révèle que parmi les 6110 observations de la classe du bâti résidentiel, 5956 (97,5 %) points ont été classés correctement par GHSL. Cependant, GHSL a identifié un total de 8803 points dans cette catégorie. Dans ce total, 1293 (14,7 %) points étaient en réalité situés dans des zones bâties non résidentielles et 1554 (17,7 %) dans des zones non bâties. Cela laisse croire que GHSL détecte et cartographie la grande majorité des milieux bâtis résidentiels et surestime dans une certaine mesure leur présence. En effet, un certain nombre d'éléments sont fréquemment identifiés à tort comme des zones bâties résidentielles (ces erreurs sont décrites plus en détail dans les prochains paragraphes).

En ce qui concerne les 1926 observations de la classe du bâti non résidentiel, 593 (30,8 %) points ont été correctement répertoriés par GHSL. Par ailleurs, GHSL identifie un total de 695 points dans cette classe fonctionnelle d'occupation, dont 10 (1,4 %) qui sont en réalité situés dans une zone de bâti résidentiel et 92 (13,2 %) dans des espaces non bâtis. Il semble donc que GHSL n'est pas en mesure de reconnaître une part relativement importante des milieux bâtis non résidentiels. Autrement dit, la couche GHSL omet de répertorier une partie de ces milieux et sous-estime donc leur présence. De plus, il semble qu'il y ait une certaine confusion entre les milieux bâtis non résidentiels et les milieux non bâtis au sein de la couche GHS. Ces différentes remarques quant à la classe des milieux bâtis non résidentiels ont été soulevées par les membres de l'équipe avant même que les résultats de la validation ne soient analysés, comme mentionné dans les sources d'incertitude. Le problème majeur observé dans l'identification de cette classe est que les bordures de ce type de milieux sont identifiées la plupart du temps comme un milieu bâti résidentiel sans doute en raison des caractéristiques de la

surface au sol. Cette erreur contribue à la fois au phénomène de surestimation du milieu bâti résidentiel et à la sous-estimation du milieu bâti non résidentiel.

Du côté de la classe fonctionnelle du non bâti, des 24 974 points classés comme tels par les observations, GHSL en répertorie 23 328 (93,4 %) correctement. Au niveau de GHSL, un total de 23 512 points sont identifiés dans la classe du non bâti. Dans ce total, 144 (0,6 %) points sont classifiés comme du bâti résidentiel et 40 (0,2 %) comme du bâti non résidentiel. Le constat est qu'au niveau de l'identification de cette classe d'occupation, GHSL performe mieux que pour les deux autres classes, ce qui est normal considérant le fait que les caractéristiques au sol de cette classe diffèrent davantage des deux classes de bâti que les deux classes de bâti entre elles.

Les analyses de validation ont révélé un accord substantiel entre ce qui est représenté cartographiquement par la couche GHSL et les observations sur le terrain ($Kappa = 0,769$). De manière générale, GHSL et les observations sur le terrain sont les mêmes pour 90,5 % des points validés. L'interprétation de la matrice de confusion permet de préciser que les erreurs dans GHSL concernent principalement la distinction entre le bâti résidentiel (surestimé) et le bâti non résidentiel (sous-estimé).

Tableau 3: Matrice de confusion de l'analyse de la validation des données GHSL

		GHSL			Total
		Bâti résidentiel	Bâti non résidentiel	Non bâti	
Observations	Bâti résidentiel	5956	10	144	6110
	Bâti non résidentiel	1293	593	40	1926
	Non bâti	1554	92	23 328	24 974
	Total	8803	695	23 512	33 010

Les points supplémentaires ajoutés manuellement par les juges pendant le processus de validation répertorient des erreurs aperçues en parcourant la couche GHS. Il s'agit donc d'erreurs en dehors des points échantillonnés. Cependant, l'analyse de ces points supplémentaires peut donner une perspective pertinente pour expliquer et caractériser des erreurs de la couche GHS également dans l'échantillon de points, considérant que la majorité des erreurs ont un caractère répétitif. Une analyse qualitative a été menée pour lire et analyser les points supplémentaires. À partir du champ de commentaire ainsi que du champ de la catégorie de l'imagerie satellitaire, une classification par

thématique ou type d'erreur a été élaborée (tableau 4). Chaque point supplémentaire a ensuite été associé à une thématique en fonction de ses données descriptives.

Dix-sept thématiques caractérisent ainsi l'ensemble des 4210 points supplémentaires. Chaque type (thématique) d'erreur a comme source une confusion dans GHSL, soit entre le milieu bâti et non bâti, soit entre milieu bâti résidentiel et le milieu bâti non résidentiel (Res/NRes). En ce sens, 61,7 % des erreurs répertoriées ont pour source une confusion entre les classes de bâti (Res/NRes), alors que le 38,3 % restant des erreurs répertoriées prennent leur source dans une confusion entre les classes de non bâti et du bâti en général. La plus grande proportion d'erreurs attribuables à la différenciation par GHSL du milieu bâti résidentiel par rapport au milieu bâti non résidentiel concorde avec les résultats de la validation des points de l'échantillon.

Les différentes thématiques permettent parfois d'identifier des éléments précis et problématiques dans l'identification de la bonne classe d'occupation fonctionnelle du sol et parfois seulement d'indiquer une erreur.

Pour les erreurs prenant leur source dans la distinction entre le bâti résidentiel et le bâti non résidentiel, plus de la moitié des points relevés (2160) indiquent un bâtiment non résidentiel identifié à tort comme résidentiel. La présence de certaines structures précises (structures portuaires, ferroviaires et énergétiques, entrepôts et cours d'entreposage) et motifs visibles (périmètre bâti non résidentiel) dans la couche GHS peut expliquer cela. L'inverse de cette situation (bâtiment résidentiel identifié comme non résidentiel) se produit aussi, bien que dans une moindre mesure (88).

Pour les erreurs prenant leur source dans la distinction entre le non bâti et le bâti, les éléments identifiés comme apportant de la confusion sont les affleurements rocheux (11), un certain type de végétation (58), les milieux ouverts et un sol minéral exposé (176), les carrières, mines et champs agricoles (298) ainsi que les surfaces asphaltées (398). Ces types d'éléments au sol peuvent atteindre de grandes superficies. Leur mauvaise identification influence donc la qualité des données GHSL dans une certaine mesure. Des corrections à ce niveau ont été apportées de façon prioritaire, surtout du fait que la différence entre le milieu bâti et non bâti est plus grande qu'entre le milieu bâti résidentiel et non résidentiel.

Tableau 4: Analyse thématique des erreurs répertoriées dans la validation des données GHSL

Thématiques	Source de l'erreur	Fréquence	Fréquence relative (%)
Affleurement rocheux/roches	Non bâti	11	0,3
Périmètre bâti non résidentiel	Res/NRes	11	0,3
Bâtiments résidentiels identifiés comme surface non bâtie	Non bâti	14	0,3
Surface non bâtie identifiée comme bâtiment non résidentiel	Non bâti	31	0,7
Bâtiments non résidentiels identifiés comme surface non bâtie	Non bâti	38	0,9
Structures portuaires	Res/NRes	58	1,4
Végétation	Non bâti	58	1,4
Entrepôts et cours d'entreposage	Res/NRes	78	1,9
Structures ferroviaires	Res/NRes	78	1,9
Bâtiments résidentiels identifiés comme non résidentiels	Res/NRes	88	2,1
Structures énergétiques	Res/NRes	123	2,9
Milieux ouverts et sol minéral	Non bâti	176	4,2
Nouveaux développements résidentiels	Non bâti	253	6,0
Carrières, mines et champs agricoles	Non bâti	298	7,1
Surface non bâtie identifiée comme bâtiment résidentiel	Non bâti	337	8,0
Surfaces asphaltées	Non bâti	398	9,5
Bâtiments non résidentiels identifiés comme résidentiels	Res/NRes	2160	51,3
TOTAL	-	4210	100

2.3 CARTOGRAPHIE DASYMÉTRIQUE

2.3.1 Méthodologie

Le processus de validation ayant été concluant, l'équipe a choisi d'aller de l'avant avec l'utilisation des données GHSL. Ces dernières n'ont cependant pas été utilisées sous leur forme brute. Une chaîne de géotraitements a permis de transformer les données GHSL pour produire une couche répondant aux besoins spécifiques de cartographie tout en évitant de mettre en évidence certaines lacunes de la couche GHS.

Les deux classes de bâti (résidentiel et non résidentiel) de GHSL ont été retenues pour être utilisées comme base dans notre démarche de cartographie des milieux résidentiels. Même si conserver les milieux bâtis non résidentiels peut être une source d'imprécision dans la cartographie des milieux résidentiel, certains facteurs justifient ce choix. Un premier facteur est que la validation a permis de

faire ressortir certaines lacunes dans la distinction entre le milieu bâti résidentiel et le milieu bâti non résidentiel au sein de la couche GHSL. En utilisant les deux classes fonctionnelles, la zone couverte par notre cartographie sera donc nécessairement plus grande que la zone réelle couverte par les milieux résidentiels. Ce biais de surestimation sera cependant lié à ce choix et non à une erreur récurrente dans les données de base. Cette procédure a été jugée préférable afin de limiter le rejet de certaines zones habitées. Toutefois, comme l'exactitude de notre couche quant à la présence de population est importante, les aires des îlots de diffusion n'ayant aucun résident ont été retirées pour éviter de surestimer inutilement la présence de zones résidentielles. Les zones bâties non résidentielles situées dans les îlots de diffusion habités ont donc été conservées. Un deuxième facteur justifiant notre choix méthodologique concerne l'esthétisme de la couche finale. En effet, plus les données de base sont étendues, plus la couche finale sera continue, ce qui est souhaitable visuellement pour une représentation cartographique.

La chaîne de géotraitements à appliquer sur les données GHSL a été établie par un processus itératif. À l'aide, entre autres, des informations méthodologiques sur les données et les méthodes de cartographie dasymétrique recueillies lors de la revue de littérature, plusieurs géotraitements et enchaînements ont été mis à l'épreuve les uns à la suite des autres. Au final, une chaîne de traitements inspirée de la méthodologie cartographique de l'[Atlas de la vulnérabilité](#) a permis de produire les couches cartographiques les plus satisfaisantes selon l'évaluation visuelle de l'équipe (Figure 1) (Barrette *et al.*, 2018).

Cette chaîne se divise en quatre grands groupes de géotraitements. Le premier groupe (itération des fichiers de tessellation) vient prendre un à un les fichiers de tessellation, c'est-à-dire une grille de forme hexagonale de 10 000 m² dans notre cas, préalablement produits et classés par un script python pour chacune des 156 grandes villes canadiennes composant notre zone d'étude. Ces fichiers correspondent à une trame de base couvrant l'ensemble de l'étendue des RMR sans considération, à cette étape, pour la localisation du bâti identifié par GHSL. L'itération permet de prendre subséquentement chacun des fichiers associés aux différentes RMR et de les passer individuellement, mais automatiquement, dans l'ensemble des groupes de traitements. En raison d'enjeux de temps de traitements, les 156 fichiers n'ont pas tous été traités en une fois, mais plutôt en sous-groupes correspondant aux provinces canadiennes.

Le deuxième groupe (traitement de la tessellation) précise la trame générale de notre couche dasymétrique en intégrant les données GHSL. À cette étape, uniquement les cellules de la tessellation touchant (intersectant) une zone bâtie résidentielle ou non résidentielle sont conservées pour en

extraire les sommets. Pour simplifier le géotraitement et réduire les temps de traitements, la couche GHS initialement récupérée sous un format matriciel a été convertie en couche vectorielle de polygones. L'extraction des sommets a permis de produire une trame générale simplifiée et ayant des limites plus naturelles (élimination des formes hexagonales). Cette simplification (réduction du nombre de sommets dans les polygones cartographiés) est un choix esthétique, mais également et surtout technique. En effet, comme les couches sont utilisées et intégrées dans de la cartographie web, un des enjeux considérables concerne la vitesse d'affichage. Réduire la complexité de la couche est donc primordial pour augmenter cette vitesse d'affichage.

Le troisième groupe (traitement des TIN) contient l'ensemble des étapes simplifiant la trame ajustée de la grille hexagonale. Pour ce faire, un réseau triangulé irrégulier (TIN) a été produit à partir des sommets extraits par les traitements du deuxième groupe. Une fois les TIN et les triangles des TIN produits, le périmètre de chaque triangle est calculé. Plusieurs essais ont permis de déterminer un seuil quant au périmètre des triangles à conserver. La logique de cette étape est que de plus petits triangles sont générés dans la trame bâtie habitée qui fait l'objet de notre cartographie puisque les points sont plus rapprochés. Les triangles entre les zones d'intérêt sont nécessairement plus grands ou plus longs puisque l'espacement entre les points qui ont servi à la création du TIN est plus important. Ainsi, les triangles ayant un périmètre supérieur à 350 m ont été retirés de la couche pour ne représenter par des triangles que les secteurs à l'étude.

Le quatrième et dernier groupe de traitements (ajout de données du recensement et finalisation de la couche) a permis d'intégrer quelques détails et modifications finales dans la couche. C'est à cette étape que les îlots de diffusion inhabités ont été retirés de la couche produite. Des traitements de lissage ont été appliqués afin d'améliorer l'aspect visuelle du produit final de la cartographie dasymétrique. La dernière étape de production consiste à intégrer les limites des AD pour joindre les différents indices produits par l'équipe à la couche de cartographe dasymétrique dans les applications cartographiques perçues du projet.



Figure 1: Modèle de géotraitements pour la production de la couche dasymétrique.

2.3.2 Résultats

La cartographie dasymétrique a d'abord été produite par RMR. Comme le modèle de traitement est le même pour l'ensemble du Canada, le visuel du produit final peut varier en fonction du contexte et de la configuration de la RMR ou même du secteur cartographié d'une RMR. La figure 2 illustre la couche dasymétrique produite dans quatre secteurs dans différentes RMR. Les fichiers des 156 RMR ont ensuite été fusionnés pour obtenir une couche couvrant l'ensemble du Canada (dans les limites de la zone d'étude).



Figure 2: Résultats de la représentation cartographique des zones résidentielles (couche dasymétrique). (A) Secteur de Calgary, Alberta. (B) Secteur de Toronto, Ontario. (C) Secteur de Québec, Québec. (D) Secteur de Halifax, Nouvelle-Écosse.

2.4 DISCUSSION

Les cartes dasymétriques produites ont une portée qui pourra dépasser largement le projet actuel. Comme mentionné, il n'existe pas à ce jour de données géospatiales disponibles pour le Canada représentant les espaces habités résidentiels à si fine échelle. Ces cartes seront rendues publiques par l'intermédiaire de portails de données géospatiales afin d'être réutilisées dans d'autres projets et recherches pour lesquels une représentation précise de la distribution de la population est pertinente ou même essentielle.

Les cartes dasymétriques pourraient également être améliorées dans le futur. En effet, la méthode de production des cartes pourrait être reproduites avec des nouvelles données plus précises. Par exemple, si une nouvelle génération de produits GHSL est publiée avec certaines corrections, les cartes

dasymétriques produites avec cette mise à jour seraient potentiellement davantage représentatives de la distribution géographique de la population dans les grandes villes canadiennes.

2.5 CONCLUSION

En bref, après avoir découvert dans la littérature scientifique la couche GHS, un processus de validation complet a été mis en œuvre par l'équipe pour s'assurer de sa qualité. Les résultats concluants de la validation ont permis à l'équipe d'aller de l'avant avec l'utilisation de cette couche pour mieux représenter la distribution géographique de la population sur le territoire d'étude. Cependant, pour améliorer la représentation visuelle et corriger certaines lacunes de la couche GHS, l'équipe a élaboré une chaîne de traitements cartographiques afin de produire une carte dasymétrique répondant mieux aux besoins du projet.

3 CONSTRUCTION ET CARTOGRAPHIE DES INDICES

3.1 INTRODUCTION

L'analyse géographique de la vulnérabilité et de l'exposition des populations favorise une meilleure compréhension des enjeux territoriaux et rend possible la conception de meilleures stratégies d'atténuation d'impacts. Au cours des dernières années, l'évaluation de la vulnérabilité aux vagues de chaleur a considérablement progressé et a inspiré diverses stratégies d'adaptation et de développement à l'échelle locale, régionale et nationale. Les études menées sur le sujet identifient, notamment, la densité de population, l'appartenance à un groupe ethnique, le statut socio-économique, les caractéristiques de l'environnement bâti, le genre et l'âge comme étant des composantes de la vulnérabilité sociale. Il va sans dire que la localisation du logement dans lequel résident les personnes peut constituer un facteur prédominant dans la modulation de la capacité de protection qu'offre celui-ci pour faire face à la survenue d'une vague de chaleur accablante. Après avoir énuméré les objectifs qui lui sont propres, cette section du rapport présentera un portrait de la revue de la littérature portant sur la cartographie et de l'exposition aux vagues de chaleur. De plus, elle s'attardera à décrire la méthodologie employée par notre équipe pour cartographier la vulnérabilité et l'exposition de ménages canadiens vivant dans de grandes villes au phénomène de vague de chaleur accablante. À l'instar de ce qui a été fait dans un projet précédent (Barrette *et al.*, 2018), notre équipe a adopté une approche de cartographie par indicateurs pour représenter spatialement le phénomène à l'étude. Dans le cadre de l'actuel projet, quatre indices ont été estimés.

3.2 OBJECTIFS

L'objectif principal est de cartographier la vulnérabilité et l'exposition aux vagues de chaleur accablantes des populations vivant dans les logements de 156 régions urbaines du Canada. Les objectifs spécifiques sont :

- Définir le concept de vulnérabilité et la théorie rattachée à celle-ci;
- Développer une méthodologie permettant de sélectionner et de construire des indicateurs de sensibilité, de capacité à faire face, de vulnérabilité et d'exposition aux vagues de chaleur accablantes;
- Cartographier et catégoriser la sensibilité, la capacité à faire face, la vulnérabilité et l'exposition aux vagues de chaleur accablantes de 156 régions urbaines du Canada;

3.3 CADRE CONCEPTUEL ET REVUE DE LA LITTÉRATURE

Le cadre conceptuel et la revue de la littérature de l'Atlas de la vulnérabilité par Barrette *et al.* (2018) ont été le point de départ du projet. Un impressionnant travail de recherche avait été mené entre 2010 et 2018. Les informations collectées constituaient une solide base pour le démarrage du projet. Néanmoins, une mise à jour des connaissances était nécessaire afin d'avoir accès aux études les plus récentes. Les quatre bases de données suivantes ont été interrogées à l'aide de mots-clés : GeoBase, Elsevier, PubMed et Web of Science. Environ une centaine d'articles scientifiques publiés entre 2017 et 2022 ont été retenus. La sélection était axée sur la pertinence et les similarités avec le contexte à l'étude. Il est intéressant de noter que seulement quelques articles parmi ceux choisis portent sur le Canada (Krstic *et al.*, 2017; Ho *et al.*, 2018; Yu *et al.*, 2021). Des publications provenant de la littérature grise ont aussi été consultées afin de compléter le portrait du phénomène. Celles-ci proviennent majoritairement d'organismes publics ou gouvernementaux. Les sections suivantes présentent une synthèse des informations qui ont été consultées.

3.3.1 Pertinence de l'indice de vulnérabilité

Un indice de vulnérabilité permet d'identifier les populations vulnérables et les zones exposées à la chaleur (Niu *et al.*, 2021). En effet, le niveau de vulnérabilité varie à travers le temps et l'espace ainsi qu'en fonction des populations qui y vivent (Wolf *et al.*, 2015). Un indice de vulnérabilité peut servir comme outil d'aide à la décision. L'identification des populations et des zones les plus vulnérables à la chaleur permet d'allouer les ressources aux endroits où les besoins en prévention et en intervention sont importants (Bao *et al.*, 2015). Dans les dernières années, les études épidémiologiques ont permis de démontrer les effets de la chaleur sur la santé humaine (Santamouris, 2020) et d'identifier les caractéristiques de la population et de l'environnement qui y sont associées (Ellena *et al.*, 2020). De plus, les résultats des études épidémiologiques influencent le choix des indicateurs de l'indice de vulnérabilité (Liu *et al.*, 2020).

3.3.2 Cadre conceptuel

Le choix du cadre conceptuel joue un rôle fondamental dans la construction de l'indice de vulnérabilité et la sélection des indicateurs (Cheng *et al.*, 2021). Il n'existe pas de consensus concernant le choix du cadre conceptuel (Li *et al.*, 2022), mais deux reviennent plus souvent dans la littérature scientifique. La vulnérabilité de la population est un cadre conceptuel décrit par Cutter *et al.* (2003) et le GIEC (Parry *et al.*, 2007) et selon lequel la vulnérabilité est le résultat de l'addition

entre la sensibilité, l'exposition et la capacité d'adaptation. Le triangle du risque décrit par Crichton (1999) est un autre cadre conceptuel qui explique que le risque est composé de l'addition entre l'aléa, l'exposition et la vulnérabilité. Un seul et même cadre conceptuel peut être interprété de manière différente, surtout au niveau du choix des indicateurs (Li *et al.*, 2022). Par exemple, la condition économique et le niveau d'éducation sont considérés comme des indicateurs de la sensibilité pour Zhang *et al.* (2018), mais plutôt comme des indicateurs de la capacité d'adaptation pour Mallen *et al.* (2019).

3.3.3 Choix des indicateurs

Le facteur le plus déterminant pour la sélection des indicateurs est le contexte local. Les caractéristiques de la population et de l'environnement qui contribuent à la vulnérabilité peuvent varier d'un territoire à l'autre. Par exemple, l'indice de vulnérabilité calculé par Nayak *et al.* (2018) dans l'état de New York met un accent particulier sur les inégalités raciales. La disponibilité des données et le jugement subjectif de l'équipe de recherche influencent aussi la sélection des indicateurs (Li *et al.*, 2022). Pour la majorité des articles scientifiques, les indicateurs permettent de représenter les caractéristiques démographiques et socio-économiques de la population (Ex. âge, condition économique, isolation sociale, niveau d'éducation, ethnicité, chômage, conditions du logement, climatisation, compétence linguistique, genre, etc.), l'état de santé de la population (Ex. conditions médicales préexistantes, troubles mentaux, handicap, accès aux établissements de santé, etc.) et les caractéristiques de l'environnement naturel comme bâti (Ex. température à la surface du sol, température de l'air, couverture végétale, humidité, qualité de l'air, topographie, utilisation du sol, densité d'occupation du sol, imperméabilisation du sol, etc.). Très peu d'études sélectionnent des variables qualitatives parmi leurs indicateurs. L'article de Cheng *et al.* (2021) permet toutefois de mettre en valeur les réponses d'un questionnaire sur les habitudes des résidents pendant les épisodes de chaleur accablante dans la construction de leur indice de vulnérabilité.

3.3.4 Composition de l'indice

Une fois que le cadre conceptuel et les indicateurs sont sélectionnés, l'équipe de recherche doit déterminer la pondération de chaque indicateur de la vulnérabilité. Plus un indicateur se fait attribuer un poids élevé dans l'équation, plus son impact est important sur la vulnérabilité. Dans la littérature scientifique, le calcul de vulnérabilité est réalisé à l'aide de diverses méthodes de pondération. Plusieurs de ces méthodes sont parfois combinées pour un seul et même indice (Li *et al.*, 2022). La méthode la plus populaire est l'analyse en composantes principales (ACP) (Azhar *et al.*, 2017; Chen

et al., 2018; Mendez-Lazaro *et al.*, 2018; Nayak *et al.*, 2018; Guo *et al.*, 2019; Hulley *et al.*, 2019; Janicke *et al.*, 2019; Mallen *et al.*, 2019; Zuhra *et al.*, 2019; Alonso et Renard, 2020; Conlon *et al.*, 2020; Dong *et al.*, 2020; Houghton et Castillo-Salgado, 2020; Jagarnath *et al.*, 2020; Song *et al.*, 2020; Zheng *et al.*, 2020). Cette technique statistique est particulièrement utile lorsqu'il y a beaucoup d'indicateurs, puisque l'ACP permet de les regrouper et de diminuer les dimensions d'analyse. La méthode des poids égaux est une autre méthode dans laquelle chaque indicateur se voit attribuer le même poids puisque leur contribution sur la vulnérabilité est assumée comme étant égale (Christenson *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2020). Plusieurs études incluent l'arithmétique, une méthode consistant à additionner, soustraire, diviser et/ou multiplier la valeur de chaque indicateur (Ho *et al.*, 2017; Koman *et al.*, 2019; Estoque *et al.*, 2020; Maragno *et al.*, 2020; Turek-Hankins *et al.*, 2020). Moins fréquente, l'analyse multicritère hiérarchique permet l'attribution des pondérations en se basant sur l'expérience et le jugement d'un panel d'experts (Aprada *et al.*, 2019; Tran *et al.*, 2020).

3.4 MÉTHODOLOGIE

Dans le cadre de ce projet, quatre indices ont été créés : sensibilité, capacité à faire face, vulnérabilité et exposition.

3.4.1 Indice de sensibilité

3.4.1.1 Choix des variables

La revue de la littérature présentée à la section 3.3 a permis d'identifier les variables les plus pertinentes pour l'indice de sensibilité. Il faut se rappeler que la sensibilité se définit comme étant «une condition intrinsèque d'un élément (collectivité, organisation, etc.) qui le rend particulièrement vulnérable» (ADEME, 2013, p. 7). Diverses conditions peuvent rendre une population plus susceptible de subir des conséquences lors d'une vague de chaleur, mais c'est surtout la combinaison de celles-ci qui va avoir le plus d'impact. Afin d'avoir un portrait plus complet de la sensibilité, il est nécessaire d'intégrer des informations sur le statut socio-économique et la qualité de l'environnement bâti. Celles-ci doivent avoir la même répercussion sur l'indice, c'est-à-dire de mesurer l'aspect négatif seulement de la vulnérabilité. Au total, douze variables font partie de la sélection (*tableau 5*). Ce choix a aussi été influencé par la disponibilité des données. En effet, toutes les variables proviennent du Recensement de la population de 2021 par Statistique Canada. C'est la seule base de données qui permet d'obtenir des renseignements fiables pour l'ensemble du Canada et à différentes échelles géographiques. L'unité statistique qui sera utilisée est l'aire de diffusion. Il s'agit de la plus petite

région géographique pour laquelle toutes les données du recensement sont diffusées, elle regroupe 400 à 700 habitants.

Tableau 5: Variables de l'indice de sensibilité

Dimensions	Sous-dimensions	Variables
Sensibilité (socio-économique)	Démographie	Proportion de personnes d'âges sensibles (≤ 4 ans et ≥ 65 ans) (%)
	Instruction	Proportion de personnes n'ayant aucun certificat, diplôme ou grade (%)
	Immigration et citoyenneté	Proportion de personnes immigrantes récentes (%)
		Proportion de personnes ne connaissant pas une langue officielle (%)
	Composition et caractéristiques des ménages	Proportion de personnes vivant seules (%)
		Proportion de familles monoparentales (%)
Proportion de logements loués (%)		
Revenu et activités économiques	Fréquence du faible revenu fondée sur la Mesure de faible revenu après impôt (%)	
	Proportion de locataires consacrant 30 % ou plus du revenu du ménage à l'habitation (%)	
Sensibilité (géographique)	Environnement bâti	Proportion de logements nécessitant des réparations majeures (%)
		Proportion de résidences avec 5 étages ou plus (%)
		Proportion de logements construits avant 1980 (%)

3.4.1.2 Description des variables

a) Proportion de personnes d'âges sensibles (≤ 4 ans et ≥ 65 ans)

Les jeunes enfants et les personnes âgées font partie de la population à faible autonomie. Des ressources supplémentaires sont nécessaires pour prendre soin d'eux durant une vague de chaleur, puisqu'ils n'en ont pas toujours la capacité. Les 0-4 ans et les 65 ans et plus sont généralement plus sensibles à une exposition prolongée à la chaleur, leur capacité de thermorégulation étant moins efficace. Les personnes âgées présentent une fragilité supplémentaire liée aux maladies chroniques, aux médicaments et à la perte d'autonomie. Les deux groupes d'âge sont calculés dans la même variable afin de ne pas annuler leur présence qui varie souvent de façon opposée l'une par rapport à l'autre.

b) Proportion de personnes n'ayant aucun certificat, diplôme ou grade (%)

Le niveau d'instruction joue un rôle multidimensionnel dans la vulnérabilité. Les personnes hautement scolarisées ont un meilleur statut économique, notamment grâce à des emplois plus payants. Cette stabilité permet entre autres d'avoir plus de ressources pour se préparer et répondre à une vague de chaleur. À l'inverse, un faible niveau d'instruction restreint l'habileté à comprendre l'information sur les risques. Ce manque de compréhension va nuire au niveau de préparation.

c) Proportion de personnes immigrantes récentes (%)

S'adapter à un nouveau pays demande du temps. Une personne récemment immigrée fait face à de nombreux défis comme apprendre une nouvelle culture et trouver ses repères. Par conséquent, il se peut qu'elle manque de connaissances sur les aléas locaux ainsi que l'information et les ressources disponibles. Les différences culturelles et les barrières linguistiques vont affecter la façon dont les personnes se préparent et répondent à un risque. Les immigrants peuvent aussi présenter d'autres facteurs de vulnérabilité concernant le niveau de revenu, la grandeur du cercle social ou la tendance à résider dans des secteurs à forte exposition.

d) Proportion de personnes ne connaissant pas une langue officielle (%)

Ne pas connaître une langue officielle peut représenter un véritable danger pendant une vague de chaleur. Les barrières linguistiques restreignent l'accès à l'information et la compréhension des messages de sensibilisation ou d'avertissement. Par conséquent, les personnes risquent de ne pas adopter les bons comportements de protection et de s'exposer davantage à la chaleur.

e) Proportion de personnes vivant seules (%)

Le fait de vivre seul entraîne moins de contact avec l'extérieur, tant au niveau de l'information que de la famille et de l'entourage. L'isolement social et le manque de communication augmentent les risques lors d'une vague de chaleur, puisque la personne est seule à veiller sur elle-même.

f) Proportion de familles monoparentales (%)

Les familles monoparentales présentent souvent des contraintes financières, puisque les besoins de l'enfant sont comblés par un revenu unique. Elles disposent donc de ressources limitées pour se préparer et répondre à une vague de chaleur. Le parent doit assumer toutes les responsabilités seul et prendre soin des autres membres de la famille.

g) Proportion de logements loués (%)

La présence de logements loués est généralement un indicateur de faible revenu. Le fait d'être locataire de son logement suggère moins de ressources financières qu'un propriétaire. De plus, les locataires ont souvent peu de contrôle sur leur habitation, ce qui restreint la capacité d'installer les protections appropriées contre la chaleur.

h) Fréquence du faible revenu fondée sur la Mesure de faible revenu après impôt (%)

Les personnes à faible revenu disposent de ressources limitées pour se préparer et répondre à une vague de chaleur. Par exemple, elles sont moins susceptibles d'avoir un système de climatisation, de rester informées et d'être en contact avec un grand réseau social. Cette partie de la population vit souvent dans les zones les plus à risque, où les logements sont plus vieux et dans de mauvaises conditions.

i) Proportion de locataires consacrant 30 % ou plus du revenu du ménage à l'habitation (%)

Tout comme pour les explications de la variable précédente, les ménages locataires qui consacrent 30 % ou plus de leur revenu pour se loger n'ont pas beaucoup de flexibilité pour absorber l'impact économique d'une crise. Cette statistique constitue un repère utile pour connaître l'abordabilité des logements, mais il faut noter qu'un ménage pourrait avoir un revenu très élevé ou bien choisir de mettre plus d'argent sur son logement par rapport à d'autres biens.

j) Proportion de logements nécessitant des réparations majeures (%)

Selon Statistique Canada (2022a), « la catégorie *réparations majeures requises* comprend les logements qui ont besoin de réparations majeures, tels que les logements où la plomberie ou l'installation électrique est défectueuse ; et les logements qui ont besoin de réparations à la charpente des murs, planchers ou plafonds ». Les infrastructures sont plus vulnérables à la chaleur lorsqu'elles ont besoin d'être réparées. Cette variable permet de donner un aperçu de l'état du parc immobilier. Il faut garder à l'esprit que cette donnée est subjective, puisqu'elle est évaluée par chaque répondant selon ses connaissances en la matière. Il y a un risque que l'évaluation soit surestimée ou sous-estimée puisqu'elle n'a pas été réalisée par un professionnel. Cette variable demeure toutefois intéressante, car elle est également liée à la composante économique. De manière générale, un revenu élevé permet d'avoir un logement de qualité convenable. Pour les locataires, il se peut qu'il y ait un manque de contrôle ou de motivation en lien avec les problèmes de réparation dans un logement.

k) Proportion de résidences avec 5 étages ou plus (%)

Les bâtiments de grande taille subissent plus d'exposition au rayonnement solaire et accumulent plus de chaleur. Les températures à l'intérieur y sont alors plus élevées, surtout pour les étages en hauteur. Les gens qui habitent ce type de logement font face à un risque de chaleur extrême plus important.

l) Proportion de logements construits avant 1980 (%)

En général, les infrastructures plus récentes sont moins vulnérables. En connaissant l'année de construction d'un bâtiment, il est possible de retracer les normes de construction en vigueur pendant cette période. Il s'agit donc d'une variable proxy permettant de supposer les aspects physiques et structurels de la vulnérabilité des bâtiments à la chaleur. L'année 1980 est pertinente puisqu'elle correspond à la mise en place des premières mesures d'économie d'énergie dans le Code national du bâtiment — Canada.

3.4.1.3 Construction de l'indice de sensibilité

3.4.1.3.1 Téléchargement et préparation des données

Étant donné que les variables de l'indice de sensibilité proviennent uniquement du Recensement de la population de 2021, il était plus simple de passer par le package *cancensus* pour le téléchargement des données directement dans le logiciel R. Au total, 24 variables ont été téléchargées pour l'ensemble du Canada à l'échelle de l'aire de diffusion (tableau 7). Ces données ont permis de calculer les pourcentages pour dix des douze variables de l'indice. Cependant, la fréquence du faible revenu fondée sur la Mesure de faible revenu après impôt (%) et la proportion de locataires consacrant 30 % ou plus du revenu du ménage à l'habitation (%) sont seulement offertes sous forme de pourcentage. Le calcul est effectué par Statistique Canada et il n'est pas possible d'avoir accès aux données brutes, contrairement aux autres variables de l'indice. Par la suite, une sélection a été effectuée sur les données de tout le Canada pour conserver seulement les régions métropolitaines de recensement (RMR) et les agglomérations de recensement (AR). Le nombre d'AD passe alors de 57 932 à 45 089. Puisque les données brutes du recensement sont arrondies afin de conserver la confidentialité des répondants, il est arrivé que certaines AD aient des valeurs supérieures à 100 % lors du calcul des pourcentages. Les AD dont les valeurs étaient supérieures à 100% ont simplement été remplacées par la valeur 100. Étant donné que notre projet concerne les communautés canadiennes, les AD ayant une population égale à 0 ont été retirées de l'échantillon. Cela représente un retrait de 255 AD. De plus, 187 AD avaient des valeurs manquantes pour plusieurs de nos variables. Celles-ci ont également été retirées. L'échantillon est maintenant composé de 44 647 AD. Au moment du téléchargement des données, il manquait des informations pour près de 10 000 AD. Plutôt que de les enlever de notre échantillon, nous avons utilisé un processus d'imputation, permettant ainsi d'attribuer des valeurs de remplacement aux valeurs manquantes. C'est le package *missMDA* dans le logiciel R qui a été choisi pour l'opération. Après l'imputation, une trentaine d'AD affichaient une valeur inférieure à 0 qui a été remplacée manuellement par 0.

3.4.1.3.2 Analyse en composantes principales

Une fois que la préparation des données est terminée, il est possible de procéder à l'ACP. En rappel, l'ACP est une analyse factorielle permettant d'étudier les interrelations entre différentes variables, de regrouper les variables en composantes et de créer une hiérarchie entre les composantes, dans le but d'expliquer un phénomène (Stafford et Bodson, 2006). Autrement dit, l'ACP produit une sorte de synthèse entre des variables corrélées. L'ACP réduit le nombre de variables grâce aux patrons de corrélation entre celles-ci (Durand, 2003; Fernandez *et al.*, 2016). Le nombre de variables est ainsi réduit avec l'ACP, ce qui diminue la redondance tout en minimisant la perte d'information contenue dans les variables initiales. Chaque composante explique une partie de la variance totale des variables (Stafford et Bodson, 2006). Lors des préparatifs de l'analyse, il a été décidé que notre échantillon de 44 647 AD allait être fractionné selon chaque province et territoire (tableau 6). En effet, la réalisation de tests préliminaires a permis de constater que l'ACP sur les AD de tout le Canada atténuait les variabilités locales. Onze nouveaux échantillons ont été créés avec les données de l'indice de sensibilité afin de mieux représenter la réalité de chacune des provinces. Les Territoires du Nord-Ouest et le Yukon ont été joints dans le même échantillon, puisque la réalisation de l'ACP nécessite un minimum de 5 observations par variable (Osborne et Costello, 2004). Avec douze variables pour l'indice de sensibilité, la taille de l'échantillon doit être d'au moins 60 AD. Le fait de regrouper les Territoires du Nord-Ouest et le Yukon permet d'avoir un total de 69 AD. De plus, ce sont les deux territoires les plus au nord, faisant face à des défis climatiques similaires.

Tableau 6: Nombre d'aires de diffusion par province ou territoire

Province ou territoire	Nombre d'aires de diffusion
Alberta	4 613
Colombie-Britannique	6 396
Île-du-Prince-Édouard	169
Manitoba	1 430
Nouveau-Brunswick	829
Nouvelle-Écosse	1 044
Ontario	17 678
Québec	10 784
Saskatchewan	1 194
Terre-Neuve-et-Labrador	441
Territoires du Nord-Ouest	35
Yukon	34

Les postulats de l'ACP incluent la vérification de la matrice de corrélations, le test de sphéricité de Bartlett et le test de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) (Pett *et al.*, 2003). Le calcul de l'ACP fait ressortir les composantes qui permettent d'expliquer 100 % de la variance. Pour que l'analyse soit intéressante, il faut garder seulement les composantes qui sont significatives. Il existe différentes façons de sélectionner le nombre de composantes à retenir. Le critère le plus largement utilisé s'appuie sur la valeur propre initiale. Plus la valeur propre d'une composante est élevée, plus cette dernière explique une part significative de la variance totale. Par convention, toutes les composantes avec une valeur propre supérieure à 1 sont considérées comme étant significatives (Bourque *et al.*, 2006).

3.4.1.3.3 Calcul de l'indice de sensibilité

L'exécution de l'ACP a permis de créer de nouvelles composantes synthétiques à partir de nos données. Du moment que le nombre de composantes pertinentes à retenir est décidé, un score est attribué à chacune des AD. Pour chaque composante, les scores ont été pondérés par la proportion de la variance qui y est associée afin d'avoir un résultat plus représentatif. Pour terminer, les scores pondérés ont été additionnés ensemble pour produire l'indice de sensibilité.

Tableau 7: Calcul des variables de l'indice de sensibilité

Nom de la variable	Abréviation	Calcul
Proportion de personnes d'âges sensibles (≤ 4 ans et ≥ 65 ans) (%)	AgeSens	$\frac{\text{Population âgée entre 0 et 4 ans} + \text{Population âgée de 65 ans et plus}}{\text{Population totale selon les groupes d'âge}} \times 100$
Proportion de personnes n'ayant aucun certificat, diplôme ou grade (%)	SansDpl	$\frac{\text{Population n'ayant pas de certificat, diplôme ou grade}}{\text{Population totale de 15 ans et plus selon le plus haut certificat, diplôme ou grade}} \times 100$
Proportion de personnes immigrantes récentes (%)	ImmiRcn	$\frac{\text{Population ayant immigré entre 2016 et 2021}}{\text{Population totale selon le statut d'immigrant et la période d'immigration}} \times 100$
Proportion de personnes ne connaissant pas une langue officielle (%)	LangOff	$\frac{\text{Population ne parlant ni français ni anglais}}{\text{Population totale selon la connaissance des langues officielles}} \times 100$
Proportion de personnes vivant seules (%)	PrSeul	$\frac{\text{Ménages composés d'une seule personne}}{\text{Total des ménages privés selon la taille du ménage}} \times 100$
Proportion de familles monoparentales (%)	FamMono	$\frac{\text{Familles monoparentales}}{\text{Total des familles de recensement dans les ménages privés}} \times 100$
Proportion de logements loués (%)	LogLoue	$\frac{\text{Locataires}}{\text{Total des ménages privés selon le mode d'occupation}} \times 100$
Fréquence du faible revenu fondée sur la Mesure de faible revenu après impôt (%)	FaiblRv	Calcul par Statistique Canada
Proportion de locataires consacrant 30 % ou plus du revenu du ménage à l'habitation (%)	Loyer30	Calcul par Statistique Canada
Proportion de logements nécessitant des réparations majeures (%)	RepaMaj	$\frac{\text{Logements nécessitant des réparations majeures}}{\text{Total des logements privés occupés selon l'état du logement}} \times 100$
Proportion de résidences avec 5 étages ou plus (%)	Res5etg	$\frac{\text{Appartements dans un immeuble de cinq étages ou plus}}{\text{Total des logements privés occupés par type de construction résidentielle}} \times 100$
Proportion de logements construits avant 1980 (%)	Log1980	$\frac{\text{Logements construits avant 1960} + \text{Logements construits entre 1961 et 1980}}{\text{Total des logements privés occupés selon la période de construction}} \times 100$

3.4.2 Indice de capacité à faire face

La capacité à faire face est un élément essentiel dans l'analyse de la vulnérabilité aux vagues de chaleur, puisqu'elle permet de réduire les effets négatifs en renforçant la résilience de la population à cet aléa climatique (Matthies *et al.*, 2008, Bélanger *et al.*, 2008). En effet, si la sensibilité représente les caractéristiques socio-économiques intrinsèques d'une population face à un aléa climatique, la capacité à faire face, pour sa part, représente la capacité « des personnes, institutions, organisations et systèmes à analyser, gérer et surmonter des conditions difficiles à court ou moyen terme, en mettant à profit les compétences, valeurs, croyances, ressources et possibilités qui existent » (Masson-Delmotte *et al.*, 2018). Pour notre étude, la capacité à faire face représente la capacité d'une population à se préparer, à répondre et à récupérer pendant et après une vague de chaleur.

Tout comme dans l'Atlas de la vulnérabilité (Barrette *et al.*, 2018), la création d'indicateurs de proximité a été retenue afin d'éviter le piège d'avoir une variable de sensibilité et son contraire comme variable dans la capacité à faire face. Par exemple, une donnée représentant une personne ayant un revenu important dans la capacité à faire face est l'inverse d'une donnée représentant une personne avec un faible revenu dans l'indice de sensibilité. Ainsi, bien que beaucoup d'études qui incluent la capacité à faire face dans le calcul de la vulnérabilité utilisent des variables socio-économiques (Jagarnath *et al.* 2020; Zemtsov *et al.* 2020), pour l'étude actuelle ce sont les lieux, les installations ou les services de proximité offrant une halte fraîcheur lors d'une vague de chaleur accablante et les hôpitaux pour l'accès aux soins qui ont ainsi été choisis pour construire l'indice de capacité à faire face.

3.4.2.1 Choix des variables

Le choix des variables de l'indice de capacité à faire face s'est fait en deux étapes. La première étape du processus a consisté à recenser les variables appropriées en effectuant une revue de la littérature. Cette étape a permis d'identifier les variables qui ont été utilisées dans des études similaires et qui ont une pertinence avérée pour évaluer la capacité à faire face. La deuxième étape a consisté à effectuer une recherche et une sélection de variables disponibles pour l'ensemble de la zone d'étude.

3.4.2.1.1 Revue de la littérature

Pour la construction de leur indice de capacité à faire face aux vagues de chaleur, plusieurs études intègrent la proximité ou l'accessibilité des populations aux hôpitaux ou aux soins de santé (Kim *et al.*, 2017; Alonso et Renard, 2020; Dong *et al.*, 2020; Ellena *et al.*, 2020; Grigorescu *et al.*, 2021.), alors que d'autres études incluent la proximité ou l'absence d'espaces verts (Hulley *et al.*, 2019; Mallen *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2020;

Zheng *et al.*,2020; Grigorescu *et al.*, 2021) ou les piscines publiques et les jeux d'eau (Harlan *et al.*, 2006; Alberini, Gans & Alhassan, 2011; Nayak *et al.*, 2017; Fraser *et al.*, 2017).

Finalement, de nombreuses études intègrent l'accessibilité à un centre de rafraîchissement (Alberini *et al.*, 2011; Fraser *et al.*, 2017; Fraser *et al.*, 2018; Voelkel *et al.*, 2018; Hulley *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2020; Maragno *et al.*, 2020). Un centre de rafraîchissement est un bâtiment climatisé ou un site où il fait plus frais qui est désigné comme un lieu sûr en cas de survenue de vague de chaleur. On pense par exemple à un centre communautaire, un cinéma, une école, un musée, un commerce climatisé, etc. L'accessibilité aux centres de rafraîchissement par la population est une stratégie courante employée par les différents paliers de gouvernements afin de diminuer la vulnérabilité des populations aux vagues de chaleur (Widerynski *et al.*, 2017). Également, bien qu'il existe des centres de rafraîchissement officiels, les populations se réfugient souvent dans les centres de rafraîchissement informels tels que les centres commerciaux et les cinémas à proximité de leur domicile lors d'une vague de chaleur (Fraser *et al.*, 2018).

3.4.2.1.2 Sélections de variables disponibles pour toute la zone d'étude

Après avoir fait une sélection de variables pour l'indice de capacité à faire face, les données disponibles pour toute la zone d'étude ont été identifiées, afin de garantir une comparabilité entre les différentes zones. Malgré les contraintes de disponibilité des données, nous avons sélectionné un ensemble de 10 indicateurs de proximité pour construire l'indice. Les données retenues et les raisons évoquées sont présentées dans le tableau 8.

Tableau 8: Jeux de données utilisés pour l'estimation de la dimension capacité à faire face de la vulnérabilité

Nom de la variable	Raison
Piscines et jeux d'eau	Permet à la population de se rafraîchir
Parcs	Permet à la population d'aller dans des endroits plus frais
Centres communautaires	Permet à la population d'aller dans une halte fraîcheur où des intervenants communautaires peuvent agir pour la protection des populations vulnérables
Hôpitaux	Permet aux personnes subissant un malaise face à la chaleur d'obtenir des soins
Galleries d'art	Permet à la population d'aller dans une halte fraîcheur
Bibliothèques	Permet à la population d'aller dans une halte fraîcheur
Musées et installations artistiques	Permet à la population d'aller dans une halte fraîcheur
Centres commerciaux	Permet à la population d'aller dans une halte fraîcheur
Plages	Permet à la population de se rafraîchir
Cinémas	Permet à la population d'aller dans une halte fraîcheur

3.4.2.2 Construction de l'indice de capacité à faire face

3.4.2.2.1 Acquisition des données

Les bases de données ouvertes (Environnement de couplage de données ouvertes (ECDO)) diffusées par Statistique Canada ont permis d'acquérir la majorité des données nécessaires à la construction de l'indice de capacité à faire face. Ces bases de données, sous l'initiative de couplages de données ouvertes, « visent à accroître l'utilisation et l'harmonisation de microdonnées ouvertes provenant principalement de sources municipales, provinciales et fédérales » (Statistique Canada, 2022f). Elles regroupent notamment des données ponctuelles sur l'emplacement des immeubles, sur l'emplacement des établissements d'enseignement, sur les établissements de soins de santé, sur les installations culturelles et artistiques et sur les installations récréatives et sportives.

Également, des recherches approfondies ont permis de découvrir un site web contenant une recension de l'ensemble des centres commerciaux du Canada, incluant leur adresse civique. Les données du site web ont été acquises en utilisant une méthode de « *web scraping* », permettant ainsi à l'aide de quelques lignes de code, d'acquérir l'ensemble des données d'une page web. Les données permettant le géocodage n'étant pas uniformes dans leur nomenclature, la géolocalisation a été effectuée par *Google Maps* en utilisant un programme R. Celui-ci utilise le fichier de données sur les centres commerciaux, puis envoie ces informations aux serveurs de *Google Maps*, via un API (interface applicative de programmation). Le problème du manque d'uniformité est ainsi renvoyé à *Google*, beaucoup plus apte à le gérer. En effet, les serveurs retournent les coordonnées en longitude et latitude. Ces coordonnées ont ensuite été ajoutées à la base de données des centres commerciaux. Finalement, les données ont été transformées en données géospatiales dans un système d'information géographique. À de rares occasions, certains centres commerciaux n'ayant pu être localisés, le géocodage a été effectué manuellement. Une validation de la couche a été effectuée par un membre de l'équipe ainsi que par le personnel du centre GéoStat de l'Université Laval qui n'a pas trouvé d'erreur apparente concernant le fichier portant sur les centres commerciaux.

Pour les cinémas, la base de données utilisée provient du site *Web International Showtimes*. Il s'agit d'une compagnie qui offre un API permettant d'accéder à différentes données en lien avec les cinémas à travers le monde. À la suite d'une demande, cette compagnie nous a transmis une liste des cinémas pour tout le Canada avec les adresses et les coordonnées de géolocalisation.

3.4.2.2.1.1 Données manquantes des bases de données ouvertes diffusées par Statistique Canada

Certaines variables utilisées pour l'indice de capacité à faire face n'ont pu être localisées dans la base de données uniforme à l'ensemble des régions métropolitaines de recensement (RMR) et des agglomérations

de recensement (AR). Pour ces cas, les données ont été trouvées et géolocalisées manuellement. Les données pour les variables manquantes ont été localisées sur plusieurs sites internet dont des sites gouvernementaux, régionaux, municipaux, touristiques, commerciaux et des blogues. Les variables qui étaient manquantes pour chaque province et territoire sont présentées dans le tableau 9. La Colombie-Britannique, le Nouveau-Brunswick, l'Ontario et le Québec n'avaient pas de données manquantes. La géolocalisation des données a été effectuée manuellement sur Google Maps en obtenant les coordonnées en longitude et latitude. Ces coordonnées ont ensuite été transformées en données géospatiales dans un système d'information géographique (ArcGIS Pro).

Tableau 9: Données manquantes pour chaque province et territoire

Province ou territoire	Variables manquantes
Alberta	Plages
Île-du-Prince-Édouard	Bibliothèques, centres commerciaux, centres communautaires, galeries d'art, parcs, piscines et jeux d'eau, plages
Manitoba	Plages
Nouvelle-Écosse	Piscines et jeux d'eau, plages
Terre-Neuve-et-Labrador	Centres communautaires, parcs, piscines et jeux d'eau, plages
Territoires du Nord-Ouest	Centres communautaires, piscines et jeux d'eau, plages
Saskatchewan	Centres commerciaux, piscines et jeux d'eau, plages
Yukon	Centres communautaires, piscines et jeux d'eau, plages

3.4.2.2.2 Traitement des données

3.4.2.2.2.1 Déplacement des barycentres de lot et création d'un nouveau centre pour les aires de diffusion

La démarche appliquée pour le calcul des indices de proximité est similaire à celle utilisée par Barrette *et al.*, (2018) dans le projet d'Atlas de la vulnérabilité. La méthode permet d'estimer la distance à parcourir, en voiture, entre le centre pondéré d'une aire de diffusion et l'une des localisations présentées au tableau 9. Plus particulièrement, le centre de l'aire de diffusion a été pondéré à l'aide du nombre de personnes résidant dans les îlots de diffusion (ID). Selon Statistique Canada (2017), un ID « est un territoire dont tous les côtés sont délimités par des rues et/ou des limites de régions géographiques normalisées. L'ID est la plus petite unité géographique pour laquelle les chiffres de population et des logements sont diffusés ». Le nouveau centre, soit le centre « corrigé » représente mieux la distribution de la population à l'intérieur du territoire de l'aire de diffusion.

3.4.2.2.2.2 Mesure de proximité

Par la suite, le centre corrigé a été déplacé sur le tronçon de route le plus proche, afin de pouvoir effectuer l'analyse de réseau. Cela permet d'éliminer une distorsion trop importante lors du calcul de l'indice de

proximité pour les centres corrigés éloignés. Pour ce faire, une zone tampon de 5 m a été calculée autour de chacune des routes. Le centre corrigé des aires de diffusion est ensuite déplacé sur la ligne de 5 m de la zone tampon.

Dans l'optique de partage de données et de reproductibilité des méthodes pour les utilisateurs de l'outil, l'analyse de réseau (*Network Analysis*) a été développée dans R, à l'aide de l'utilisation de la librairie OSMR. La distance en voiture entre le centre corrigé et chacune des variables est calculée, par région métropolitaine de recensement. Un tableau contenant l'ensemble des distances entre chaque entité ponctuelle de chaque variable est conçu et un centre est précisé. Puis, la plus petite distance est retenue pour le calcul de l'indice de capacité à faire face.

Le choix de la distance en voiture plutôt que la distance à pied est justifié par le fait qu'il est possible qu'il n'y ait pas de destination (ex. : piscine, hôpital) à l'intérieur d'une RMR. Pour éviter d'avoir des valeurs nulles lors du calcul de l'ACP, le choix d'inclure l'ensemble des points d'une variable a été fait. Il était selon nous déraisonnable de choisir une distance à pied. En plus, cela permet d'éliminer le problème de frontière. Par exemple, pour deux RMR voisines, il est possible que la destination la plus près se retrouve dans la RMR voisine. Ce choix entraîne cependant un défi technique important. En effet, la librairie de base de R ne permet pas d'avoir une matrice supérieure à 10 000 entrées. En considérant qu'il y a plus de 40 000 aires de diffusion, la limite supérieure de la librairie est rapidement atteinte.

Pour bien comprendre la nature du problème, il est important de spécifier que la librairie OSMR de R fait un appel API aux serveurs d'*OpenStreetMap*. Dans l'appel, les coordonnées des différents points sont envoyées aux serveurs. Ceux-ci calculent la distance entre les points en utilisant le réseau routier, et retransmettent la distance. La limite de points pour un appel est une matrice de 10 000 trajets. Cependant, puisque *OpenStreetMap* est « *open source* », les codes sources et ces données sont ouverts. Ainsi, il est possible d'avoir son propre serveur d'*OpenStreetMap*. Les données routières du Canada ont été téléchargées du site [Geofabrik](#). Puis, le fichier de réseau a été construit à l'intérieur du logiciel *Docker*. Pour le fichier du réseau routier, nous avons spécifié que le mode de transport aux fins du calcul à distance est l'automobile. Finalement, le serveur est lancé en mode local, en prenant soin d'augmenter la taille de la matrice, afin de la rendre la plus importante possible. Ainsi, il ne reste qu'à spécifier l'adresse du serveur local dans la fonction du calcul de la distance dans R afin que les calculs soient effectués sur le serveur local plutôt que sur les serveurs d'*OpenStreetMap*.

3.4.2.2.3 Analyse en composantes principales

À l'instar de l'indice de sensibilité (voir la section 3.4.1.3.2), nous avons décidé que l'échantillon de 44647 AD allait être fractionné selon chaque province et territoire pour le calcul de l'ACP. Les résultats des tests

préliminaires ont permis de constater que l'ACP sur les AD de tout le pays atténuait les variabilités locales de l'indice de capacité à faire face. À cet effet, onze nouveaux échantillons ont été créés avec les données pour mieux représenter les réalités provinciales. Tout comme pour l'indice de sensibilité, les Territoires du Nord-Ouest et le Yukon ont été joints dans le même échantillon.

Également, avant de procéder à l'ACP, les postulats suivants ont été vérifiés afin de s'assurer que les résultats de l'analyse soient fiables et interprétables: la vérification de la matrice de corrélations, le test de sphéricité de Bartlett et le test de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) (Pett *et al.*, 2003). Bien que le calcul de l'ACP permette d'identifier les composantes qui expliquent 100 % de la variance, seules les composantes significatives doivent être conservées pour une analyse pertinente. Il existe plusieurs méthodes pour sélectionner le nombre de composantes. La méthode la plus courante utilise la valeur propre initiale. En effet, plus la valeur propre d'une composante est élevée, plus elle explique une part importante de la variance totale. Par convention, toutes les composantes ayant une valeur propre supérieure à 1 sont considérées comme étant significatives (Bourque *et al.*, 2006).

3.4.2.2.4 Calcul de l'indice de capacité à faire face

Tout comme pour l'indice de sensibilité, l'exécution de l'ACP a permis de créer de nouvelles composantes synthétiques à partir des données. Du moment que le nombre de composantes pertinentes à retenir est décidé, un score est attribué à chacune des AD. Pour chaque composante, les scores ont été pondérés par la proportion de la variance qui y est associée afin d'avoir un résultat plus représentatif. Pour terminer, les scores pondérés ont été additionnés ensemble pour produire l'indice de capacité à faire face.

3.4.3 Indice de vulnérabilité

L'indice de vulnérabilité est le résultat de l'addition entre l'indice de sensibilité et l'indice de capacité à faire face pour chaque AD. Dans la littérature scientifique, il n'existe pas de consensus sur la façon de calculer l'indice de vulnérabilité. Le choix d'additionner ou de soustraire les composantes de la vulnérabilité dépend du cadre conceptuel. En fonction des variables et de la méthodologie qui ont été choisies dans ce projet, les indices vont devoir s'additionner. Par exemple, plus le résultat de l'indice de sensibilité est haut, plus la vulnérabilité est forte. Pour l'indice de capacité à faire face, plus le résultat est haut, plus la vulnérabilité est forte. On pourrait donc dire qu'il s'agit d'un indice « d'incapacité » à faire face. Comme les deux indices vont dans le même sens en mesurant l'aspect négatif de la vulnérabilité, une addition permet de mieux en représenter les effets cumulatifs. Avant de procéder au calcul, les résultats de chaque indice ont été normalisés entre 0 et 1 afin de pouvoir les comparer sur une plage de valeurs communes. C'est la fonction *normalize* du package *BBmisc* dans R qui a été utilisée pour réaliser cette

étape. Le calcul de l'indice de vulnérabilité est effectué avec les données d'une province à la fois, soit les mêmes échantillons que pour l'exécution de l'ACP.

3.4.4 Indice d'exposition

Pour le GIEC (Field *et al.*, 2014), l'exposition est liée à la présence de personnes, de moyens de subsistance, d'espèces ou d'écosystèmes, de ressources et de services environnementaux, d'éléments d'infrastructure ou de biens économiques, sociaux ou culturels dans un lieu susceptible de subir des dommages (dus aux changements climatiques et à leurs impacts).

3.4.4.1 Choix du modèle

Bien qu'il existe plusieurs types de modélisation différents pour étudier les îlots de chaleur urbain (Ketterer et Matzarakis, 2015, Khatami, Mountrakis et Stehman, 2016, Oukawa, Krecl et Targino, 2022, Almeida, Teodoro et Gonçalves, 2021), le choix de l'équipe s'est porté sur le modèle forêts aléatoires (RF) (Breiman, 2001) pour prédire la différence de température d'un pixel par rapport à la valeur moyenne des températures d'un groupe de référence de pixels localisés dans un milieu non urbain. RF est un algorithme d'apprentissage machine supervisé couramment utilisé pour l'étude du phénomène des îlots de chaleur urbains (Bernard *et al.*, 2017, Chen *et al.*, 2022, Gage et Cooper 2017, Marchal *et al.*, 2022, Straub *et al.*, 2019). Les modèles RF permettent de modéliser les relations non-linéaires complexes, permettant ainsi de formuler une prédiction plus précise dans le cas de la cartographie des îlots de chaleur urbains. Ils sont généralement flexibles et facilement interprétables puisqu'ils tiennent compte de multiples variables simultanément pour prendre une décision, que ce soit sur les caractéristiques physiques de la ville, les caractéristiques météorologiques et les caractéristiques environnementales. Également, RF permet de fournir des cartes de prédiction avec une grande précision spatiale, paramètre important dans une démarche de cartographie de l'intensité des îlots de chaleur urbains à fine résolution spatiale.

3.4.4.2 Données utilisées

Cette section a pour objectif de décrire les données utilisées dans le but de cartographier un indice d'exposition aux vagues de chaleur.

3.4.4.2.1 Traitement des images Landsat

Landsat 8 est un satellite lancé en 2013 revisitant le même point tous les 16 jours et ayant, notamment à son bord, un capteur thermique infrarouge qui opère sur deux bandes thermiques (soit la bande 10 [B10] d'une longueur d'onde de 10 μm et la bande 11 [B11] d'une longueur d'onde de 12 μm) à une résolution

spatiale de 30 m (García-Santos *et al.*, 2018). Au cours des dernières années, les instruments de mesure à bord des satellites ont été largement utilisés pour la cartographie et le suivi des îlots de chaleur (Kaplan, 2019). L'utilisation combinée des divers instruments des satellites permet l'évaluation de la température de surface. La température de surface est utilisée dans la littérature scientifique à la fois comme élément d'exposition à la chaleur, et à la cartographie des îlots de chaleur surfacique (Ho *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2018; Cheng *et al.*, 2021; Räsänen *et al.*, 2019; Conlon *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2021). Une correction atmosphérique doit être appliquée à la mesure de la B10 et B11 afin d'obtenir une estimation précise de la température de surface du sol. Il existe quatre principales méthodes pour apporter cette correction atmosphérique, soit Radiative-Transfer Equation, Mono-Window, Single-Channel et Split-Window (García-Santos *et al.*, 2018).

Depuis 2017, l'équipe de Landsat ne recommande plus l'utilisation de la bande 11 (B11) pour le Split-Window, puisque des problèmes de calibration ont été détectés (Sagris et Sepp, 2017; García-Santos *et al.*, 2018). Le cadre méthodologique adopté pour le calcul des températures de sol est celui de Wang *et al.* (2020), qui implémente une version généralisée du Single-Channel dans l'interface Google Earth Engine. L'utilisation de ce cadre est justifiée par la validation des résultats obtenus par Wang *et al.* (2020). De plus, ces auteurs fournissent publiquement le code pour l'implémentation et les calculs se font sur les serveurs de Google plutôt que localement, ce qui diminue grandement le temps de calcul. Ainsi, cela évite des erreurs de la part des utilisateurs lors du calcul et nous assure de la qualité des températures de surface.

Concrètement, le *Single-Channel* généralisé se calcule ainsi :

Équation 1 : Calcul de la température au sol à l'aide de la méthode Single-Channel

$$T_s = \frac{c_2/\lambda}{\ln\left(\frac{c_1}{\lambda^5 \cdot B(T_s)} + 1\right)}$$

avec

$$B(T_s) = a_0 + a_1w + (a_2 + a_3w + a_4w^2)\frac{1}{\varepsilon} + (a_5 + a_6w + a_7w^2)\frac{L_{sen}}{\varepsilon}$$

Où L_{sen} représente la radiance à l'instrument, ε représente l'émissivité de la surface du sol, w représente la vapeur d'eau atmosphérique, $c_1 = 1.19104 \times 10^8 W\mu m^{-2}sr^{-1}$, $c_2 = 1.43877 \times 10^4 \mu mK$, $B(T_s)$ représente la radiance de Planck de la température T_s et λ représente la longueur d'onde effective (dans ce cas-ci, $10.904 \mu m$).

Pour la température, seules les images d'une journée dite chaude (soit une température maximale de 30 °C ou plus) ont été utilisées. Pour ce faire, les données météorologiques d'Environnement Canada pour chacune des stations actives au Canada de 2015 à 2020 ont été utilisées afin d'identifier temporellement et spatialement les journées chaudes. Les images Landsat de 2020, prises entre les mois de mai et de septembre inclusivement, concordant à une journée chaude et ayant un couvert nuageux inférieur à 10 % ont été téléchargées. L'application de la méthode Single-Channel a été effectuée sur ces images.

3.4.4.2.2 Indice du cadre bâti et de la densité de végétation

L'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) et l'indice de cadre bâti par différence normalisée (NDBI) sont deux variables fréquemment utilisées dans l'identification des ICU. Les variables de NDVI et de NDBI ne sont pas directement accessibles sur *Google Earth Engine* pour les images satellitaires Landsat. Pour les images Landsat 8, le NDVI se calcule ainsi :

Équation 2 : Indice de végétation par différence normalisée (NDVI)

$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)}$$

Où NIR correspond à la bande du proche infrarouge et Red à la bande de couleur rouge. Pour sa part, le NDBI, se calcule ainsi:

Équation 3 : Indice de cadre bâti par différence normalisée (NDBI)

$$NDBI = \frac{(SWIR - NIR)}{(SWIR + NIR)}$$

Où, encore une fois, NIR correspond à la bande du proche infrarouge et SWIR à la bande de l'infrarouge à longueur d'onde courte.

La valeur médiane de ces trois bandes entre le premier jour de mai et le dernier jour de septembre pour chaque pixel a été retenue dans les calculs de l'année 2020. Ces calculs ont été effectués à l'aide de *Google Earth Engine*.

3.4.4.2.3 Imperméabilisation des sols

Afin d'estimer cartographiquement le pourcentage d'imperméabilité du sol à fine résolution, nous avons donc procédé à la création d'un fichier pour le Québec méridional. Pour ce faire, nous avons adopté le cadre méthodologique suivant (Li *et al.*, 2020). Simplement, la méthode repose sur l'entraînement d'un algorithme d'intelligence artificielle (soit le fully convolutional neural networks (FCNN)) sur les données de pourcentage d'imperméabilisation des sols du National Land Cover Database émis par l'U.S. Geological Survey, le tout implémenté sur une plateforme de Google nommée Colab, permettant l'utilisation des services infonuagiques de Google. Puisque les images d'entraînement se retrouvent toutes aux États-Unis, il est attendu que l'algorithme performera bien pour la région du Québec, partageant un climat estival, et un environnement bâti et naturel semblable, particulièrement avec le nord-est des États-Unis. L'utilisation d'un FCNN est privilégiée pour sa capacité à extraire de l'information d'imageries à plusieurs bandes spectrales (comme une imagerie couleur et thermique) en plus de pouvoir prendre en compte la valeur des pixels voisins (en les incorporant dans une ou des couches convolutionnelles) (Li *et al.*, 2020). Le modèle utilisé est celui préentraîné, ayant le paramètre d'optimisation Rectified Linear Unit (ReLU), avec 50 epochs. En analyse de données, une epoch fait référence à une itération complète du processus d'entraînement d'un modèle d'apprentissage automatique (Li *et al.*, 2020). Les epochs sont donc utilisées pour mesurer la progression de l'entraînement d'un modèle au fil du temps. Le modèle a nécessité 25 h de traitement et produit un RMSE de $\sim 0,08$, indiquant ainsi une marge d'erreur très faible.

3.4.4.2.4 Température relative

La méthodologie employée pour le calcul de l'intensité des îlots de chaleur s'inspire de Li *et al.* (2018). Cette méthode a été choisie pour plusieurs raisons. D'abord, elle permet la reproductibilité, car il n'y a plus de subjectivité de la part des chercheurs quant à l'emplacement des pixels urbains et ruraux. De plus, le déploiement de la méthode est assez simple tout en étant scientifiquement adéquat, ce qui rend la cartographie des îlots de chaleur possible pour l'ensemble des RMR et AR du Canada.

Afin d'estimer la différence observée entre les milieux urbains et les zones rurales environnantes, un écart a été estimé entre la température du pixel et la température moyenne des pixels d'une zone de contrôle. Cette zone de contrôle a été identifiée en sélectionnant les pixels contenus dans l'image ayant le niveau d'imperméabilité du sol le plus faible. Les différentes images ont par la suite été intégrées dans une mosaïque, les valeurs des pixels se chevauchant faisant l'objet d'une agrégation par la moyenne des températures.

3.4.4.2.5 Altitude, longitude, latitude et proximité d'un plan d'eau

L'altitude de chacun des pixels de la zone d'étude a été estimée en utilisant le fichier *GTOPO30 Global Digital Elevation Model* élaboré et distribué par la compagnie ESRI. Les coordonnées géographiques ont été calculées à l'aide du logiciel ArcGIS sous la projection Web Mercator (Nad 83), la même qui sera utilisée dans l'affichage des cartes web. Enfin, la distance euclidienne entre le pixel et le plan d'eau le plus proche a été calculée dans le but de construire trois indicateurs distincts : la distance à la plus proche vaste étendue d'eau (1000 km² et plus), la distance à la plus proche petite étendue d'eau (moins de 1000 km²) et la distance à la plus proche étendue d'eau.

3.4.4.3 Zone à l'étude et échantillonnage

La zone couverte par la modélisation concerne la portion habitée des 156 RMR et AR canadiennes. Afin de délimiter ce territoire, une zone tampon de 500 mètres a été déterminée autour des zones résidentielles délimitées par la cartographie dasymétrique (voir section 2). Les observations ont été divisées par groupes de provinces (tableau 10). Un nombre restreint de pixels utilisés dans l'élaboration du modèle multivarié a été sélectionné à l'aide d'un plan d'échantillonnage aléatoire simple. Pour déterminer si les échantillons étaient représentatifs de la population dont ils sont issus, nous avons eu recours à deux tests statistiques paramétriques (analyse de la variance (ANOVA) et test de Student (t-test)) et deux tests non-paramétriques (test de Kruskal-Wallis et test de Mann-Whitney U) (Hair *et al.*, 2014).

3.4.4.4 Modélisation

Une modélisation à l'aide de forêts aléatoires (*Random Forest*) a été utilisée dans le but de prédire la différence de température d'un pixel par rapport à la valeur moyenne des températures d'un groupe de référence de pixels localisés dans un milieu non urbain. Sur l'échantillon de pixels initialement sélectionnés, 75% d'entre eux ont été utilisés dans le but d'entraîner un algorithme tandis que les pixels restants (25%) ont été utilisés dans le but de valider le modèle. En plus de recenser le nombre de pixels échantillonnés par territoire, le tableau 10 montre les différents paramètres optimaux qui ont été utilisés dans la réalisation de forêts aléatoires.

Tableau 10: Nombre de pixels et paramètres utilisés pour la modélisation, par grande région canadienne

Région	Nombre de pixels échantillonnés	Nombre d'arbres	Nombre minimal de nœuds	Variabes échantillonnées aléatoirement
Maritimes	100 000			
Québec	100 000			
Ontario	200 000	2000	2	4
Centre	200 000			
Côte-Ouest	150 000			

La figure 3 illustre la démarche utilisée pour sélectionner les paramètres optimaux du modèle. Trois paramètres ont été utilisés :

- Le nombre d'arbres de décision que l'algorithme Forest doit construire.
- Le nombre minimum d'échantillons requis pour former une feuille de l'arbre de décision.
- Le nombre de variables à considérer lors de la recherche de la meilleure division à chaque nœud.

Ces paramètres ont été ajustés à l'aide d'une recherche en grille dans le but d'obtenir les meilleurs résultats pour un modèle de régression à l'aide de la librairie tidymodels en fonction de la maximisation de la valeur du coefficient de détermination (R^2) et de la minimisation de l'erreur quadratique moyenne (RMSE).

Le RMSE est une mesure couramment utilisée pour évaluer la performance des modèles de régression (Gareth *et al.*, 2013). Elle permet d'exprimer l'erreur de prédiction dans la même unité que la variable cible, ce qui la rend facilement interprétable. Un RMSE plus faible indique une meilleure performance du modèle en termes de prédiction de la variable cible. Celui-ci se calcule ainsi :

Équation 4 : Erreur quadratique moyenne (RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N}}$$

où N est le nombre d'observations, y est la valeur réelle de la variable cible et \hat{y} est la valeur prédite par le modèle pour cette observation.

Pour sa part, le coefficient de détermination (R^2) est une mesure de la qualité de l'ajustement d'un modèle de régression (Gareth *et al.*, 2013). Il spécifie la proportion de la variance totale de la variable dépendante (y) qui est «expliquée» par le modèle. Le R^2 est calculé en comparant la variance totale de la variable

dépendante (y) avec la variance résiduelle (erreur de prédiction) après l'ajustement du modèle. Le R^2 est calculé ainsi:

Équation 5 : Coefficient de détermination (R^2)

$$R^2 = \frac{SSE}{SST} = 1 - \frac{\sum(\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum(y - \bar{y})^2}$$

où SSE est la somme des carrés des différences entre les valeurs observées de la variable dépendante (y) et les valeurs prédites par le modèle, et SST est la somme des carrés des différences entre les valeurs observées de y et la moyenne de y . À noter que plus le R^2 est proche de 1, plus le modèle «explique» ou rend compte d'une part importante de la variance de la variable dépendante et plus le modèle bénéficie d'un bon ajustement.

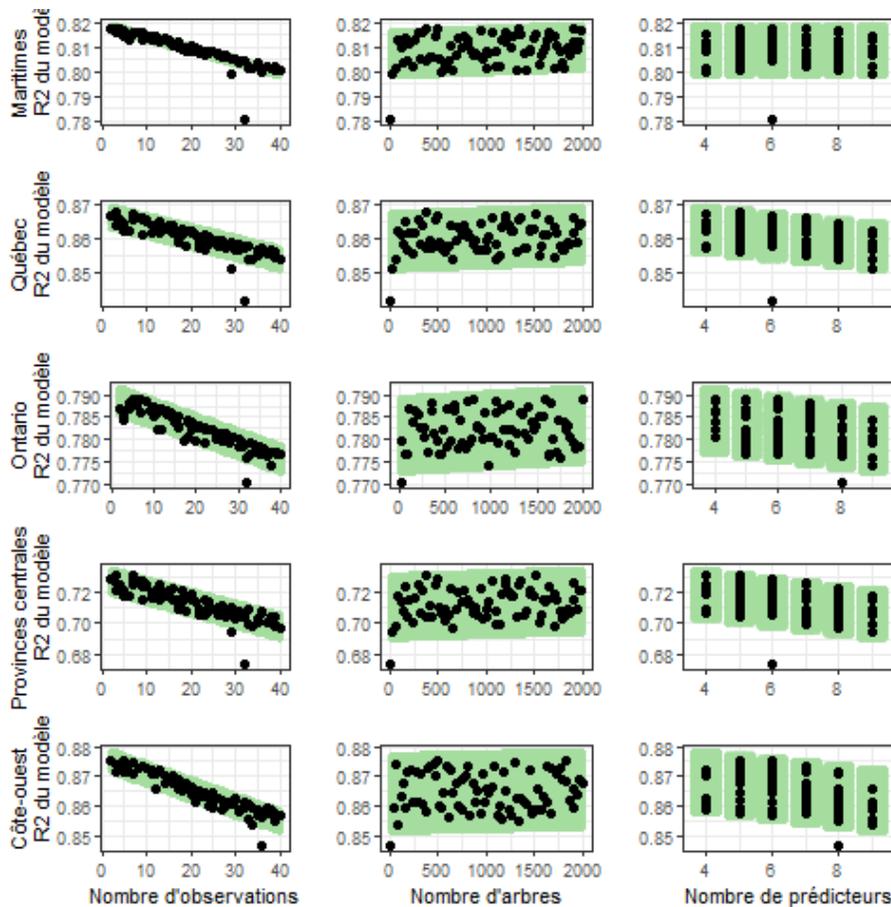


Figure 3: Matrice de diagrammes de dispersion représentant l'effet du changement des paramètres sur l'optimisation des modèles

3.5 RÉSULTATS

3.5.1 Création des indices synthétiques

3.5.1.1 Indice de sensibilité

Respect des postulats

Avant de procéder à la réalisation de l'ACP pour l'indice de sensibilité, il est essentiel de vérifier si les données de chaque province et territoire respectent les postulats.

1) Matrice de corrélation

L'observation des matrices de corrélation a permis de valider l'existence de corrélations entre les douze variables de l'indice de sensibilité pour chaque province et territoire.

2) Test de sphéricité de Bartlett

Le test de sphéricité de Bartlett permet de tester l'hypothèse selon laquelle la matrice de corrélation est une matrice d'identité, c'est-à-dire que les variables sont globalement indépendantes. Les résultats indiquent que le test est significatif ($p < 0,001$). Les variables sont donc liées et il y a présence de corrélations inter-items (tableau 11).

Tableau 11: Résultats du test de sphéricité de Bartlett pour l'indice de sensibilité

Province ou territoire	Khi-carré (χ^2)	Degrés de liberté	Valeur de probabilité (p -value)
Alberta	22 106,73	66	< 0,001
Colombie-Britannique	24 655,74	66	< 0,001
Île-du-Prince-Édouard	796,53	66	< 0,001
Manitoba	8 353,23	66	< 0,001
Nouveau-Brunswick	4 443,93	66	< 0,001
Nouvelle-Écosse	5 943,2	66	< 0,001
Ontario	86 125,33	66	< 0,001
Québec	57 901,61	66	< 0,001
Saskatchewan	6 509,37	66	< 0,001
Terre-Neuve-et-Labrador	2 179,67	66	< 0,001
Territoires du Nord-Ouest + Yukon	362,9	66	< 0,001

3) Indice Kaiser-Meyer-Olkin (KMO)

L'indice KMO permet de vérifier la qualité des corrélations inter-items. La majorité des provinces et territoires obtiennent un résultat se situant entre 0,7 et 0,8 (tableau 12). Cela signifie que les données présentent un ajustement moyen. La Colombie-Britannique est la seule province à obtenir un ajustement

faible avec un indice KMO se situant entre 0,6 et 0,7. La taille de l'échantillon n'est probablement pas en cause, puisqu'il s'agit de la troisième province avec le plus d'aires de diffusion sur son territoire. Compte tenu des résultats, il est possible de procéder à l'ACP pour chaque province et territoire.

Tableau 12: Résultats de l'indice Kaiser-Meyer-Olkin pour l'indice de sensibilité

Province ou territoire	Indice KMO
Alberta	0,766
Colombie-Britannique	0,664
Île-du-Prince-Édouard	0,738
Manitoba	0,785
Nouveau-Brunswick	0,757
Nouvelle-Écosse	0,745
Ontario	0,776
Québec	0,769
Saskatchewan	0,772
Terre-Neuve-et-Labrador	0,784
Territoires du Nord-Ouest + Yukon	0,710

Résultats de l'analyse en composantes principales

a) Alberta

Les résultats pour l'Alberta montrent que ce sont les quatre premières composantes qui ont une valeur propre supérieure à 1 (tableau 13). Celles-ci permettent d'expliquer 68,5 % de la variance. En observant le graphique de la contribution des variables, nous constatons que la proportion de locataires consacrant 30 % ou plus du revenu du ménage à l'habitation (Loyer30), la proportion de logements nécessitant des réparations majeures (RepaMaj) et la proportion de résidences avec 5 étages ou plus (Res5etg) contribuent davantage à la cinquième composante qu'aux quatre premières. Afin de s'assurer de leur représentativité dans le calcul de l'indice de sensibilité, la décision finale est de conserver les cinq premières composantes de l'ACP au lieu de quatre (Dim. 1 à 5 dans la figure 4). Les cinq composantes représentent 75,9 % de la variance expliquée.

Tableau 13: ACP de l'indice de sensibilité pour l'Alberta

Composante	Valeur propre	Variance expliquée (%)	Variance expliquée cumulative (%)
1	3,911	32,595	32,595
2	1,663	13,859	46,454
3	1,615	13,462	59,916
4	1,025	8,538	68,454
5	0,897	7,472	75,926
6	0,702	5,854	81,779
7	0,624	5,197	86,977
8	0,497	4,141	91,118
9	0,378	3,152	94,270
10	0,321	2,676	96,946
11	0,219	1,826	98,772
12	0,147	1,228	100,000

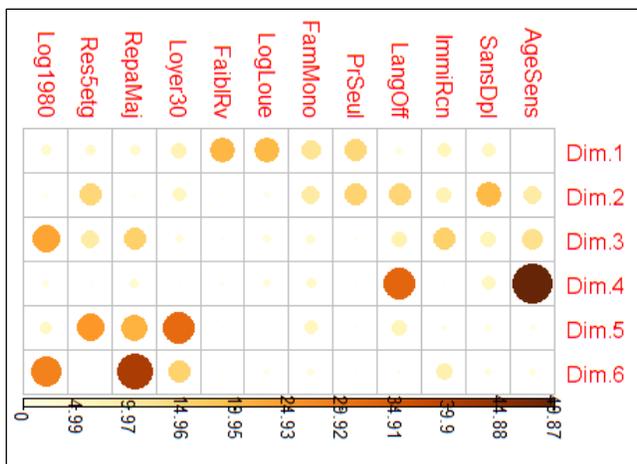


Figure 4: Contribution des variables à chaque composante de l'indice de sensibilité pour l'Alberta

b) Colombie-Britannique

Pour la Colombie-Britannique, les résultats de l'ACP indiquent que ce sont les quatre premières composantes qui ont une valeur propre supérieure à 1 (tableau 14). Celles-ci permettent d'expliquer 66,8 % de la variance. La figure 5 permet d'observer que la proportion de locataires consacrant 30 % ou plus du revenu du ménage à l'habitation (Loyer30), la proportion de logements nécessitant des réparations majeures (RepaMaj) et la proportion de résidences avec 5 étages ou plus (Res5etg) contribuent davantage à la cinquième composante qu'aux quatre premières. La contribution de la proportion de logements construits avant 1980 (Log1980) est plus élevée pour la sixième composante. De plus, elle contribue déjà aux composantes deux et quatre. Afin de s'assurer que toutes les variables soient représentées dans le calcul de l'indice de sensibilité, les cinq premières composantes de l'ACP sont retenues plutôt que quatre. Les cinq composantes représentent 73,5 % de la variance expliquée.

Tableau 14: ACP de l'indice de sensibilité pour la Colombie-Britannique

Composante	Valeur propre	Variance expliquée (%)	Variance expliquée cumulative (%)
1	3,167	26,390	26,390
2	1,859	15,488	41,877
3	1,771	14,755	56,632
4	1,215	10,126	66,758
5	0,807	6,723	73,481
6	0,730	6,080	79,561
7	0,665	5,541	85,102
8	0,493	4,111	89,213
9	0,452	3,769	92,982
10	0,378	3,149	96,131
11	0,290	2,419	98,550
12	0,174	1,450	100,000

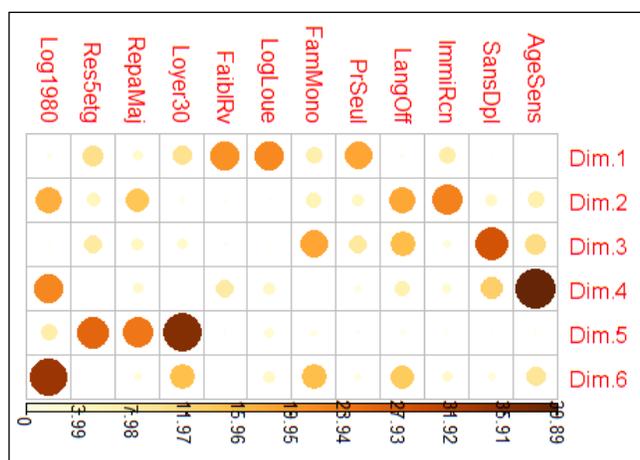


Figure 5: Contribution des variables à chaque composante de l'indice de sensibilité pour la Colombie-Britannique

c) Île-du-Prince-Édouard

Les résultats pour la province de l'Île-du-Prince-Édouard montrent que ce sont les quatre premières composantes qui ont une valeur propre supérieure à 1 (tableau 15). Celles-ci permettent d'expliquer 67,5 % de la variance. En observant la figure 6, nous constatons que la proportion de personnes n'ayant aucun certificat, diplôme ou grade (SansDpl) et la proportion de logements construits avant 1980 (Log1980) contribuent davantage à la cinquième composante qu'aux quatre premières. Il est alors intéressant de conserver la cinquième composante, puisque sa valeur propre (0,955) est très proche de 1. Son inclusion dans le calcul de l'indice de sensibilité permet d'expliquer 75,5 % de la variance.

Tableau 15: ACP de l'indice de sensibilité pour l'Île-du-Prince-Édouard

Composante	Valeur propre	Variance expliquée (%)	Variance expliquée cumulative (%)
1	3,735	31,127	31,127
2	2,038	16,979	48,107
3	1,214	10,117	58,224
4	1,117	9,308	67,532
5	0,955	7,955	75,488
6	0,751	6,262	81,750
7	0,670	5,583	87,333
8	0,487	4,055	91,388
9	0,402	3,350	94,738
10	0,314	2,613	97,351
11	0,177	1,478	98,829
12	0,141	1,171	100,000

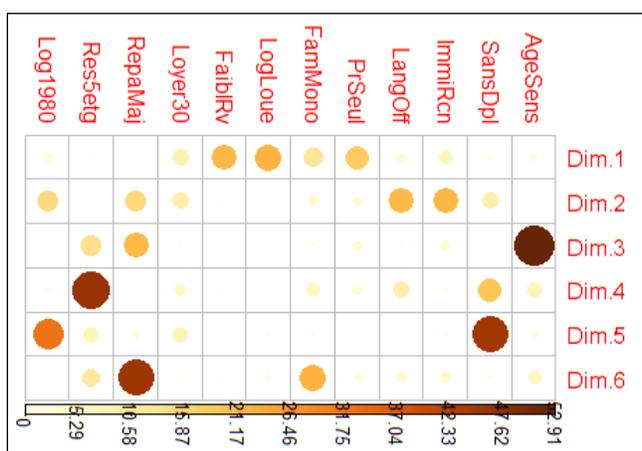


Figure 6: Contribution des variables à chaque composante de l'indice de sensibilité pour l'Île-du-Prince-Édouard

d) Manitoba

Pour le Manitoba, les résultats de l'ACP indiquent que ce sont les trois premières composantes qui ont une valeur propre supérieure à 1 (tableau 16). Celles-ci permettent d'expliquer 64,4 % de la variance. La proportion de personnes n'ayant aucun certificat, diplôme ou grade (SansDpl) et la proportion de personnes immigrantes récentes (ImmiRcn) contribuent davantage à la quatrième composante qu'aux trois premières (figure 7). Celle-ci a une valeur propre (0,993) qui s'approche de notre critère de 1. La contribution des variables pour les composantes cinq et six est moins importante que pour les autres, à l'exception de la proportion de locataires consacrant 30 % ou plus du revenu du ménage à l'habitation (Loyer30) qui y contribue le plus. Ainsi, les quatre premières composantes de l'ACP sont retenues dans le calcul de l'indice de sensibilité. Les quatre composantes représentent 72,6 % de la variance expliquée.

Tableau 16: ACP de l'indice de sensibilité pour le Manitoba

Composante	Valeur propre	Variance expliquée (%)	Variance expliquée cumulative (%)
1	4,259	35,493	35,493
2	1,890	15,748	51,240
3	1,574	13,114	64,355
4	0,993	8,272	72,627
5	0,803	6,693	79,320
6	0,614	5,115	84,435
7	0,535	4,459	88,894
8	0,417	3,472	92,366
9	0,336	2,797	95,162
10	0,289	2,406	97,568
11	0,156	1,301	98,870
12	0,136	1,130	100,000

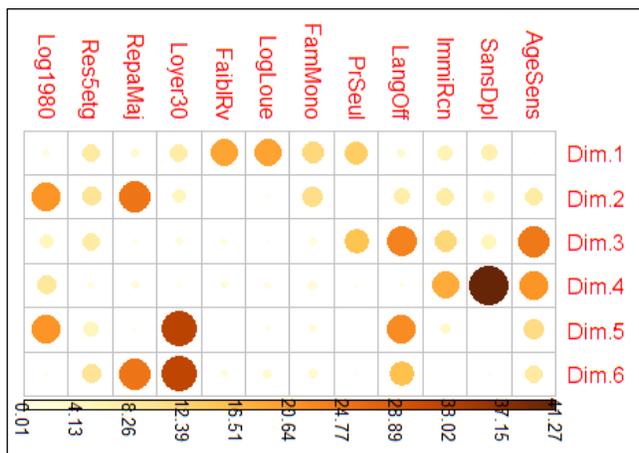


Figure 7: Contribution des variables à chaque composante de l'indice de sensibilité pour le Manitoba

e) Nouveau-Brunswick

Les résultats pour le Nouveau-Brunswick montrent que ce sont les quatre premières composantes qui ont une valeur propre supérieure à 1 (tableau 17). Celles-ci permettent d'expliquer 69,9 % de la variance. La proportion de résidences avec 5 étages ou plus (Res5etg) et la proportion de logements construits avant 1980 (Log1980) contribuent davantage à la cinquième et la sixième composante, respectivement (figure 8). Cependant, les valeurs propres de ces composantes s'éloignent grandement de notre critère de 1 et les variables concernées contribuent déjà aux autres composantes. Le calcul de l'indice de sensibilité est réalisé à l'aide des quatre premières composantes de l'ACP seulement.

Tableau 17: ACP de l'indice de sensibilité pour le Nouveau-Brunswick

Composante	Valeur propre	Variance expliquée (%)	Variance expliquée cumulative (%)
1	4,052	33,766	33,766
2	1,750	14,581	48,347
3	1,562	13,019	61,366
4	1,026	8,552	69,918
5	0,787	6,557	76,475
6	0,748	6,231	82,706
7	0,636	5,297	88,003
8	0,473	3,943	91,947
9	0,371	3,096	95,042
10	0,319	2,661	97,703
11	0,144	1,200	98,902
12	0,132	1,098	100,000

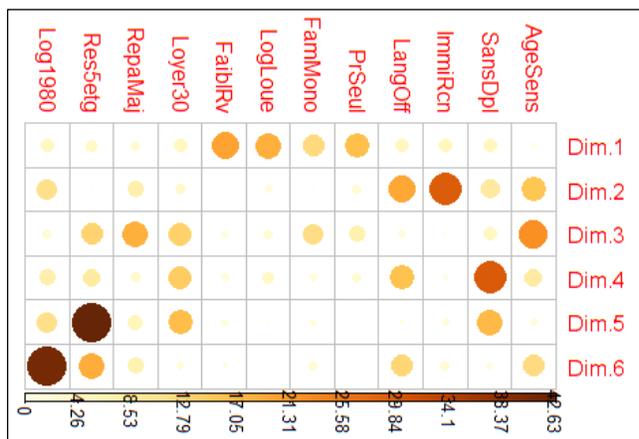


Figure 8: Contribution des variables à chaque composante de l'indice de sensibilité pour le Nouveau-Brunswick

f) Nouvelle-Écosse

Pour la Nouvelle-Écosse, les résultats de l'ACP indiquent que ce sont les quatre premières composantes qui ont une valeur propre supérieure à 1 (tableau 18). Celles-ci permettent d'expliquer 72,7 % de la variance. Seule la proportion de logements construits avant 1980 (Log1980) contribue grandement à la cinquième composante (figure 9). En ce qui concerne la sixième composante, sa valeur propre (0,664) est trop faible comparativement à notre critère de 1. La proportion de logements nécessitant des réparations majeures (RepaMaj) et la proportion de résidences avec 5 étages ou plus (Res5etg) contribuent également à la dimension deux. Ainsi, seulement les quatre premières composantes de l'ACP sont retenues dans le calcul de l'indice de sensibilité.

Tableau 18: ACP de l'indice de sensibilité pour la Nouvelle-Écosse

Composante	Valeur propre	Variance expliquée (%)	Variance expliquée cumulative (%)
1	3,791	31,592	31,592
2	2,427	20,227	51,819
3	1,497	12,479	64,298
4	1,003	8,358	72,656
5	0,795	6,622	79,278
6	0,664	5,531	84,809
7	0,525	4,373	89,182
8	0,372	3,100	92,282
9	0,319	2,656	94,938
10	0,291	2,424	97,362
11	0,176	1,465	98,827
12	0,141	1,173	100,000

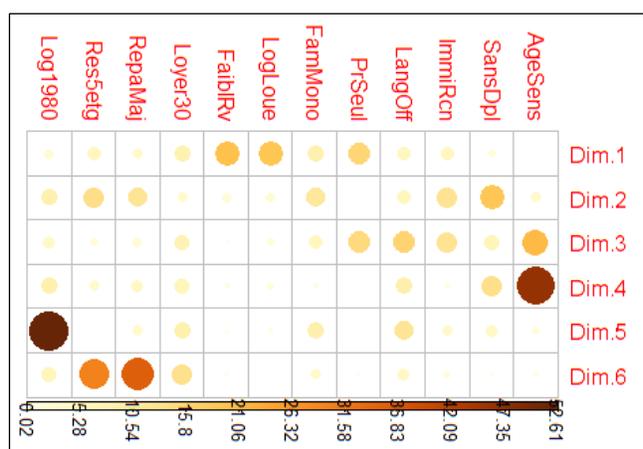


Figure 9: Contribution des variables à chaque composante de l'indice de sensibilité pour la Nouvelle-Écosse

g) Ontario

Les résultats pour l'Ontario montrent que ce sont les quatre premières composantes qui ont une valeur propre supérieure à 1 (tableau 19). Celles-ci permettent d'expliquer 70,1 % de la variance. La proportion de locataires consacrant 30 % ou plus du revenu du ménage à l'habitation (Loyer30) contribue davantage aux composantes cinq et six (figure 10). Les valeurs propres de ces composantes sont beaucoup plus basses que notre critère de 1. Ainsi, seulement les quatre premières composantes de l'ACP sont retenues dans le calcul de l'indice de sensibilité.

Tableau 19: ACP de l'indice de sensibilité pour l'Ontario

Composante	Valeur propre	Variance expliquée (%)	Variance expliquée cumulative (%)
1	4,027	33,556	33,556
2	1,763	14,688	48,245
3	1,484	12,365	60,610
4	1,138	9,486	70,095
5	0,739	6,159	76,255
6	0,694	5,786	82,041
7	0,574	4,787	86,828
8	0,469	3,906	90,735
9	0,400	3,332	94,067
10	0,345	2,879	96,946
11	0,196	1,635	98,581
12	0,170	1,419	100,000

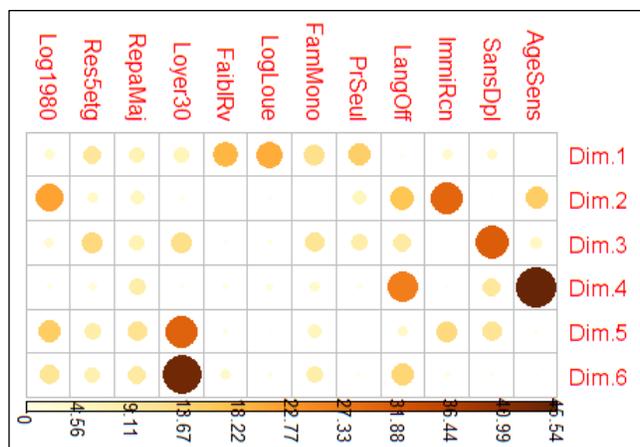


Figure 10: Contribution des variables à chaque composante de l'indice de sensibilité pour l'Ontario

h) Québec

Pour le Québec, les résultats de l'ACP indiquent que ce sont les quatre premières composantes qui ont une valeur propre supérieure à 1 (tableau 20). Celles-ci permettent d'expliquer 69,8 % de la variance. La proportion de personnes d'âges sensibles (AgeSens) et la proportion de de personnes ne connaissant pas une langue officielle (LangOff) contribuent plus à la cinquième composante qu'aux quatre premières (figure 11). Il est pertinent de conserver la cinquième composante, puisque sa valeur propre (0,947) est très proche de 1. Son inclusion dans le calcul de l'indice de sensibilité permet d'expliquer 77,7 % de la variance.

Tableau 20: ACP de l'indice de sensibilité pour le Québec

Composante	Valeur propre	Variance expliquée (%)	Variance expliquée cumulative (%)
1	4,190	34,916	34,916
2	1,588	13,231	48,147
3	1,470	12,247	60,394
4	1,132	9,436	69,831
5	0,947	7,888	77,719
6	0,618	5,148	82,867
7	0,565	4,709	87,576
8	0,421	3,508	91,084
9	0,411	3,421	94,506
10	0,372	3,099	97,604
11	0,174	1,449	99,053
12	0,114	0,947	100,000

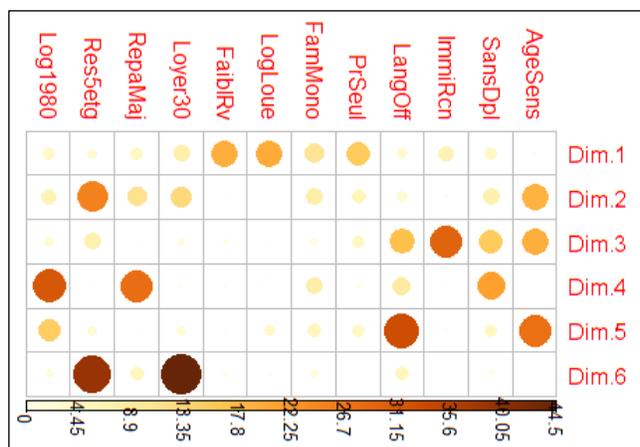


Figure 11: Contribution des variables à chaque composante de l'indice de sensibilité pour le Québec

i) Saskatchewan

Les résultats pour la Saskatchewan montrent que ce sont les trois premières composantes qui ont une valeur propre supérieure à 1 (tableau 21). Celles-ci permettent d'expliquer 63,8 % de la variance. Plusieurs variables contribuent fortement aux composantes quatre, cinq et six. Cela inclut la proportion de personnes n'ayant aucun certificat, diplôme ou grade (SansDpl), la proportion de personnes ne connaissant pas une langue officielle (LangOff), la proportion de locataires consacrant 30 % ou plus du revenu du ménage à l'habitation (Loyer 30) et la proportion de logements nécessitant des réparations majeures (RepaMaj) (figure 12). Afin de s'assurer que toutes les variables soient représentées dans le calcul de l'indice de sensibilité, les cinq premières composantes de l'ACP sont retenues plutôt que trois. Les cinq composantes représentent 77,4 % de la variance expliquée.

Tableau 21: ACP de l'indice de sensibilité pour la Saskatchewan

Composante	Valeur propre	Variance expliquée (%)	Variance expliquée cumulative (%)
1	4,043	33,693	33,693
2	1,923	16,028	49,722
3	1,686	14,050	63,771
4	0,837	6,976	70,747
5	0,800	6,665	77,412
6	0,641	5,339	82,750
7	0,603	5,025	87,776
8	0,498	4,147	91,923
9	0,379	3,157	95,080
10	0,278	2,314	97,394
11	0,187	1,558	98,951
12	0,126	1,049	100,000

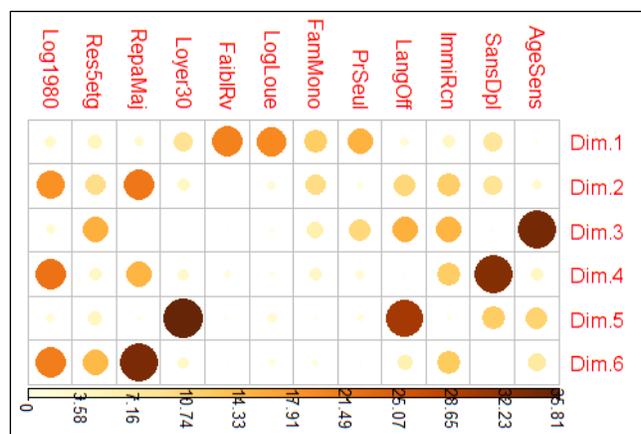


Figure 12: Contribution des variables à chaque composante de l'indice de sensibilité pour la Saskatchewan

j) Terre-Neuve-et-Labrador

Pour Terre-Neuve-et-Labrador, les résultats de l'ACP indiquent que ce sont les trois premières composantes qui ont une valeur propre supérieure à 1 (tableau 22). Celles-ci permettent d'expliquer 59,3 % de la variance. La proportion de locataires consacrant 30 % ou plus du revenu du ménage à l'habitation (Loyer30) contribue davantage à la quatrième qu'aux trois premières (figure 13). Afin de s'assurer de sa représentativité dans le calcul de l'indice de sensibilité, les quatre premières composantes de l'ACP sont retenues. La variance expliquée représente maintenant 67,1 %.

Tableau 22: ACP de l'indice de sensibilité pour Terre-Neuve-et-Labrador

Composante	Valeur propre	Variance expliquée (%)	Variance expliquée cumulative (%)
1	4,163	34,692	34,692
2	1,578	13,152	47,844
3	1,379	11,489	59,333
4	0,928	7,731	67,065
5	0,810	6,754	73,819
6	0,787	6,558	80,377
7	0,678	5,647	86,024
8	0,617	5,145	91,169
9	0,465	3,871	95,040
10	0,299	2,494	97,535
11	0,169	1,412	98,947
12	0,126	1,053	100,000

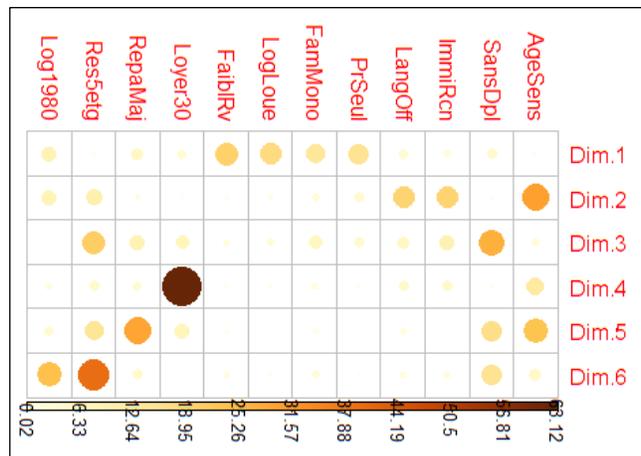


Figure 13: Contribution des variables à chaque composante de l'indice de sensibilité pour Terre-Neuve-et-Labrador

k) Territoires du Nord-Ouest + Yukon

Les résultats pour les Territoires du Nord-Ouest et du Yukon montrent que ce sont les trois premières composantes qui ont une valeur propre supérieure à 1 (tableau 23). Celles-ci permettent d'expliquer 63,3 % de la variance. La proportion de locataires consacrant 30 % ou plus du revenu du ménage à l'habitation (Loyer30), la proportion de logements nécessitant des réparations majeures (RepaMaj) et la proportion de logements construits avant 1980 (Log1980) contribuent plus à la quatrième composante qu'aux trois premières (figure 14). De plus, la valeur propre de la quatrième est 0,961 ce qui est proche de notre critère de 1. Le calcul de l'indice de sensibilité inclut les quatre premières composantes de l'ACP au lieu de trois, permettant d'expliquer 71,3 % de la variance.

Tableau 23: ACP de l'indice de sensibilité pour les Territoires du Nord-Ouest et le Yukon

Composante	Valeur propre	Variance expliquée (%)	Variance expliquée cumulative (%)
1	4,011	33,425	33,425
2	2,026	16,880	50,306
3	1,563	13,027	63,333
4	0,961	8,009	71,342
5	0,829	6,908	78,250
6	0,716	5,966	84,216
7	0,536	4,464	88,680
8	0,484	4,033	92,714
9	0,323	2,695	95,409
10	0,273	2,272	97,681
11	0,146	1,218	98,899
12	0,132	1,101	100,000

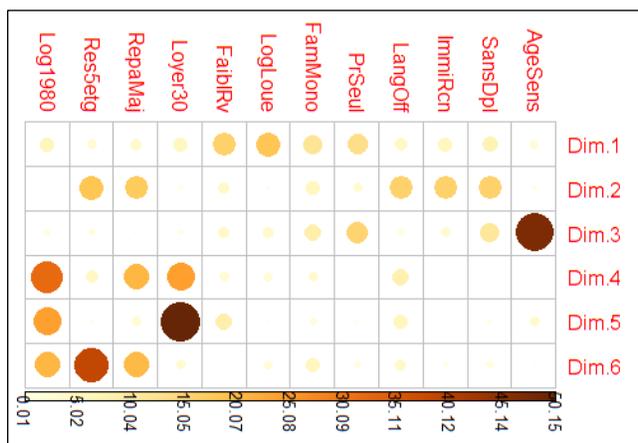


Figure 14: Contribution des variables à chaque composante de l'indice de sensibilité pour les Territoires du Nord-Ouest et le Yukon

3.5.1.2 Indice de capacité à faire face

Respect des postulats

Avant de procéder à la réalisation de l'ACP pour l'indice de capacité à faire face, il est essentiel de vérifier si les données de chaque province et territoire respectent les postulats.

1) Matrice de corrélation

L'observation des matrices de corrélation a permis de valider l'existence de corrélations entre les dix variables de l'indice de capacité à faire face pour chaque province et territoire.

2) Test de sphéricité de Bartlett

Le test de sphéricité de Bartlett permet de tester l'hypothèse selon laquelle la matrice de corrélation est une matrice d'identité, c'est-à-dire que les variables sont globalement indépendantes. Les résultats indiquent que le test est significatif ($p < 0,001$). Les variables sont donc liées et il y a présence de corrélations inter-items (tableau 24).

Tableau 24: Résultats du test de sphéricité de Bartlett pour l'indice de capacité à faire face

Province ou territoire	Khi-carré (χ^2)	Degrés de liberté	Probabilité (<i>p-value</i>)
Alberta	60 191,14	45	< 0,001
Colombie-Britannique	58 609,51	45	< 0,001
Île-du-Prince-Édouard	2 828,24	45	< 0,001
Manitoba	30 889,73	45	< 0,001
Nouveau-Brunswick	12 421,85	45	< 0,001
Nouvelle-Écosse	15 144,56	45	< 0,001
Ontario	223 344	45	< 0,001
Québec	97 669,7	45	< 0,001
Saskatchewan	11 375,89	45	< 0,001
Terre-Neuve-et-Labrador	3 903,67	45	< 0,001
Territoires du Nord-Ouest + Yukon	2 438,87	45	< 0,001

3) *Indice Kaiser-Meyer-Olkin (KMO)*

L'indice KMO permet de vérifier la qualité des corrélations inter-items. L'Île-du-Prince-Édouard, l'Ontario, les Territoires du Nord-Ouest et le Yukon obtiennent un indice KMO entre 0,8 et 0,9 ce qui est considéré comme bon. La majorité des provinces et territoires ont un résultat se situant entre 0,7 et 0,8. Cela signifie que les données présentent un ajustement moyen. La Saskatchewan est la seule province à obtenir un ajustement faible avec un indice KMO se situant entre 0,6 et 0,7. Compte tenu des résultats, nous avons appliqué l'ACP pour chaque province et territoire (tableau 25).

Tableau 25: Résultats de l'indice Kaiser-Meyer-Olkin pour l'indice de capacité à faire face

Province ou territoire	Indice KMO
Alberta	0,708
Colombie-Britannique	0,745
Île-du-Prince-Édouard	0,883
Manitoba	0,743
Nouveau-Brunswick	0,701
Nouvelle-Écosse	0,789
Ontario	0,805
Québec	0,779
Saskatchewan	0,676
Terre-Neuve-et-Labrador	0,715
Territoires du Nord-Ouest + Yukon	0,869

Résultats de l'analyse en composantes principales

a) Alberta

Pour l'Alberta, les résultats de l'ACP indiquent que ce sont les deux premières composantes qui ont une valeur propre supérieure à 1 (tableau 26). Celles-ci expliquent 75,4 % de la variance. La distance par rapport au musée le plus proche (Musee) et la distance par rapport à la bibliothèque la plus proche (Biblio) contribuent davantage aux composantes trois et quatre, respectivement (figure 15). Celles-ci ne seront pas retenues, puisque leurs valeurs propres (0,823 et 0,564) sont loin de notre critère de 1. Le calcul de l'indice de capacité à faire face est réalisé à l'aide des deux premières composantes de l'ACP seulement.

Tableau 26: ACP de l'indice de capacité à faire face pour l'Alberta

Composante	Valeur propre	Variance expliquée (%)	Variance expliquée cumulative (%)
1	5,256	52,564	52,564
2	2,281	22,813	75,377
3	0,823	8,234	83,611
4	0,564	5,637	89,248
5	0,405	4,051	93,299
6	0,333	3,325	96,625
7	0,184	1,839	98,464
8	0,094	0,942	99,406
9	0,056	0,565	99,971
10	0,003	0,029	100,000

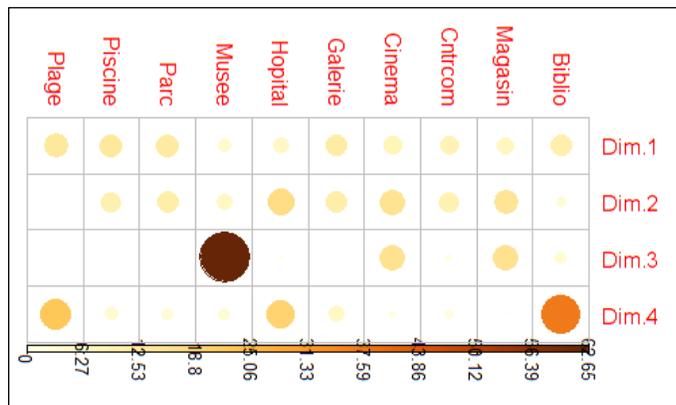


Figure 15: Contribution des variables à chaque composante de l'indice de capacité à faire face pour l'Alberta

b) Colombie-Britannique

Les résultats de l'ACP pour la Colombie-Britannique montrent que ce sont les deux premières composantes qui ont une valeur propre supérieure à 1 (tableau 27). Celles-ci permettent d'expliquer 73,7 % de la variance. Seulement les deux premières composantes de l'ACP sont retenues pour le calcul de l'indice de capacité à faire face (figure 16).

Tableau 27: ACP de l'indice de capacité à faire face pour la Colombie-Britannique

Composante	Valeur propre	Variance expliquée (%)	Variance expliquée cumulative (%)
1	4,793	47,934	47,934
2	2,572	25,721	73,656
3	0,647	6,470	80,126
4	0,588	5,879	86,005
5	0,425	4,246	90,251
6	0,330	3,297	93,547
7	0,292	2,918	96,466
8	0,216	2,163	98,628
9	0,115	1,154	99,782
10	0,022	0,218	100,000

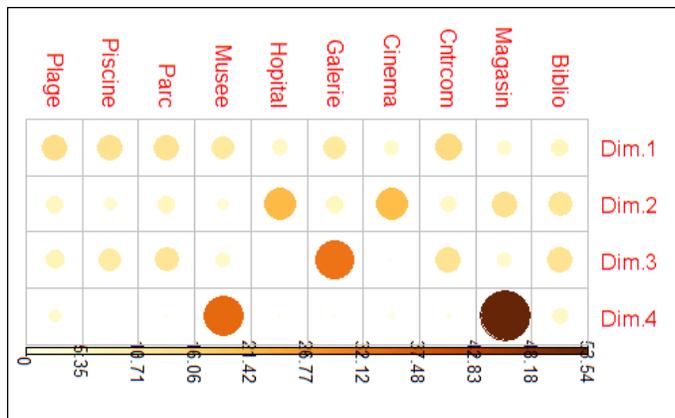


Figure 16: Contribution des variables à chaque composante de l'indice de capacité à faire face pour la Colombie-Britannique

c) Île-du-Prince-Édouard

Pour l'Île-du-Prince-Édouard, les résultats de l'ACP indiquent que c'est seulement la première composante qui a une valeur propre supérieure à 1 (tableau 28). Celle-ci permet d'expliquer 78,1 % de la variance. La distance par rapport au centre communautaire le plus proche (Ctrcom), la distance par rapport à la bibliothèque la plus proche (Biblio) et la distance par rapport à la plage la plus proche (Plage) contribuent davantage aux autres composantes que la première (figure 17). Cependant, leurs valeurs propres s'éloignent trop de notre critère de 1. Elles ne sont donc pas retenues dans le calcul de l'indice de capacité à faire face.

Tableau 28: ACP de l'indice de capacité à faire face pour l'Île-du-Prince-Édouard

Composante	Valeur propre	Variance expliquée (%)	Variance expliquée cumulative (%)
1	7,810	78,103	78,103
2	0,685	6,847	84,949
3	0,494	4,937	89,887
4	0,381	3,810	93,697
5	0,269	2,693	96,389
6	0,206	2,062	98,452
7	0,094	0,944	99,395
8	0,030	0,298	99,693
9	0,021	0,211	99,904
10	0,010	0,096	100,000

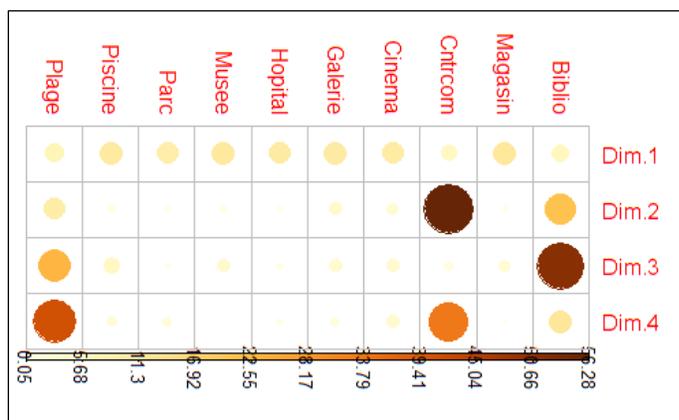


Figure 17: Contribution des variables à chaque composante de l'indice de capacité à faire face pour l'Île-du-Prince-Édouard

d) Manitoba

Les résultats de l'ACP pour le Manitoba montrent que ce sont les trois premières composantes qui ont une valeur propre supérieure à 1 (tableau 29). Celles-ci permettent d'expliquer 89,6 % de la variance. La distance par rapport à l'hôpital le plus proche (Hopital) contribue grandement à la composante quatre (figure 18). Puisque la valeur propre (0,377) de la quatrième composante est trop basse comparativement à notre critère de 1, celle-ci n'est pas retenue dans le calcul de l'indice de capacité à faire face.

Tableau 29: ACP de l'indice de capacité à faire face pour le Manitoba

Composante	Valeur propre	Variance expliquée (%)	Variance expliquée cumulative (%)
1	4,206	42,057	42,057
2	3,665	36,648	78,705
3	1,086	10,860	89,565
4	0,377	3,775	93,340
5	0,318	3,179	96,519
6	0,206	2,058	98,577
7	0,082	0,823	99,401
8	0,052	0,525	99,925
9	0,007	0,074	99,9997
10	0,00003	0,0003	100,000

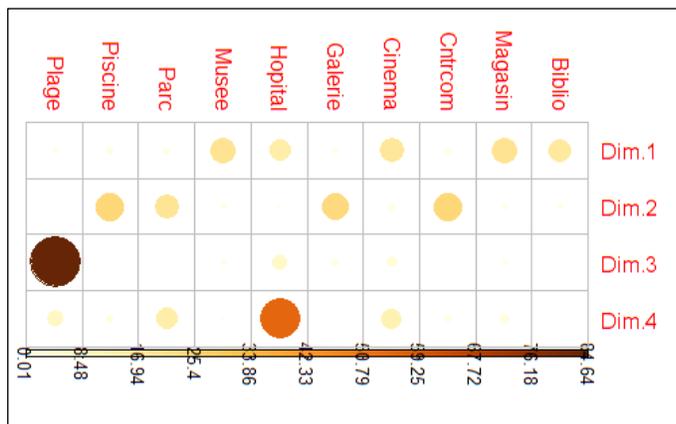


Figure 18: Contribution des variables à chaque composante de l'indice de capacité à faire face pour le Manitoba

e) Nouveau-Brunswick

Pour le Nouveau-Brunswick, les résultats de l'ACP indiquent que ce sont les deux premières composantes qui ont une valeur propre supérieure à 1 (tableau 30). Celles-ci permettent d'expliquer 80,0 % de la variance. La distance par rapport à la bibliothèque la plus proche (Biblio) et la distance par rapport à la plage la plus proche (Plage) contribuent davantage à la composante trois (figure 19). Il est alors intéressant de conserver la troisième composante, puisque sa valeur propre (0,964) est très proche de 1. Son inclusion dans le calcul de l'indice de capacité à faire face permet d'expliquer 89,7 % de la variance.

Tableau 30: ACP de l'indice de capacité à faire face pour le Nouveau-Brunswick

Composante	Valeur propre	Variance expliquée (%)	Variance expliquée cumulative (%)
1	4,742	47,417	47,417
2	3,260	32,603	80,020
3	0,964	9,638	89,658
4	0,425	4,248	93,906
5	0,287	2,872	96,779
6	0,138	1,379	98,157
7	0,088	0,881	99,038
8	0,065	0,652	99,691
9	0,022	0,220	99,911
10	0,009	0,089	100,000

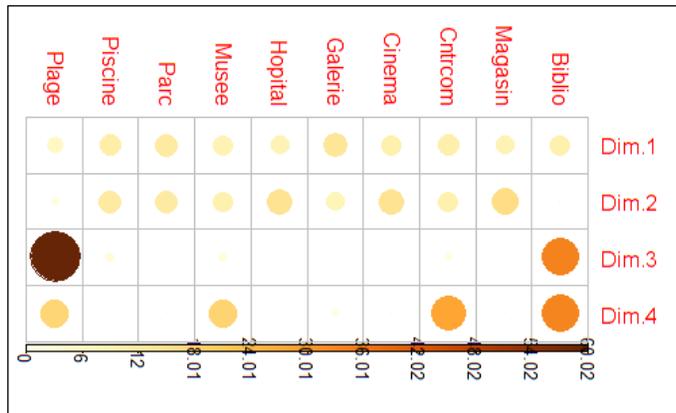


Figure 19: Contribution des variables à chaque composante de l'indice de capacité à faire face pour le Nouveau-Brunswick

f) Nouvelle-Écosse

Les résultats de l'ACP pour la Nouvelle-Écosse montrent que ce sont les trois premières composantes qui ont une valeur propre supérieure à 1 (tableau 31). Celles-ci permettent d'expliquer 82,7 % de la variance. La distance par rapport à l'hôpital le plus proche (Hopital) contribue davantage à la composante quatre (figure 20). La quatrième composante a une valeur propre (0,631) qui s'éloigne trop de 1, elle ne sera pas retenue dans le calcul de l'indice de capacité à faire face.

Tableau 31: ACP de l'indice de capacité à faire face pour la Nouvelle-Écosse

Composante	Valeur propre	Variance expliquée (%)	Variance expliquée cumulative (%)
1	4,983	49,833	49,833
2	2,205	22,053	71,886
3	1,081	10,807	82,693
4	0,631	6,308	89,001
5	0,340	3,397	92,398
6	0,313	3,134	95,532
7	0,229	2,295	97,827
8	0,142	1,424	99,251
9	0,075	0,746	99,998
10	0,0002	0,002	100,000

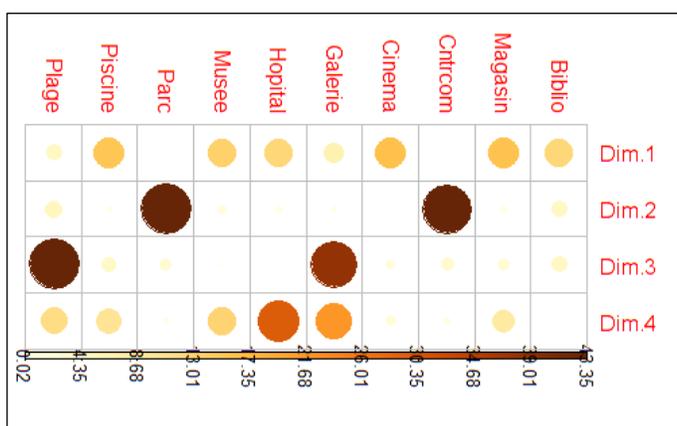


Figure 20: Contribution des variables à chaque composante de l'indice de capacité à faire face pour la Nouvelle-Écosse

g) Ontario

Pour l'Ontario, les résultats de l'ACP indiquent que ce sont les deux premières composantes qui ont une valeur propre supérieure à 1 (tableau 32). Celles-ci permettent d'expliquer 74,1 % de la variance. La distance par rapport à la galerie d'art la plus proche (Galerie) et la distance par rapport à l'hôpital le plus proche (Hopital) contribuent davantage aux composantes trois et quatre (figure 21). Comme ces variables contribuent déjà aux autres composantes, seulement les deux premières composantes de l'ACP ont retenues pour le calcul de l'indice de capacité à faire face.

Tableau 32: ACP de l'indice de capacité à faire face pour l'Ontario

Composante	Valeur propre	Variance expliquée (%)	Variance expliquée cumulative (%)
1	4,369	43,691	43,691
2	3,042	30,418	74,109
3	0,874	8,736	82,846
4	0,622	6,216	89,062
5	0,470	4,695	93,757
6	0,369	3,690	97,447
7	0,115	1,147	98,593
8	0,093	0,932	99,525
9	0,042	0,417	99,942
10	0,006	0,058	100,000

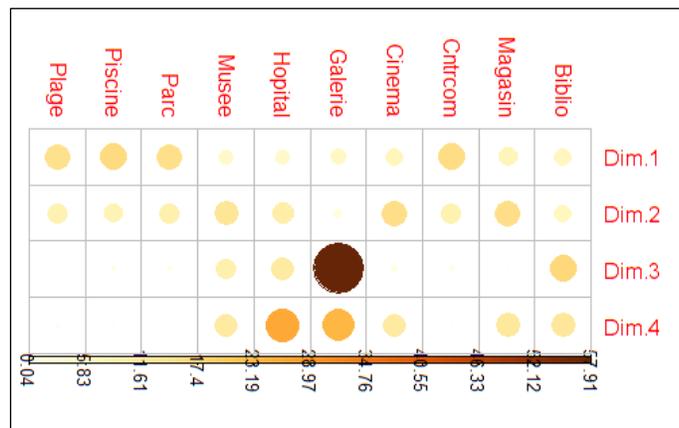


Figure 21: Contribution des variables à chaque composante de l'indice de capacité à faire face pour l'Ontario

h) Québec

Les résultats de l'ACP pour le Québec montrent que ce sont les deux premières composantes qui ont une valeur propre supérieure à 1 (tableau 33). Celles-ci permettent d'expliquer 72,7 % de la variance. La distance par rapport à la plage la plus proche (Plage) et la distance par rapport à la bibliothèque la plus proche (Biblio) contribuent davantage aux composantes trois et quatre, respectivement (figure 22). Cependant, leurs valeurs propres s'éloignent trop de notre critère de 1. Elles ne seront pas retenues dans le calcul de l'indice de capacité à faire face.

Tableau 33: ACP de l'indice de capacité à faire face pour le Québec

Composante	Valeur propre	Variance expliquée (%)	Variance expliquée cumulative (%)
1	4,566	45,660	45,660
2	2,707	27,065	72,726
3	0,711	7,113	79,838
4	0,614	6,137	85,975
5	0,428	4,285	90,260
6	0,355	3,555	93,815
7	0,304	3,045	96,860
8	0,159	1,591	98,450
9	0,133	1,330	99,781
10	0,022	0,219	100,000

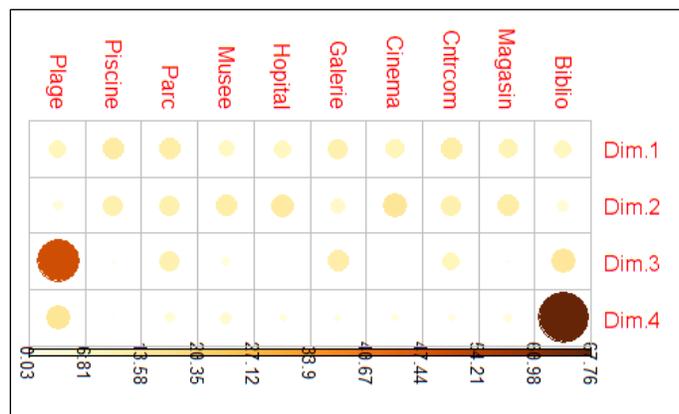


Figure 22: Contribution des variables à chaque composante de l'indice de capacité à faire face pour le Québec

i) Saskatchewan

Pour la Saskatchewan, les résultats de l'ACP indiquent que ce sont les trois premières composantes qui ont une valeur propre supérieure à 1 (tableau 34). Celles-ci permettent d'expliquer 78,1 % de la variance. La distance par rapport au centre communautaire le plus proche (Ctrncom) contribue grandement à la composante quatre (figure 23). Comme cette variable contribue déjà aux autres composantes, la quatrième composante n'est pas retenue pour le calcul de l'indice de capacité à faire face.

Tableau 34: ACP de l'indice de capacité à faire face pour la Saskatchewan

Composante	Valeur propre	Variance expliquée (%)	Variance expliquée cumulative (%)
1	4,431	44,314	44,314
2	2,065	20,647	64,961
3	1,310	13,102	78,064
4	0,886	8,863	86,926
5	0,642	6,421	93,348
6	0,320	3,204	96,552
7	0,151	1,506	98,058
8	0,095	0,946	99,003
9	0,065	0,653	99,656
10	0,034	0,344	100,000

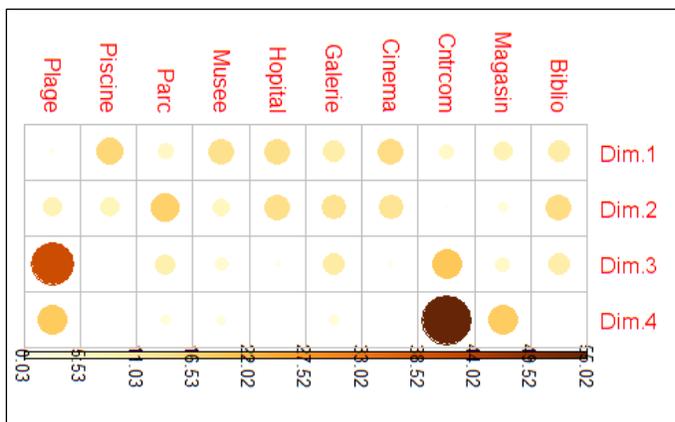


Figure 23: Contribution des variables à chaque composante de l'indice de capacité à faire face pour la Saskatchewan

j) Terre-Neuve-et-Labrador

Les résultats de l'ACP pour Terre-Neuve-et-Labrador montrent que ce sont les trois premières composantes qui ont une valeur propre supérieure à 1 (tableau 35). Celles-ci permettent d'expliquer 78,9 % de la variance. La distance par rapport à la bibliothèque la plus proche (Biblio) et la distance par rapport au centre communautaire le plus proche (Cntrcom) contribuent davantage à la dimension quatre (figure 24). La quatrième composante a une valeur propre (0,787) qui s'éloigne trop de 1, elle n'est pas retenue dans le calcul de l'indice de capacité à faire face.

Tableau 35: ACP de l'indice de capacité à faire face pour Terre-Neuve-et-Labrador

Composante	Valeur propre	Variance expliquée (%)	Variance expliquée cumulative (%)
1	4,725	47,250	47,250
2	1,848	18,481	65,731
3	1,316	13,159	78,891
4	0,787	7,869	86,759
5	0,472	4,718	91,477
6	0,364	3,639	95,116
7	0,237	2,367	97,483
8	0,157	1,568	99,051
9	0,051	0,511	99,562
10	0,044	0,438	100,000

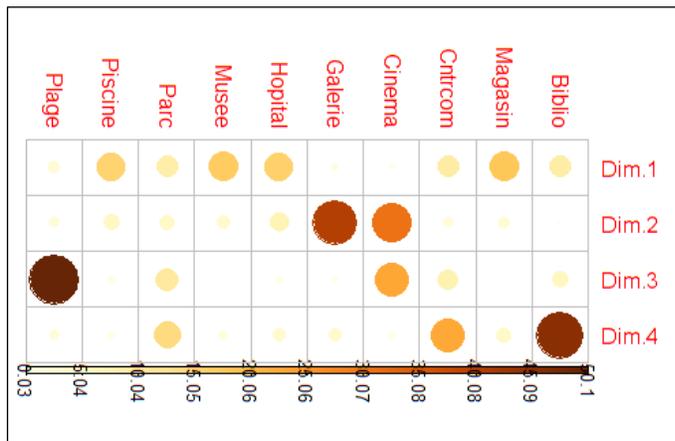


Figure 24: Contribution des variables à chaque composante de l'indice de capacité à faire face pour Terre-Neuve-et-Labrador

k) Territoires du Nord-Ouest et Yukon

Pour les Territoires du Nord-Ouest et le Yukon, les résultats de l'ACP indiquent que c'est seulement la première composante qui a une valeur propre supérieure à 1 (tableau 36). Celle-ci permet d'expliquer 88,5 % de la variance. Toutes les variables contribuent minimalement à la première composante (figure 25). Même si certaines variables contribuent davantage aux composantes suivantes, leurs valeurs propres sont inférieures à notre critère de 1. Le calcul de l'indice de capacité à faire face est réalisé à l'aide de la première composante seulement.

Tableau 36: ACP de l'indice de capacité à faire face pour les Territoires du Nord-Ouest et le Yukon

Composante	Valeur propre	Variance expliquée (%)	Variance expliquée cumulative (%)
1	8,851	88,515	88,515
2	0,806	8,062	96,577
3	0,195	1,951	98,528
4	0,082	0,816	99,344
5	0,038	0,378	99,722
6	0,021	0,215	99,937
7	0,005	0,049	99,986
8	0,001	0,009	99,995
9	0,0003	0,003	99,998
10	0,0002	0,002	100,000

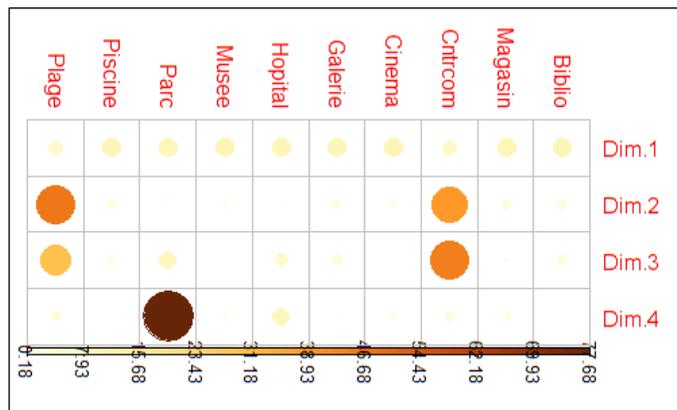


Figure 25: Contribution des variables à chaque composante de l'indice de capacité à faire face pour les Territoires du Nord-Ouest et le Yukon

3.5.1.3 Indice d'exposition et Îlots de chaleur urbains

La modélisation finale a été réalisée à l'aide du logiciel ArcGIS Pro parce que son utilisation facilitait grandement la visualisation des résultats cartographiques dans des temps de traitement rapides. Le tableau 37 recense les coefficients de détermination (R^2) et l'erreur quadratique moyenne (RMSE) produits pour chaque modèle utilisé dans la production des couches de données cartographiant les îlots de chaleur urbains. De manière générale, les modèles produits sont assez bien ajustés aux données, et rendent compte d'une importante proportion de la variance de la variable d'intérêt tout en produisant, en moyenne, une faible quantité d'erreurs. Les résultats obtenus sont comparables à ceux d'une étude québécoise similaire (Marchal *et al.*, 2022).

Tableau 37: Coefficients de détermination et erreur quadratique moyenne des modèles

Région	Jeu de données de validation		Jeu de données complet	
	R^2	RMSE	R^2	RMSE
Maritimes	0,818	1,096	0,814	1,090
Québec	0,867	1,589	0,868	1,579
Ontario	0,786	1,619	0,790	1,606
Centre	0,776	1,782	0,778	1,764
Côte-Ouest	0,871	1,584	0,874	1,565

Comme le montre l'exemple de la figure 26, il ne semble pas y avoir de dépendance entre les erreurs produites par les modèles et la valeur prédite par ceux-ci. En effet, l'erreur semble distribuée aléatoirement et n'être que très faiblement corrélée avec la température prédite.

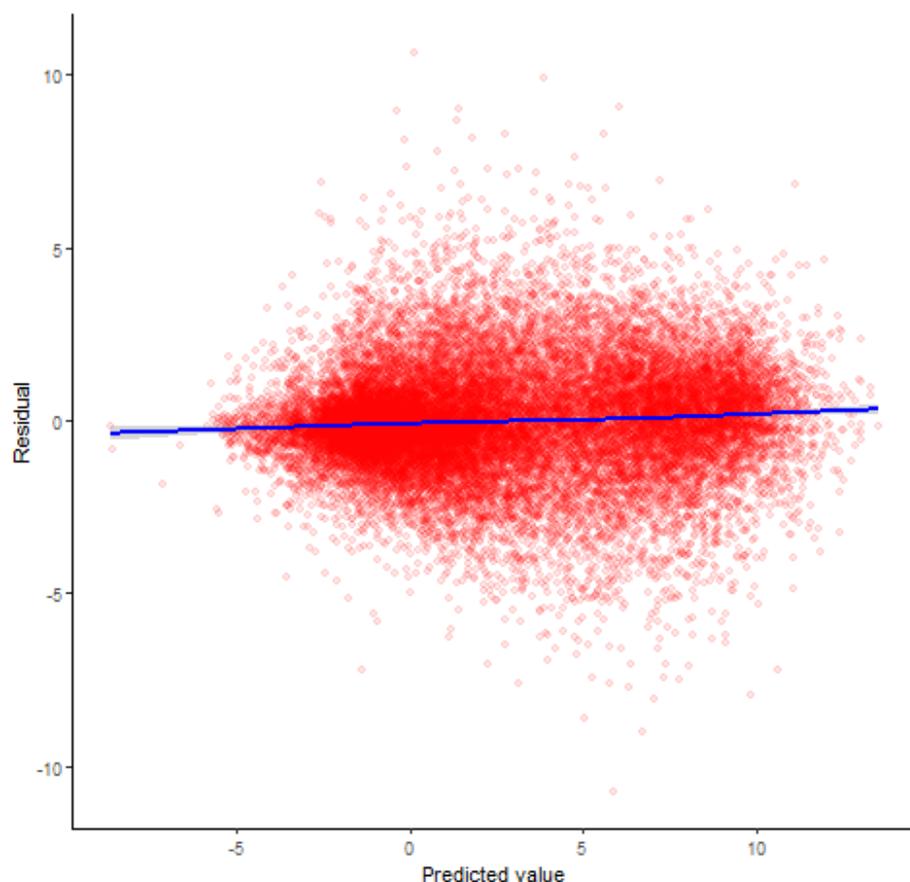


Figure 26: Valeurs prédites et erreurs produites par le modèle, jeu de données test, province de Québec

Afin de valider les résultats issus des analyses précédemment décrite à l'aide de données externes, nous avons comparé les résultats cartographiés à deux sources d'information :

Une couche produire par le Centre d'enseignement et de recherche en foresterie (CERFO) pour le Québec urbanisé à l'aide de données 2012-2013 principalement issues d'imagerie satellitaire. Il s'agit d'une variable ordinale comportant 9 classes décrivant le phénomène d'îlot de chaleur/fraîcheur.

Des données numériques enregistrées sur le terrain à l'aide de 75 capteurs de température répartis sur le territoire de la ville de Québec. Il s'agit ici de trois valeurs moyennes de température (24h, diurne, nocturne) estimées pour la période du 1^{er} juillet au 1^{er} septembre 2022.

Le tableau 38 montre les coefficients de corrélation sur les rangs estimés entre la température prédite par le modèle et les données externes de validation. Ces corrélations, de moyenne intensité, sont toutes statistiquement significatives au seuil de 0,01.

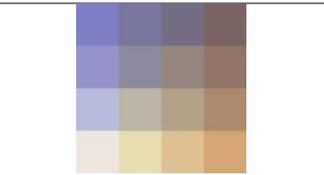
Tableau 38: Corrélation en la température prédite par le modèle et des données externes

Indicateur	RHO de Spearman et valeur de p
CERFO	0,644 ; p < 0,01
Température moyenne au capteur	0,460 ; p < 0,01
Température moyenne diurne au capteur	0,346 ; p < 0,01
Température moyenne nocturne au capteur	0,448 ; p < 0,01

3.5.2 Représentation cartographique

Cette section présente les détails associés à la représentation des quatre indices cartographiés. Le tableau 39 recense les couches de données géospatiales qui ont fait l'objet d'une cartographie, la méthode de discrétisation, le nombre de classes ainsi que la palette de couleurs utilisées.

Tableau 39: Discrétisation et palettes de couleurs utilisées dans la représentation graphique des différentes couches

Couche	Méthode de discrétisation	Nombre de classes	Palette de couleurs
Sensibilité	Quantiles par province	5	
Capacité à faire face	Quantiles par province	5	
Vulnérabilité	Quantiles par province	5	
Exposition	Quantiles par province	5	
Relation entre la vulnérabilité et l'exposition	Quantiles par variable et par province	4 par 4	
Îlots de chaleur	Amplitude égale	22	

3.5.2.1 Indices de sensibilité, de capacité à faire face et de vulnérabilité

Pour les indices de sensibilité et de capacité à faire face, la valeur numérique des indices obtenus a fait l'objet d'une classification en 5 quantiles, par province. Les classes ainsi obtenues ont par la suite été étiquetées comme suit : très faible, faible, moyenne, forte, très forte (figures 27 et 28).

En ce qui concerne l'indice de vulnérabilité, une normalisation entre 0 et 1 des indices de sensibilité et de capacité à faire face appliquée, puis une opération arithmétique a été effectuée pour créer le nouvel indice (section 3.4.3), faisant en sorte que la plage des valeurs possibles de l'indice s'étende de 0 à 2. Ce nouveau résultat a été classé en 5 quantiles pour chaque province puis étiqueté (figure 29).



Figure 27: Indice de sensibilité aux vagues de chaleur – Région d'Ottawa

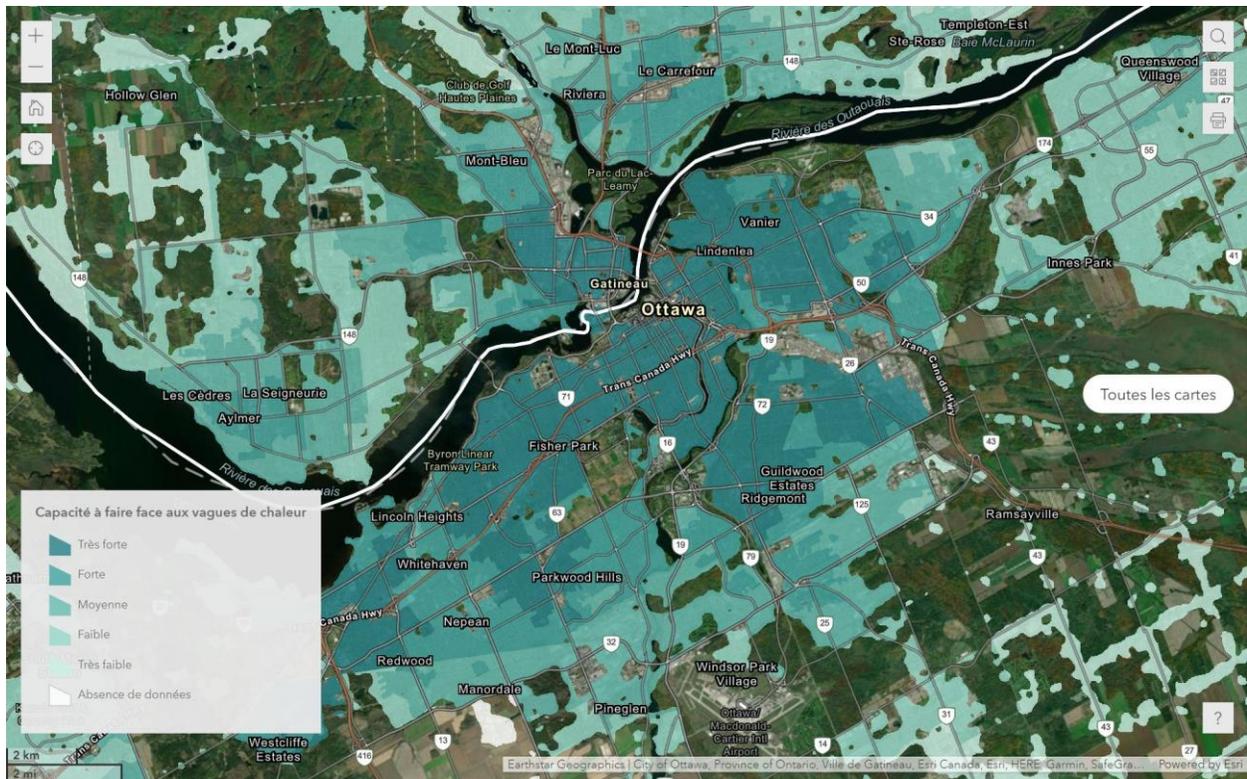


Figure 28: Indice de capacité à faire face aux vagues de chaleur – Région d’Ottawa

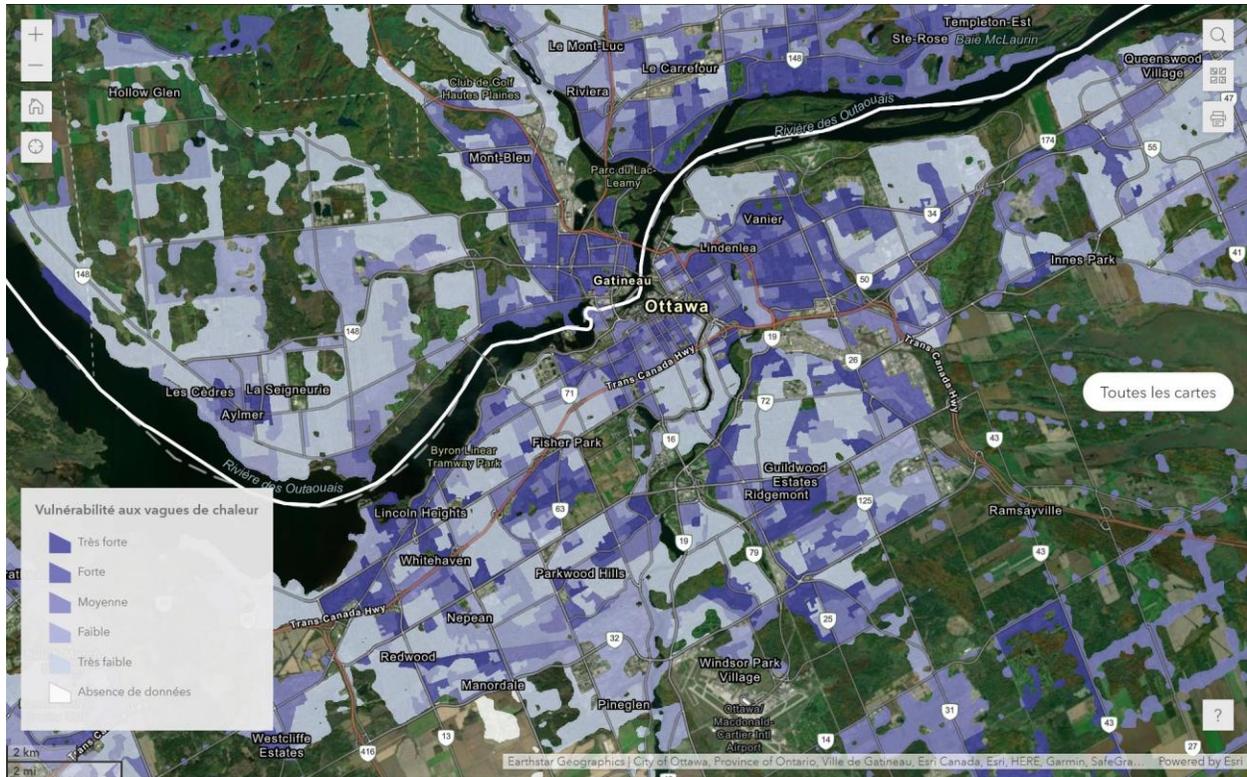


Figure 29: Indice de vulnérabilité aux vagues de chaleur – Région d’Ottawa

3.5.2.2 Indice d'exposition

Les résultats cartographiques ont fait l'objet de deux traitements dans le but de représenter cartographiquement le phénomène. Dans un premier temps, une mise en classes (n=22) à intervalles égaux des valeurs prédites de température relative a été effectuée sur les pixels chevauchant la zone couverte par le modèle. Le lissage de la valeur des pixels a été réalisé à l'aide d'une méthode de rééchantillonnage cubique afin d'améliorer le rendu cartographique en diminuant la pixelisation de l'image. Un tuilage matriciel a été appliqué sur la couche matricielle de données avant que celle-ci ne soit exportée vers un service web (figure 30).

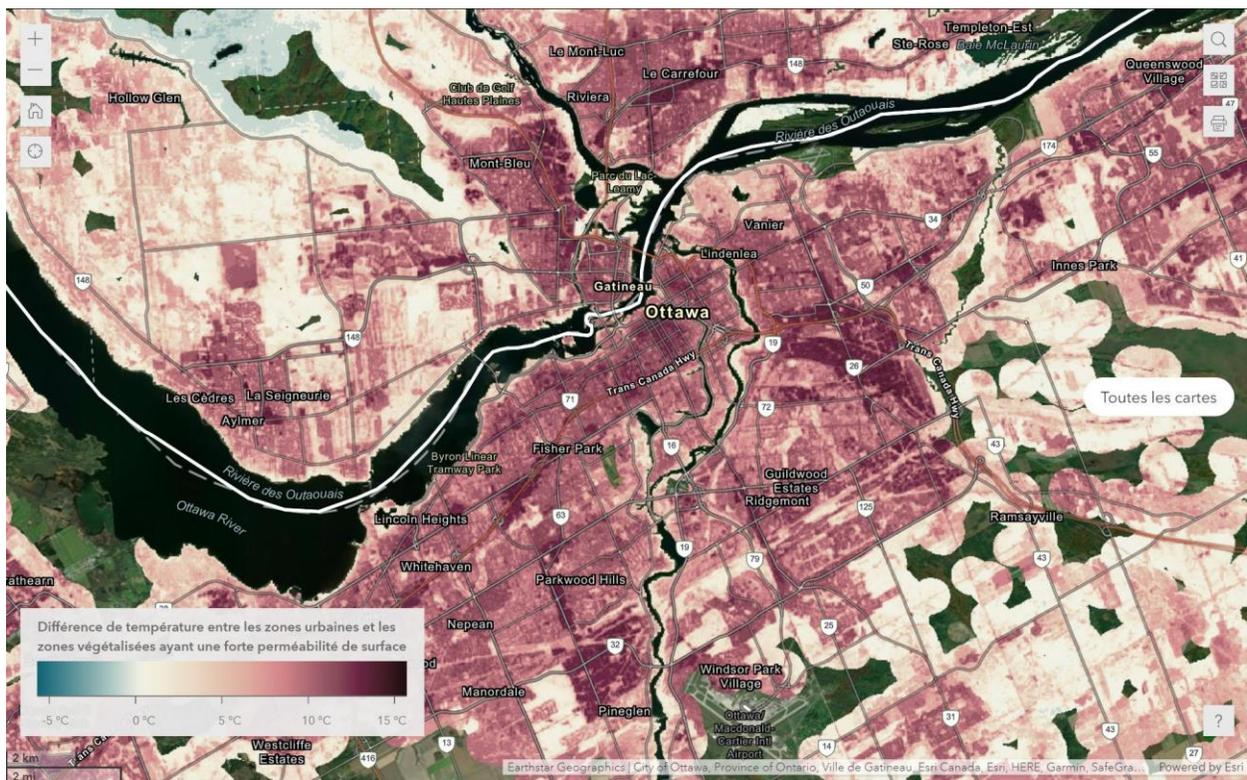


Figure 30: Îlots de chaleur urbains– Région d'Ottawa

La seconde démarche de cartographie des résultats a consisté à agréger par la moyenne, les valeurs prédites de température relative aux zones habitées des aires de diffusion de Statistique Canada. Les données vectorielles ont par la suite fait l'objet d'une mise en classe par quintiles avant d'être exportées vers un service web (figure 31).

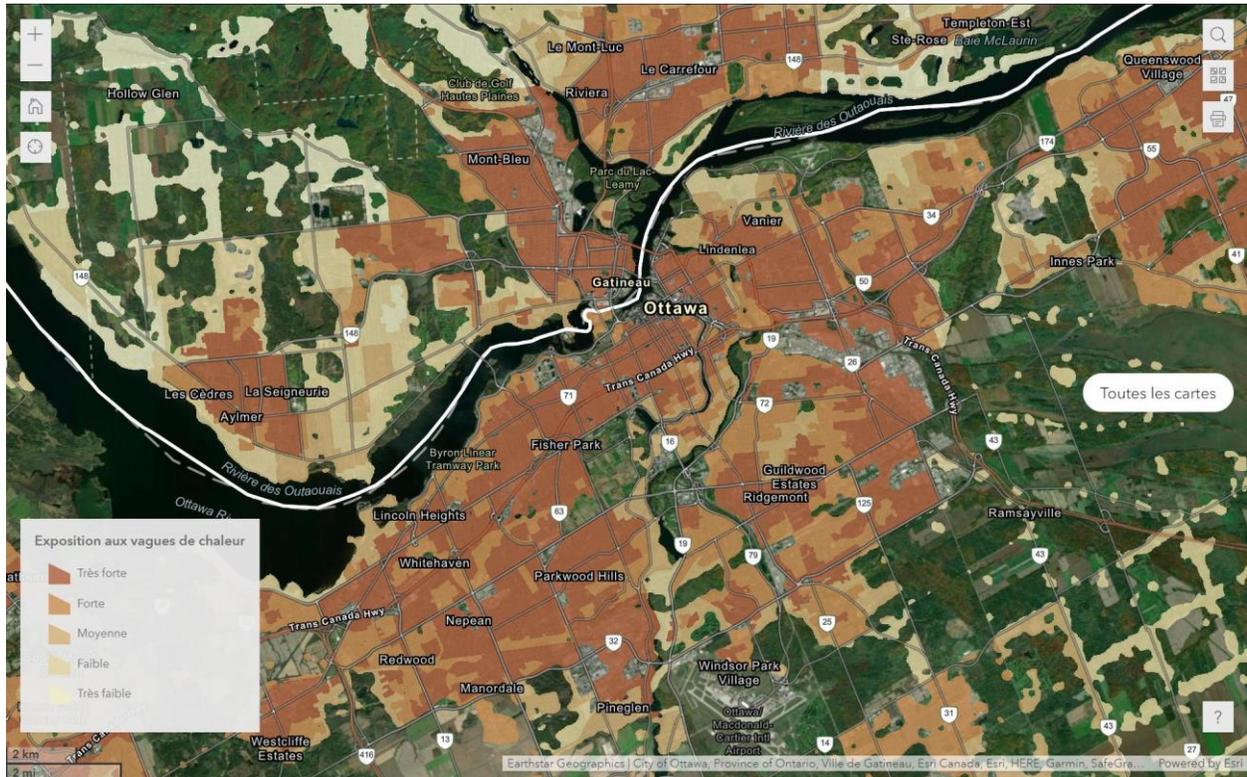


Figure 31: Indice d'exposition aux vagues de chaleur – Région d'Ottawa

3.5.2.3 Vulnérabilité et exposition (carte biviariée)

L'équipe de recherche a eu recours à l'utilisation d'une carte thématique biviariée pour représenter sur un même écran les indices de vulnérabilité et d'exposition. Une carte biviariée est une carte thématique qui permet de représenter simultanément deux variables sur une même carte en utilisant des couleurs ou des motifs différents (figure 32). Cette méthode de cartographie facilite la visualisation de deux variables en même temps, permettant ainsi de saisir rapidement les relations entre les deux. Cette représentation graphique peut aider à identifier les zones où les deux variables sont corrélées ou non corrélées et peut aider à prendre des décisions en identifiant les zones qui ont des profils différents pour les deux variables. La méthode de classification des données utilisée est celle d'un croisement des quartiles estimés à l'échelle de la province pour les indices de vulnérabilité et d'exposition.



Figure 32: Vulnérabilité et exposition (carte biviariée) – Région d'Ottawa

3.6 CONCLUSION

Un des objectifs de ce projet de recherche était de cartographier la vulnérabilité et l'exposition aux vagues de chaleur accablante des populations vivant dans les logements de 156 régions urbaines du Canada. Pour y arriver, une revue de littérature et une définition des principaux concepts mobilisés ont été réalisées. Ces actions auront notamment permis d'identifier les dimensions de la vulnérabilité et de l'exposition qui devaient être estimées de même que de recenser les données qui devaient être utilisées pour calculer des indicateurs statistiques et géographiques. De plus, l'équipe a ainsi documenté les méthodes généralement utilisées pour synthétiser l'information afin de créer des indices.

Dans le cadre de ce projet, notre équipe a développé une méthodologie permettant de sélectionner et de construire des indicateurs de sensibilité, de capacité à faire face, de vulnérabilité et d'exposition aux vagues de chaleur accablante. Des indicateurs socio-économiques et démographiques ont été calculés à l'aide de données du recensement canadien de 2021 agrégées à l'échelle de l'AD de Statistique Canada. Des indicateurs de proximité à différents services ont été estimés. Notre équipe a eu recours à l'ACP pour synthétiser ces informations sous forme d'indices. Un modèle prédictif a été utilisé afin de cartographier à fine échelle le phénomène d'îlots de chaleur urbaine en utilisant un algorithme d'apprentissage machine et des indicateurs estimant la densité de végétation, l'imperméabilité du sol, la densité de zones bâties, la proximité de l'eau, les coordonnées géographiques et l'altitude.

Enfin, notre équipe a cartographié la sensibilité, la capacité à faire face, la vulnérabilité et l'exposition aux vagues de chaleur accablante de 156 régions urbaines du Canada en utilisant des méthodes de cartographie thématique univariée et bivariée. Une carte des différences relatives de température à haute résolution spatiale a aussi été réalisée (îlots de chaleur urbains).

4 PRODUCTION DE L'OUTIL CARTOGRAPHIQUE

4.1 INTRODUCTION

Les vagues de chaleur et des îlots de chaleur urbains sont des enjeux de plus en plus importants pour les villes canadiennes. Afin de mieux comprendre ces phénomènes et de s'y adapter, un outil cartographique en ligne interactif a été développé pour répondre aux besoins de deux publics distincts. D'une part, pour les intervenants du milieu tels que les professionnels de l'aménagement du territoire, de la santé publique et de l'adaptation aux changements climatiques, travaillent à la planification, la mise en place de mesures de prévention et la gestion des vagues de chaleur et aux autres enjeux reliés. D'autre part, pour le grand public intéressé par la compréhension des vagues de chaleur et des îlots de chaleur urbains dans leur communauté. Ce chapitre explorera les caractéristiques de l'outil cartographique interactif et comment il peut être utilisé pour mieux comprendre et s'adapter aux phénomènes de vagues de chaleur et d'îlots de chaleur urbains.

4.2 OBJECTIFS

L'objectif principal de ce volet du projet est de produire un outil cartographique en ligne permettant de diffuser les indices de sensibilité, de capacité à faire face, de vulnérabilité, d'exposition et de localisation des îlots de chaleur urbains de 156 régions urbaines du Canada à l'intention du grand public et des intervenants du milieu. On y retrouve également quatre sous-objectifs suivants :

- Concevoir et produire un prototype de l'outil cartographique interactif qui sera évalué par les intervenants du milieu, afin de vérifier l'exactitude des cartes et de recueillir leurs commentaires et évaluations pour améliorer le produit final.
- Proposer une solution finale qui permet l'entretien et le maintien de l'outil cartographique pour assurer la pérennité de la diffusion des résultats à faible coût et sans avoir recours à des professionnel coûteux et difficilement mobilisables par le DGUL, étant donné la durée limitée du financement du projet.
- Développer un site Web proposant une cartographie accessible dans une application conviviale offrant certaines fonctionnalités d'analyse
- Rendre disponibles les couches d'information et la méthodologie pour permettre aux intervenants du milieu d'étendre la portée géographique du projet ou de personnaliser l'outil en utilisant des données locales qui ne sont pas disponible à notre échelle d'analyse.

4.3 CHOIX DE LA SOLUTION TECHNOLOGIQUE DE CARTOGRAPHIE WEB

Les produits d'Esri (Environmental Systems Research Institute) ont été utilisés dans la conception de l'application cartographique. Le logiciel ArcGIS Pro a d'abord été utilisé comme outil de conception des cartes avant que celles-ci soient téléversées sur le portail *ArcGIS Online* (AGOL) de l'Université Laval. AGOL propose de nombreux outils pour l'élaboration de cartographie Web interactive. Après avoir conçu les cartes Web à l'aide de l'interface *Map Viewer*, ces dernières ont été intégrées dans le module *ArcGIS Experience Builder* (ExB). Ce dernier sert au développement, la personnalisation et la mise en ligne d'applications Web. L'équipe a choisi de recourir à ExB notamment parce que l'interface cartographique s'adapte adéquatement aux plateformes mobiles. En effet, le passage du navigateur web conventionnel au navigateur sur appareil mobile est pris en charge par ExB, permettant ainsi de personnaliser l'interface en fonction de la taille d'écran. De plus, ExB permet d'implémenter plusieurs cartes dans la même application et de synchroniser celles-ci. Par souci de pérennisation des travaux, l'équipe aura recours à la personnalisation offerte par ExB, permettant ainsi de stocker les couches et l'application sur les serveurs utilisés par AGOL. Enfin, ExB permet d'importantes personnalisations de la fenêtre cartographique, comme l'intégration de widgets aux applications multiples.

4.4 ÉLABORATION ET ÉVALUATION D'UN PROTOTYPE

4.4.1 Élaboration

Pour élaborer le prototype de l'outil cartographique, l'équipe s'est largement appuyée sur le travail effectué pour L'atlas de la vulnérabilité de la population québécoise aux aléas climatiques (Barrette *et al.*, 2018). L'objectif était d'élaborer un prototype où il serait possible pour les intervenants de naviguer et mesurer la qualité des cartes produites en évaluant leur précision et leur pertinence pour leurs besoins spécifiques en raison de leur connaissance approfondie de leur territoire et d'y laisser des commentaires à notre intention. C'est également l'occasion d'identifier les améliorations nécessaires pour garantir une expérience optimale pour les futurs utilisateurs.

Au printemps 2022, une première représentation cartographique des indices avec les données du recensement canadien de 2016 a été réalisée (les données de 2021 n'étaient pas encore disponibles) et deux versions de prototype ont été créées. Pour la première version, les indices de sensibilité et d'exposition ont été intégrés au prototype pour les RMR de Victoria, Windsor, Toronto et Ottawa, de même qu'une carte bivariée entre ces deux indices. Pour la deuxième version, à l'été 2022 (RMR de Victoria seulement), en

plus des couches mentionnées ci-haut, une couche représentant la proportion d'enfants (≤ 4 ans) et de personnes âgées (≥ 65 ans) a été intégrée, puisque les données du recensement de 2021 étaient disponibles pour ces variables.

Les widgets suivants ont été intégrés : zoom, sélectionner, vue cartographique par défaut, rechercher, rechercher ma localisation, liste de couche, légende, bibliothèque de fonds de carte, mesure, table attributaire et fenêtre contextuelle. Une particularité du prototype est l'intégration du widget éditeur qui permet aux intervenants d'aller créer des polygones sur un secteur de leur ville ou région sur la carte et d'y joindre un commentaire identifiant une zone qui semblerait problématique ou simplement pour écrire un commentaire ou une question.

4.4.2 Évaluation de l'outil par les intervenants du milieu

Lors de l'évaluation de l'outil par les intervenants du milieu, deux volets ont été mis en place. Le premier volet a impliqué une série d'entrevues avec quelques représentants des villes d'Ottawa, Windsor, Toronto et Victoria. Le deuxième volet de l'évaluation a été mené en collaboration avec la Ville de Victoria et le Capital Regional District. Au printemps, une présentation du prototype a été faite à un plus grand groupe, suivi par la mise à disposition de l'outil pour la saison estivale et un sondage a été réalisé à l'automne pour évaluer sa pertinence.

4.4.2.1 Entrevue avec les intervenants du milieu des villes de Windsor, Toronto, Ottawa et Victoria

Entre le 8 avril et le 2 mai 2022, des intervenants de quatre grandes villes canadiennes du territoire couvert par le projet actuel ont été rencontrés (Ottawa : trois intervenants, Windsor : un intervenant, Victoria : cinq intervenants et Toronto : un intervenant). Au moins un intervenant par ville qui a été sélectionnée pour les entrevues avait été rencontré préalablement à l'été 2021. Les intervenants ont été choisis pour leur connaissance approfondie de leur territoire et des réalités liées à la gestion des îlots et des vagues de chaleur.

4.4.2.1.1 Objectifs

L'objectif général des entrevues était d'échanger avec les intervenants du milieu qui seront des utilisateurs potentiels de l'outil cartographique. Les objectifs spécifiques des rencontres étaient:

- Évaluer si nos indices (sensibilité et exposition) représentent bien la réalité vécue sur leur territoire.

- Évaluer la convivialité de notre outil cartographique (utilisation des différentes couches d'informations, utilisation des fenêtres contextuelles pour prendre connaissance des valeurs des variables faisant partie de nos indices).
- Connaître de quelles façons l'outil cartographique permettra d'aider les intervenants dans leurs interventions sur le terrain, leurs projets et leur gestion des vagues de chaleur et vérifier s'il répond à leurs besoins.

4.4.2.1.2 Méthodologie des entrevues

Les entrevues avec les intervenants se sont déroulées sous la forme de discussions ouvertes, l'équipe souhaitant favoriser une approche inductive de la collecte et de l'analyse des données. L'approche inductive est une approche ascendante priorisant les données et l'expérience vécue, alors que le cadre de l'analyse se construit au fur et à mesure de l'avancement du projet. Les mêmes questions ont été posées à chacune des réunions. Les entrevues ont été enregistrées avec les logiciels *Teams* (3) ou *Zoom* (1 : Windsor). Elles ont été retranscrites à l'aide de l'outil *dictée* de *Word* et ont été vérifiées, ordonnées et corrigées manuellement dans leur intégralité. La ville de Toronto a également fait parvenir des commentaires par l'entremise de notre outil cartographique (widget éditeur) et la ville d'Ottawa a envoyé une liste de commentaires après la réunion. Un total de six documents font donc partie du corpus d'informations faisant l'objet de l'analyse thématique actuelle (quatre retranscriptions d'entrevues et deux fichiers de commentaires). L'analyse qualitative thématique du texte a été réalisée à l'aide du logiciel *NVivo* version 1.6.1 (*QSR International*). L'intégralité des textes a été codée et une structure de nœuds hiérarchique a été privilégiée pour l'encodage du matériel (14 nœuds parents (thèmes) et 49 nœuds enfants (sous-thèmes)).

Autant les interventions des participants des quatre villes que celles de notre équipe de l'Université Laval ont été codées, mis à part nos questions. Comme il s'agissait de discussions libres, une grande partie de l'information aurait été perdue advenant l'omission du codage du texte provenant de notre équipe. Cependant, le texte a été codé dans deux fichiers séparés et les résultats ont été répartis en plusieurs catégories : suggestions des intervenants, évaluation de la représentation de la réalité sur le terrain et, commentaires généraux provenant seulement des intervenants des villes.

Une analyse thématique des informations tirées des entrevues a été réalisée. Les résultats ont été divisés en deux catégories : l'évaluation de la forme et du contenu de l'outil cartographique et les grands thèmes abordés au cours des entrevues.

4.4.2.1.3 Résultats

Évaluation de la forme et du contenu de l’outil cartographique

L’ensemble des thèmes principaux portant sur la forme et le contenu de l’outil cartographique (accès au matériel du projet, indices et méthodologie, modèle et limites, représentation cartographique de l’écoumène, rétroaction et évaluation de l’outil cartographique, suggestions des intervenants, utilisateurs de l’outil, utilisation de l’interface cartographique et commentaires généraux) ont été abordés par les intervenants des quatre villes participantes, alors que 25 sous-thèmes sur 34 ont été abordés par au moins trois des quatre grandes villes (tableau 40).

Accès au matériel du projet

La question de l’accès au matériel du projet a été mentionnée à plusieurs reprises (47). Plusieurs questions étaient de nature générale (13), d’autres plus précises à propos de l’accès à l’outil cartographique (13) et de l’accès aux données brutes et à notre méthodologie (21). Les intervenants aimeraient avoir accès aux données brutes et à la méthodologie afin d’intégrer un ou plusieurs de nos indices à leur propre portail cartographique, à leur étude régionale ou locale des vagues de chaleur ou encore, afin d’ajouter à nos indices des données plus précises qu’il était impossible d’incorporer pour nous à l’échelle du pays.

Indices et méthodologie

Une partie importante des entrevues a servi à discuter des indices et de la méthodologie du projet, il en a été question à 122 reprises. Les intervenants avaient beaucoup de questions à propos des variables incluses dans les indices de sensibilité (45 mentions) et d’exposition (45 mentions) et des analyses de données multivariées qui ont été réalisées pour leur création. L’indice de capacité à faire face qui est en cours de développement a également été mentionné à 10 reprises. Il y a eu également 22 mentions concernant les indices et la méthodologie en général.

Modèle et limites

Le thème du modèle et ses limites ont été abordés à 77 reprises. Les sous-thèmes suivants ont souvent été mentionnés : l’absence de données sur la climatisation des unités d’habitation dans l’indice de vulnérabilité (7), l’absence de données sur l’effet des étendues d’eau dans l’indice d’exposition (6), les délais reliés aux dates de publication des données du recensement de 2021 de la part de Statistique Canada (14), la représentation de l’hétérogénéité du territoire dans le modèle (1), la langue utilisée pour l’outil et les documents méthodologiques (12), l’utilisation des aires de diffusion de Statistique Canada comme limite des unités utilisées dans les indices (14), les variables incluses dans le modèle (7) et les zones non couvertes par les indices (16).

Tableau 40: Résultats de l'analyse qualitative des textes (Évaluation de la forme et du contenu de l'outil cartographique)

Thèmes abordés	Nombre de mentions pendant les entrevues	Nombre de villes ayant abordé le thème
Accès au matériel du projet	47	4
Général (accès au matériel du projet)	13	4
Utilisation de l'interface cartographique	13	4
Utilisation des données brutes et de la méthodologie	21	4
Indices et méthodologie	122	4
Général (indice et méthodologie)	22	4
Indice de sensibilité	45	4
Indice d'exposition	45	4
Indice de capacité à faire face	10	2
Modèle et limites	77	4
Absence de données sur la climatisation	7	2
Absence de données sur les étendues d'eau	6	2
Date de publication des données du recensement	14	3
Hétérogénéité du territoire	1	1
Langue de l'outil et des documents	12	3
Utilisation des AD de Statistique Canada comme limite des unités	14	4
Variables incluses dans le modèle	7	4
Zones non couvertes par les indices	16	4
Représentation cartographique de l'écoumène	16	4
Rétroaction et évaluation de l'outil cartographique	85	4
Couverture du territoire des intervenants	11	4
Utilité de l'outil	6	3
Pérennité de l'outil	2	1
Représentation de la réalité sur le terrain	61	4
Bonne représentation	46	4
Interrogation sur la représentation	11	3
Mauvaise représentation	4	2
Suggestion des intervenants	27	4
Suggestions techniques	12	3
Utilisations alternatives de l'outil et des données du projet	15	4
Utilisateurs de l'outil	44	4
Aménagement du territoire	7	4
Environnement et changements climatiques	8	4
Équité, diversité et inclusion	5	2
Planification des interventions lors des vagues de chaleur	3	2
Santé publique	17	4
Autre	4	3
Utilisation de l'interface cartographique	66	4
Général (utilisation de l'interface cartographique)	10	4
Utilisation de l'outil commentaire	21	3
Utilisation des différentes couches	14	4
Utilisation des fenêtres contextuelles	21	4
Commentaires positifs généraux	54	4

Représentation cartographique de l'écoumène

La représentation cartographique de l'écoumène a été mentionnée à 16 reprises. Il s'agit d'un thème important puisque nous utilisons les aires de diffusion de Statistique Canada comme limites des unités, ce qui peut apporter des incohérences lorsqu'une partie importante de l'unité est en zone industrielle, par exemple. Le sujet a été abordé au cours des quatre entrevues et la couche d'information cartographique représentant l'écoumène sera ajoutée à l'outil au cours de cette année.

Rétroactions et évaluation de l'outil cartographique

La rétroaction et l'évaluation de l'outil cartographique étaient un des objectifs principaux pour cette phase d'entrevues, ce sujet a été abordé à 85 reprises. Les intervenants des quatre villes nous ont assuré que l'ensemble de leur territoire d'action était couvert par nos indices et même plus. Il y a eu 11 mentions à ce sujet. Également, l'utilité de l'outil (6 mentions) et sa pérennité (2 mentions) ont été discutées. La représentation de la réalité sur le terrain a été mentionnée à 61 reprises. De ce nombre, 46 faisaient mention d'une représentation précise de la réalité. À 11 reprises, les intervenants se questionnaient sur la représentation de la réalité sur le terrain par rapport à l'indice, mais il s'agissait plutôt d'un manque de connaissance de leur part des données de terrain à cette échelle précise d'analyse et non pas d'une mauvaise représentation de la réalité. À seulement quatre reprises, l'intervenant ne croyait pas qu'il s'agissait d'une bonne représentation de la réalité, et ce, pour un secteur bien précis. Cependant, à l'échelle de leur ville ou même des quartiers, tous les intervenants trouvaient que nos indices semblaient bien concorder avec leurs connaissances de la vulnérabilité et de l'exposition de leur territoire.

Suggestions des intervenants

Les intervenants ont suggéré plusieurs idées au cours de cette phase d'entrevues (27 mentions). Douze suggestions techniques ont été comptabilisées. On peut penser ici à l'ajout d'une variable à notre modèle, comme l'utilisation de la climatisation. Également, les intervenants ont mentionné à 15 reprises des idées d'utilisation alternative de l'outil telle que l'identification du meilleur endroit où installer une fontaine d'eau dans un endroit public, où planter des arbres en priorité ou encore, utiliser l'indice de vulnérabilité pour améliorer l'équité socio-environnementale dans leur ville.

Utilisateurs de l'interface

Les intervenants avec qui nous avons discuté provenaient de différents milieux, bien qu'une majorité d'entre eux avaient un lien avec la santé publique. Au cours des entrevues, la spécialisation de plusieurs utilisateurs potentiels de l'interface a été mentionnée : aménagement du territoire (7), environnement et changements climatiques (8), équité, diversité et inclusion (5), planification d'interventions lors de vagues

de chaleur (3), santé publique (17) et autres (4). Il a par ailleurs été mentionné à plusieurs reprises que le grand public profiterait aussi de l'accès à cet outil cartographique.

Utilisation de l'interface cartographique

Nous avons recensé 66 mentions de l'utilisation de l'interface cartographique, 10 mentions plus générales, 21 portant sur l'utilisation de l'outil de commentaires, 14 sur l'utilisation des différentes couches représentant les indices et 21 sur l'utilisation des fenêtres contextuelles. Les intervenants rencontrés ont beaucoup apprécié la présence des fenêtres contextuelles présentant les résultats des calculs des indices et les variables incluses dans ceux-ci. Également, bien que l'outil commentaire ait été mentionné à plusieurs reprises, seulement l'intervenante de la ville de Toronto l'a utilisé pour nous faire parvenir des commentaires.

Commentaires généraux

Pour terminer, bien qu'une « analyse des sentiments » (évaluation des émotions, des attitudes et des opinions) n'ait pas été réalisée sur *NVivo*, une sous-catégorie d'encodage a été créée (commentaires généraux positifs de la part des intervenants) et elle contient 54 mentions. Globalement, les commentaires généraux étaient très positifs de la part des intervenants des quatre villes rencontrées et aucun commentaire négatif n'a été soulevé ou apporté.

4.4.2.1.3.1 Grands thèmes abordés au cours des entrevues

À l'instar des résultats de la section précédente, les cinq grands thèmes (équité environnementale, populations concernées, vagues et îlots de chaleur, vulnérabilité des bâtiments et vulnérabilité du territoire) ont été abordés par les différents intervenants. Pour ce qui est des sous-thèmes, treize d'entre eux ont été abordés par au moins deux villes (tableau 41).

En ce qui a trait à l'équité environnementale, bien qu'abordée avec toutes les villes (13 mentions), c'est un thème qui était particulièrement important pour les intervenants de la ville de Victoria, qui semblaient vouloir attribuer une vision plus sociale à leur nouveau plan d'action visant à combattre les vagues de chaleur. Pour ce qui est des populations concernées (53 mentions), ce sont les populations défavorisées qui ont été le plus souvent mentionnées au cours des rencontres (15 mentions), suivies de la population en général (13), des nouveaux arrivants (12), des personnes âgées (6), des personnes aisées (6) et des enfants (1). Les vagues et les îlots de chaleur ont été mentionnés à 34 occasions, et pour la majorité de celles-ci (25), les intervenants en ont parlé de façon générale, alors qu'à 4 occasions il s'agissait plus spécifiquement des stratégies d'adaptation et d'atténuation, à 3 occasions des vagues de chaleur à venir et à 2 occasions des vagues de chaleur du passé. Le thème de la vulnérabilité des bâtiments a été abordé lors de 30 occasions. Les quartiers densément peuplés (11 mentions), les tours et les immeubles à logement (9 mentions), l'âge

des bâtiments (6 mentions), la climatisation des bâtiments (3 mentions) et l'albédo des toitures (1 mention) sont les sous-thèmes de cette catégorie. Finalement, le thème de la vulnérabilité du territoire a été abordé 31 fois au cours des entrevues ou par l'entremise des commentaires des intervenants. Le manque d'espaces verts ou encore une grande proportion de superficies imperméables sur une portion de territoire ont été codés dans cette catégorie, par exemple.

Tableau 41: Résultats de l'analyse qualitative des textes (Grands thèmes abordés)

Thèmes abordés	Nombre de mentions pendant les entrevues	Thème abordé par le nombre de villes
Équité socio-environnementale	13	4
Populations concernées	53	4
Personnes défavorisées	15	2
Population en général	13	4
Nouveaux arrivants	12	3
Personnes âgées	6	3
Personnes aisées	6	2
Enfants	1	1
Vagues et îlots de chaleur	34	4
Général (vagues et îlots de chaleur)	25	4
Stratégies d'adaptation et d'atténuation	4	2
Vagues de chaleur (futur)	3	2
Vagues de chaleur (passé)	2	2
Vulnérabilité des bâtiments	30	4
Quartiers densément peuplés	11	3
Tours et immeubles à logement	9	4
Âge des bâtiments	6	3
Climatisation des bâtiments	3	2
Toiture et albédo	1	1
Vulnérabilité du territoire	31	4

4.4.2.1.3.2 Rétroaction et adéquation de la solution avec les besoins exprimés par les utilisateurs

Les rétroactions reçues au cours des entrevues avec les intervenants des villes d'Ottawa, de Windsor, de Victoria et de Toronto sont très positives. Concernant l'évaluation de nos indices de vulnérabilité et d'exposition, les retours sont aussi très encourageants. Selon les intervenants, de façon générale, les indices semblent représentatifs de la réalité sur le territoire des quatre grandes villes. En ce qui a trait à l'évaluation de la convivialité de l'outil cartographique (utilisation des différentes couches d'information et utilisation des fenêtres contextuelles pour prendre connaissance des valeurs des variables faisant partie de nos indices), les intervenants semblaient satisfaits de l'interface web créée. Pour ce qui est de savoir si l'outil cartographique permettra d'aider les intervenants dans leurs interventions sur le terrain, dans leur planification de la gestion des vagues de chaleur et de vérifier si le prototype de l'outil répondait bien à

leurs besoins, les retours sont aussi très positifs. Les intervenants ont fait plusieurs mentions de l'utilité de l'outil et des différentes utilisations qu'ils pourraient en faire dans le futur. L'accès gratuit aux données et au travail de l'équipe était un point très positif. Il semblait également être très important de rendre non seulement l'outil cartographique accessible à l'ensemble de la population et aux intervenants du milieu pour pouvoir facilement visualiser la vulnérabilité du territoire à l'aide de cartes, mais aussi de rendre les données et la méthodologie disponibles. Tel que mentionné précédemment, les intervenants désirent avoir accès aux données brutes afin d'intégrer un ou plusieurs de nos indices à leur propre portail cartographique ou à leur étude régionale ou locale des vagues de chaleur ou encore, afin d'ajouter à nos indices des données plus précises. De cette façon, ils pourront mieux cibler les interventions à apporter sur leur territoire pour atténuer les effets des vagues de chaleur pour les populations concernées : toitures blanches, aménagement d'un parc, ajout d'une nouvelle piscine municipale, etc.

Pour terminer, plusieurs des étapes réalisées ultérieurement dans le projet sont parvenues à répondre à certaines demandes ou interrogations des intervenants. Par exemple, l'ajout d'une couche de cartographie dasymétrique pour représenter l'écoumène et l'ajout de l'indice de la capacité à faire face dans le modèle pour augmenter l'information disponible sur les inégalités socio-environnementales du territoire. Également, l'utilisation des données du recensement de 2021 qui n'étaient pas disponible au moment de la création du prototype et la traduction en anglais des documents méthodologique pour aider les intervenants à comprendre la méthodologie de notre projet.

4.4.2.2 Utilisation d'un prototype à l'été 2022 par la ville de Victoria et Capital Regional District

Lors des entrevues du printemps 2022, la ville de Victoria a démontré un très grand intérêt pour notre projet et notre outil cartographique en raison de l'importante vague de chaleur qui s'est abattue sur la Colombie-Britannique à l'été 2021 et qui a causé 619 morts. Face à leur besoin et leur intérêt, il a été convenu que la ville de Victoria et le District Régional de la Capitale pourraient tester le prototype de notre outil à l'été 2022. À cet effet, une interface a été créée sur ArcGIS Online (voir section 4.4.1).

Afin de présenter le prototype et le projet, une réunion a eu lieu avec environ 25 intervenants de la ville de Victoria, du District Régional de la Capitale et de l'Université de la Colombie-Britannique. Les intervenants provenaient de milieu divers : aménagement du territoire, santé publique, partenariat régional de gestion des urgences et programme municipal de gestion des urgences, programme d'action pour le climat et planification de l'adaptation climatique, programme de planification du logement, département des transports et planification des transports durables, bureau de l'équité, de la diversité et de l'inclusion, gestion des eaux pluviales et infrastructures vertes, planification communautaire, services forestiers urbains

et Institut des ressources, de l'environnement et du développement durable de l'Université de la Colombie-Britannique.

4.4.2.2.1 Objectif

L'objectif de la réunion était de présenter le prototype de l'outil cartographique, mais également de répondre aux questions sur l'outil, la méthodologie et le projet et de récolter de l'information sur la fiabilité et la convivialité de l'interface de la part des intervenant du milieu qui utiliseront la version finale en 2023. Le prototype de l'outil cartographique de même que les documents explicatifs avaient été envoyés aux intervenants quelques jours avant la réunion afin qu'ils puissent les parcourir.

En échange, ils avaient accepté de remplir un questionnaire à l'automne 2022 pour nous donner leur avis et leurs commentaires afin d'évaluer et d'améliorer le prototype avant la sortie de la version finale au printemps 2023.

4.4.2.2.2 Résultats

Le sondage a été publié en anglais avec l'outil de la suite ESRI, Survey 123. Les intervenants avaient 10 jours pour le remplir. Il comportait 16 questions et 13 personnes ont répondu, soit environ la moitié des intervenants présents lors de la réunion du 13 juin. Onze répondants travaillent pour la ville de Victoria et 2 pour le District Régional de la Capitale. Les répondants œuvrent dans divers secteurs : programme d'action pour le climat et planification de l'adaptation climatique (4 répondants, 31%), programme de planification du logement (1 répondant, 8%), planification communautaire (3 répondants, 23%), bureau de l'équité, de la diversité et de l'inclusion (3 répondants, 23%), aménagement du territoire (2 répondants, 15%), gestion des eaux pluviales et infrastructures vertes (1 répondant, 8%) et système d'information géographique (SIG) (1 répondant, 8%). Il s'agissait d'une question à choix multiple, alors qu'un répondant pouvait répondre travailler dans plus d'un secteur. Il y a donc 15 entrées.

Cinq personnes ont répondu avoir utilisé l'outil cartographique pendant la période estivale dans le cadre de leur travail. Trois d'entre elles l'ont utilisé une fois, une personne 2-3 fois et une personne, plus de 10 fois. Par ailleurs, 80% des gens ayant utilisé l'outil ont dit qu'il avait été utile ou très utile dans le cadre de leur travail. L'outil cartographique a été utilisé en anticipation d'une vague de chaleur et pendant une vague de chaleur à une occasion et aussi pour une autre raison à trois occasions. Les raisons alternatives énumérées pour utiliser l'outil par les intervenants sont :

- Intérêt général lié à la cartographie des refuges (shelter mapping)
- L'urbanisme comme outil pédagogique

- Pour enrichir les connaissances personnelles
- Pour la planification de l'adaptation climatique
- Comme base pour un travail portant sur les travaux localisés en lien avec les températures locales.

Huit intervenants ont consulté le document synthèse dans le cadre de leur travail. Selon 75% d'entre eux, il répondait à la majorité ou l'entièreté de leurs questions. Les intervenants nous ont laissé des commentaires pour nous aider à peaufiner le document synthèse en prévision de la version finale du printemps 2023. Ils voulaient avoir, entre autres, d'avantage d'informations sur les sources de données et les limites de la méthodologie et l'ajout de graphiques simples pour illustrer les points clés. Seulement 1 des 13 répondants avait téléchargé les fichiers géospatiaux et aucun ne l'avait intégré à d'autres cartes.

Un des points centraux du processus de consultation avec les intervenants était de savoir si nos indices sont fidèles à la réalité. À cette question, 77% des répondants ont affirmé que l'information représentée sur les cartes était modérément représentative à très représentative de ce qu'ils connaissaient de la réalité sur le terrain de leur quartier, ville ou région. Cependant, dans les commentaires, certains ont mentionné n'avoir pas assez de connaissances de la réalité à cette échelle pour être en mesure de bien répondre à cette question. Finalement, les intervenants nous ont laissé beaucoup de commentaires, notamment sur les fonctionnalités et les améliorations qu'ils aimeraient avoir.

4.4.2.2.3 Utilisation du prototype de l'outil cartographique

Le prototype en ligne de la cartographie de la vulnérabilité et de l'exposition des populations aux vagues de chaleur accablantes de la région métropolitaine de recensement de Victoria a été consulté 257 fois entre le début du mois de mai et la fin du mois de septembre, pour plus de détails, allez consulter l'annexe 2.

4.5 ÉLABORATION D'UNE VERSION FINALE DE L'APPLICATION

4.5.1 Couches cartographiées

Au total, six couches de données géospatiales (sensibilité, capacité à faire face, vulnérabilité, exposition, vulnérabilité et exposition et îlots de chaleur urbain) ont été cartographiées et implémentées dans l'application ExB où il est possible de visualiser une seule de ces cartes à la fois ou encore, en mode « 2 cartes », de visualiser la carte bivariée vulnérabilité/ exposition en même temps que la carte des îlots de chaleur urbains simultanément. En mode « 2 cartes », la vue cartographique de celles-ci est synchronisée dans le but de faciliter l'exploration et la comparaison des deux couches de données.

4.5.2 Fonctionnalités sélectionnées

Les fonctionnalités (widgets) intégrées à la version finale de l'application ont été choisies afin d'améliorer l'expérience des utilisateurs, de leur permettre de mieux comprendre les données représentées et les aider à obtenir l'information recherchée le plus rapidement et efficacement possible. Il fallait garder à l'esprit les deux publics distincts auxquels cette application est destinée et s'assurer de sa convivialité pour l'ensemble des utilisateurs potentiels.

Le tableau 42 décrit l'utilisation de chaque widget alors que le tableaux 43 montre les widgets disponibles selon les différents types d'appareils informatiques (ordinateur, tablette ou téléphone).

Tableau 42: Description de l'utilisation des widgets sélectionnés pour la version finale de l'application cartographique

Widget	Utilisation
Zoom (boutons et tactile)  	Ajuster l'échelle de la carte pour afficher les détails souhaités.
Vue cartographique par défaut 	Permet de revenir à la vue cartographique par défaut. Pour le projet actuel, on y voit toute notre zone d'étude, donc la majorité du Canada y est visible.
Rechercher ma localisation 	Permet de détecter l'emplacement où se trouve l'utilisateur pour ensuite effectuer un zoom dans son secteur.
Légende	Explique la signification des couleurs sur la carte pour les différentes cartes produites.
Échelle	Donne une idée du rapport entre la distance mesurée sur la carte et la distance réelle sur le terrain. Elle s'affiche en kilomètres et en miles.
Rechercher 	Permet de trouver une ville, un emplacement ou une adresse spécifique en entrant un ou plusieurs mots dans la boîte de texte afin de trouver une adresse plus rapidement qu'en parcourant la carte.
Fond de carte 	Présente différentes options de fond de carte qu'il est possible de sélectionner pour accompagner les couches produites pour le projet, par exemple : imagerie ou topographique.
Imprimer 	Permet de créer une carte de format JPG représentant l'étendue cartographique choisie qu'il sera possible d'enregistrer sur l'ordinateur ou la tablette de l'utilisateur et de l'imprimer par la suite.
Toutes les cartes (liste de cartes)	Permet à l'utilisateur de sélectionner une ou plusieurs autre(s) carte(s)
Aide à la navigation 	Amène les utilisateurs vers une section d'aide. Cette section est disponible pour chaque type d'appareil informatique (ordinateur, tablette et téléphone) et explique le fonctionnement des différents widgets intégrés à l'application cartographique.
Fenêtre contextuelle	Fournit de l'information supplémentaire sur les variables et les indices pour chaque aire de diffusion pour les cartes de sensibilité, capacité à faire face, vulnérabilité, exposition et vulnérabilité/exposition.

Tableau 43: Widgets disponibles selon les différents types d'appareil informatique

		Type de support		
		Ordinateur	Tablette	Téléphone
Widgets	Zoom avant  et Zoom arrière 	X		
	Zoom tactile		X	X
	Vue cartographique par défaut 	X	X	X
	Rechercher ma localisation 	X	X	X
	Légende	X		
	Couches (Couche et Légende) 		X	X
	Échelle	X	X	
	Rechercher 	X		
	Fond de carte 	X	X	X
	Imprimer 	X	X	
	Toutes les cartes	X	X	X
	Aide à la navigation 	X	X	X
	Fenêtre contextuelle	X	X	X

4.6 SITE WEB

Le contenu thématique peuplant les différentes sections du site web a été élaboré par notre équipe. Considérant le fait que les utilisateurs de la solution ne sont pas nécessairement familiers avec la terminologie scientifique retenue pour décrire les différents concepts et méthodes utilisées dans le cadre du projet, un travail de vulgarisation du contenu a été effectué. Ainsi, les principales sections du site web sont les suivantes :

Carte : Il s'agit de la page d'accueil du site web. Elle permet d'accéder directement à l'application cartographique ainsi qu'à une capsule vidéo vulgarisant la problématique des impacts des vagues de chaleur sur la santé de la population canadienne.

Projet : Cette page contient des informations textuelles sur la problématique des impacts des vagues de chaleur sur la santé de la population, les objectifs du projet de recherche, le territoire couvert par les analyses ainsi que des informations sur les partenaires et les sources de financement du projet. Elle contient aussi une capsule vulgarisant la problématique des vagues et des îlots de chaleurs urbains.

Méthodologie : Cette page contient des informations textuelles sur les grandes étapes méthodologiques employées dans le cadre de la cartographie de la vulnérabilité et de l'exposition. Sont aussi présentes de brèves descriptions des démarches méthodologiques employées pour calculer les indices de capacité à faire face, d'exposition, de sensibilité et de vulnérabilité. Elle contient également une capsule vidéo vulgarisant la démarche employée pour élaborer la cartographie.

Extraction : Cette page permet aux personnes utilisatrices de télécharger les fichiers géospatiaux contenant les différents indicateurs et indices pour les 156 régions urbaines du Canada ainsi que pour chacune des provinces. Les fichiers compressés téléchargeables contiennent une géodatabase incluant un fichier matriciel et un fichier vectoriel ainsi qu'un fichier PDF de métadonnées décrivant en détail les données. Il est possible pour les personnes utilisatrices de télécharger les données en utilisant un menu déroulant ou une carte dynamique.

Aide à la navigation : Cette page décrit les différents widgets et fonctionnalités présents dans les applications cartographiques, que la consultation du site soit faite à l'aide d'un ordinateur, d'une tablette ou encore d'un téléphone intelligent.

Équipe : Cette page recense et énumère l'ensemble des personnes ayant travaillé à l'élaboration de la solution. Il s'agit de professeurs, de professionnels ou encore d'étudiants. En plus de nommer ces personnes, une photo de celle-ci est affichée, leurs expertises qui ont été mobilisées dans le cadre du projet sont énumérées ainsi que des moyens permettant de rejoindre ces personnes (courriel, LinkedIn, Research Gate).

Contact : Cette page permet d'avoir des informations pour rejoindre l'équipe de recherche. De plus, il est possible d'écrire à celle-ci à l'aide d'un formulaire de contact implémenté dans la page.

Foire aux questions (FAQ) : Cette page contient des informations supplémentaires sur les différentes dimensions de la problématique abordée par l'équipe (ex. : Qu'est-ce qu'une vague de chaleur?), des dimensions du projet (ex. : Comment avez-vous réalisé la carte des îlots de chaleur?), comment devraient être utilisées les informations cartographiées (ex. : Pourquoi devrais-je me renseigner sur la vulnérabilité dans mon quartier?) ou encore certains concepts mobilisés par l'équipe (ex. : Que signifie la vulnérabilité?). Ces informations prennent la forme d'un texte question/réponse.

Liens utiles : Cette page comprend des liens URL permettant d'accéder à des ressources externes, en anglais ou en français. Celles-ci diffusent notamment des informations sur les vagues de chaleur, les îlots de chaleur urbains, les mesures d'adaptation, les impacts sur la santé, les systèmes d'alerte canadiens ainsi que les changements climatiques.

Un menu situé dans un bandeau au haut du site web permet d'accéder à chacune des pages. Sur l'ensemble de celles-ci, la géolocalisation de l'appareil utilisé ainsi que des données météorologiques en temps quasi réel permettent aux personnes qui consultent le site web de connaître la température extérieure actuelle pour la région où elles se trouvent. De plus, la couleur du site web varie en fonction de l'heure de la journée, le site web passant en mode nuit à la tombée du jour et en mode clair au lever du soleil. En tout temps, la personne consultant le site peut passer d'un mode à l'autre en appuyant sur une icône située au haut de l'écran. Il est aussi possible de passer de la version française à la version anglaise, et inversement, en appuyant sur un bouton situé au haut de l'écran.

4.7 CONCLUSION

L'objectif final du projet n'étant pas seulement de produire un outil cartographique, mais bien que celui-ci soit adapté aux besoins des personnes utilisatrices (aménagistes, professionnels de la santé publique, élus, mais aussi, le grand public). Une attention particulière a été portée à l'évaluation de l'outil en devenir auprès des utilisateurs avertis. Ainsi, l'équipe a procédé à des rencontres avec des professionnels des milieux de l'aménagement et de la santé publique. Elle a aussi eu recours à une évaluation de l'interface cartographique en leur présentant un prototype. De plus, ces rencontres ont permis d'évaluer si les indices représentaient bien la réalité vécue sur leur territoire ainsi que d'en apprendre davantage sur les façons dont l'outil cartographique permettra de répondre aux besoins des intervenants.

L'équipe a dû effectuer des choix technologiques permettant de produire un outil cartographique interactif comportant des fonctionnalités facilitant la navigation dans un site web, tout en favorisant les mises à jour et la pérennité de l'outil.

5 CONCLUSION GÉNÉRALE

La conclusion de notre rapport scientifique met en avant les résultats de notre projet visant à élaborer une cartographie interactive en ligne pour l'analyse de la vulnérabilité et de l'exposition aux vagues de chaleur accablante dans les grandes villes canadiennes. L'objectif principal était de fournir un outil de prévention et d'intervention pour les acteurs municipaux, afin de mieux comprendre les zones à risque et de mettre en place des mesures appropriées. Pour y parvenir, nous avons atteint trois objectifs spécifiques.

Le premier objectif consistait à identifier et à documenter les besoins des gestionnaires, des professionnels et des aménagistes d'organisations municipales en matière de cartographie de la vulnérabilité et de l'exposition aux vagues de chaleur. Nous avons analysé les préoccupations et les besoins des utilisateurs potentiels de l'outil grâce à des entrevues. Cette analyse nous a permis de mieux comprendre les enjeux et les besoins des acteurs municipaux et ainsi orienter le développement de l'outil cartographique.

Le deuxième objectif spécifique était de construire plusieurs indices cartographiables pour estimer différentes dimensions de la vulnérabilité et de l'exposition aux vagues de chaleur accablante. Nous avons créé un indice de sensibilité, un indice de capacité à faire face, un indice d'exposition et un indice de vulnérabilité aux vagues de chaleur. Nous avons circonscrit la cartographie des indices aux zones habitées des grandes villes canadiennes en découpant les aires de diffusion à l'aide d'un fichier représentant l'écoumène de la zone habitée pour l'ensemble du pays en ayant recours à une procédure de cartographie dasymétrique.

Le troisième objectif spécifique était de produire une carte interactive en ligne permettant de diffuser les indices. Nous avons ensuite mis en ligne un site web incluant une application cartographique interactive (vaguesdechaleur.ffgg.ulaval.ca / heatwaves.ffgg.ulaval.ca) contenant les différentes couches de données géospatiales produites par l'équipe. Il est possible de télécharger les données géospatiales directement sur le site web et les informations présentes sur celui-ci permettent aux utilisateurs de comprendre la problématique des vagues de chaleur en milieu urbain de même que la méthodologie employée par l'équipe.

En conclusion, nous espérons que ce projet aidera les acteurs municipaux dans le cadre de leur travail et que l'information retirée par notre outil sera utile à l'ensemble de la population vivant dans les grandes villes canadiennes. Nous sommes convaincus que les démarches méthodologiques utilisées pourront contribuer à la réalisation d'autres projets scientifiques et que les résultats obtenus pourront être utilisés dans d'autres contextes similaires.

6 BIBLIOGRAPHIE

- Adam-Poupart, A., Nicolakakis, N., Anassour Laouan Sidi, E., Berry, P., Campagna, C., Chaumont, D., Hamel, D., Labrèche, F., Sassine, M.-P., Smargiassi, A., & Zayed, J. (2021). *Changements climatiques et vulnérabilités à la chaleur des travailleuses et travailleurs canadiens – regard sur les provinces du centre et de l’ouest du Canada*. Institut national de santé publique du Québec. <https://www.inspq.qc.ca/publications/2791>
- ADEME. (2013). *Indicateurs de vulnérabilité d’un territoire au changement climatique*. <https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/3479-indicateurs-de-vulnerabilite-d-un-territoire-au-changement-climatique-recueil-de-litterature-internationale-9782358382663.html>
- Alberini, A., Gans, W., & Alhassan, M. (2011). Individual and public-program adaptation: coping with heat waves in five cities in Canada. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 8(12), 4679–4701. <https://doi.org/10.3390/ijerph8124679>
- Almeida, C. R. D., Teodoro, A. C., & Gonçalves, A. (2021). Study of the urban heat island (UHI) using remote sensing data/techniques: A systematic review. *Environments*, 8(10), 105. <https://doi.org/10.3390/environments8100105>
- Alonso, L., & Renard, F. (2020). A Comparative Study of the Physiological and Socio-Economic Vulnerabilities to Heat Waves of the Population of the Metropolis of Lyon (France) in a Climate Change Context. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(3), 1004. <https://doi.org/10.3390/ijerph17031004>
- Apreda, C., D’Ambrosio, V., & Di Martino, F. (2019). A climate vulnerability and impact assessment model for complex urban systems. *Environmental Science & Policy*, 93, 11-26. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.12.016>
- Archila Bustos, M. F., Hall, O., Niedomysl, T., & Ernstson, U. (2020). A pixel level evaluation of five multitemporal global gridded population datasets: a case study in Sweden, 1990–2015. *Population and Environment*, 42(2), 255-277. <https://doi.org/10.1007/s11111-020-00360-8>
- Atlas climatique du Canada. (2019). *Les jours très chauds (+30°C)*. https://atlasclimatique.ca/carte/canada/plus30_2030_85#
- Azhar, G., Saha, S., Ganguly, P., Mavalankar, D., & Madrigano, J. (2017). Heat Wave Vulnerability Mapping for India. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(4), 357. <https://doi.org/10.3390/ijerph14040357>
- Bao, J. Z., Li, X. D., & Yu, C. H. (2015). The Construction and Validation of the Heat Vulnerability Index, a Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(7), 7220-7234. <https://doi.org/10.3390/ijerph120707220>
- Barrette, N., Vandersmissen, M.-H., Roy, F., Mercier, G., Brousseau, Y., Berthold, E., Guilbert, E., Lalonde, B., Beaudoin, Y., Genois, A., Bustinza, R., Thibault, M., Bleau, N., Tanguay, L.-P., Dionne, M., Aubin, L., Chartrand, M., Déry, J.-S., Dovonou, P., ...Turcotte, S. (2018). *Atlas web de la vulnérabilité de la population Québécoise aux aléas climatiques : Rapport de recherche*. Université Laval – Département de géographie. <https://atlas-vulnerabilite.ulaval.ca/wp-content/uploads/2022/03/RapportBarrette2018.pdf>

- Basu, R., & Samet, J. M. (2002). Relation between elevated ambient temperature and mortality: a review of the epidemiologic evidence. *Epidemiologic reviews*, 24(2), 190-202. <https://doi.org/10.1093/epirev/mxf007>
- Bélanger, D., Berry, P., Bouchet, V., Charron, D., Clarke, K.-L., Doyon, B., Fleury, M., Furgal, C., Gosselin, P., Lamy, S., Lindsay, L. R., McBean, G., Ogden, N., Séguin, J., Schuster, C. J., & Soskolne, C. L. (2008). *Human health in a changing climate: a Canadian assessment of vulnerabilities and adaptive capacity*. Santé Canada. https://publications.gc.ca/collections/collection_2008/hc-sc/H128-1-08-528E.pdf
- Bernard, J., Musy, M., Calmet, I., Bocher, E., & Kéramec, P. (2017). Urban heat island temporal and spatial variations: Empirical modeling from geographical and meteorological data. *Building and Environment*, 125, 423-438. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.08.009>
- Berry, P., Blagden, P., Campagna, C., Egyed, M., Enright, P., Gosselin, P., Harper, S., Hayes, K., Atkinson, D., Stout, R., Halseth, R., Greenwood, M., Ogden, N., Schnitter, R., & Takaro, T. T. (2022). *La santé des Canadiens et des Canadiennes dans un climat en changement : faire progresser nos connaissances pour agir*. Santé Canada. <https://doi.org/10.4095/329546>
- Bhaduri, B., Bright, E., Coleman, P., & Urban, M. L. (2007). LandScan USA: a high-resolution geospatial and temporal modeling approach for population distribution and dynamics. *GeoJournal*, 69(1-2), 103-117. <https://doi.org/10.1007/s10708-007-9105-9>
- Bourque, J., Poulin, N. & Cleaver, A. F. (2006). Évaluation de l'utilisation et de la présentation des résultats d'analyses factorielles et d'analyses en composantes principales en éducation. *Revue des sciences de l'éducation*, 32(2), 325-344. <https://doi.org/10.7202/014411ar>
- Breiman, L. (2001). Random Forests. *Machine learning*, 45, 5-32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- British Columbia Coroners Service. (2022). *Extreme Heat and Human Mortality: A Review of Heat-Related Deaths in B.C. in Summer 2021*. Ministry of Public Safety and Solicitor General. https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/birth-adoption-death-marriage-and-divorce/deaths/coroners-service/death-review-panel/extreme_heat_death_review_panel_report.pdf
- Bush, E., & Lemmen, D.S. (2019). *Rapport sur le climat changeant du Canada*. Gouvernement du Canada. <https://doi.org/10.4095/314614>
- Centre intégré de santé et de services sociaux de Laval. (2019). *Vagues de chaleur de l'été 2018 : Rapport d'enquête épidémiologique*. https://www.lavalensante.com/fileadmin/internet/cisss_laval/Documentation/Sante_publique/Rapport_Rap_et_memoires/2019/Rapport_vague_de_chaleur_2018_Laval_final_2019-05-29__2_.pdf
- Chen, Q., Ding, M. J., Yang, X. C., Hu, K. J., & Qi, J. G. (2018). Spatially explicit assessment of heat health risk by using multi-sensor remote sensing images and socioeconomic data in Yangtze River Delta, China. *International Journal of Health Geographics*, 17, 15. <https://doi.org/10.1186/s12942-018-0135-y>
- Chen, S., Yang, Y., Deng, F., Zhang, Y., Liu, D., Liu, C., & Gao, Z. (2022). A high-resolution monitoring approach of canopy urban heat island using a random forest model and multi-platform observations. *Atmospheric Measurement Techniques*, 15(3), 735-756. <https://doi.org/10.5194/amt-15-735-2022>

- Cheng, W., Li, D., Liu, Z., & Brown, R. D. (2021). Approaches for identifying heat-vulnerable populations and locations: A systematic review. *Science of The Total Environment*, 799, 149417. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149417>
- Christenson, M., Geiger, S. F., Phillips, J., Anderson, B., Giovanna, L., & Anderson, H. A. (2017). Heat Vulnerability Index Mapping for Milwaukee and Wisconsin. *Journal of Public Health Management and Practice*, 23(4), 396-403. <https://doi.org/10.1097/phh.0000000000000352>
- Conlon, K. C., Mallen, E., Gronlund, C. J., Berrocal, V. J., Larsen, L., & O'Neill, M. S. (2020). Mapping Human Vulnerability to Extreme Heat: A Critical Assessment of Heat Vulnerability Indices Created Using Principal Components Analysis. *Environmental Health Perspectives*, 128(9). <https://doi.org/10.1289/ehp4030>
- Crichton, D. (1999). The Risk Triangle. Dans J. Ingleton (dir.), *Natural Disaster Management* (p. 102-103). Tudor Rose.
- Cutter, S. L., Boruff, B. J., & Shirley, W. L. (2003). Social Vulnerability to Environmental Hazards. *Social Science Quarterly*, 84(2), 242-261. <https://doi.org/10.1111/1540-6237.8402002>
- Dong, J. Q., Peng, J., He, X. R., Corcoran, J., Qiu, S. J., & Wang, X. Y. (2020). Heatwave-induced human health risk assessment in megacities based on heat stress-social vulnerability-human exposure framework. *Landscape and Urban Planning*, 203, Article 103907. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103907>
- Durand C. (2003). *L'analyse factorielle et l'analyse de fidélité*. Université de Montréal – Département de sociologie. <http://www.mapageweb.umontreal.ca/durandc/enseignement/methodesquantitatives/facteur9.pdf>
- Ellena, M., Breil, M., & Soriani, S. (2020). The heat-health nexus in the urban context: A systematic literature review exploring the socio-economic vulnerabilities and built environment characteristics. *Urban Climate*, 34, 100676. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100676>
- Estoque, R. C., Ooba, M., Seposo, X. T., Togawa, T., Hijioka, Y., Takahashi, K., & Nakamura, S. (2020). Heat health risk assessment in Philippine cities using remotely sensed data and social-ecological indicators. *Nature Communications*, 11(1), 1581. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15218-8>
- Fernandez, P., Mourato, S., Moreira M., & Pereira, L. (2016). A new approach for computing a flood vulnerability index using cluster analysis. *Physics and Chemistry of the Earth*, 94, 47-55. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2016.04.003>
- Field, C. B., Barros, V. R., Dokken, D. J., Mach, K. J., Mastrandrea, M. D., Bilir, T. E., Chatterjee, M., Ebi, K. L., Estrada, Y. O., Genova, R. C., Girma, B., Kissel, E. S., Levy, A. N., MacCracken, S., Mastrandrea, P. R., & White, L. L. (dir.). (2014). *Changements climatiques 2014 : Incidences, adaptation et vulnérabilité. Résumés, foire aux questions et encarts thématiques*. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WGIIAR5-IntegrationBrochure_fr-1.pdf
- Florczyk, A. J., Melchiorri, M., Zeidler, J., Corbane, C., Schiavina, M., Freire, S., Sabo, F., Politis, P., Esch, T., & Pesaresi, M. (2020). The Generalised Settlement Area: mapping the Earth surface in the vicinity of built-up areas. *International Journal of Digital Earth*, 13(1), 45-60. <https://doi.org/10.1080/17538947.2018.1550121>

- Fraser, A. M., Chester, M. V., & Eisenman, D. (2018). Strategic locating of refuges for extreme heat events (or heat waves). *Urban Climate*, 25, 109–119. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.04.009>
- Fraser, A. M., Chester, M. V., Eisenman, D., Hondula, D. M., Pincetl, S. S., English, P., & Bondank, E. (2017). Household accessibility to heat refuges: Residential air conditioning, public cooled space, and walkability. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 44(6), 1036–1055. <https://doi.org/10.1177/0265813516657342>
- Gage, E. A., & Cooper, D. J. (2017). Relationships between landscape pattern metrics, vertical structure and surface urban Heat Island formation in a Colorado suburb. *Urban Ecosystems*, 20, 1229–1238. <https://doi.org/10.1007/s11252-017-0675-0>
- García-Santos, V., Cuxart, J., Martínez-Villagrasa, D., Jiménez, M. A., & Simó, G. (2018). Comparison of Three Methods for Estimating Land Surface Temperature from Landsat 8-TIRS Sensor Data. *Remote Sensing*, 10(9), 1450. <https://doi.org/10.3390/rs10091450>
- Gareth, J., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2013). *An Introduction to Statistical Learning: with Applications in R*. Springer.
- Gasparrini, A., Guo, Y., Hashizume, M., Lavigne, E., Zanobetti, A., Schwartz, J., Tobias, A., Tong, S., Rocklöv, J., Forsberg, B., Leone, M., De Sarios, M., Bell, M. L., Guo, Y.-L. L., Wu, C.-F., Kan, H., Yi, S.-M., Coelho, M. S. Z. S., Saldiva, P. H. N., ... Armstrong, B. (2015). Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: a multicountry observational study. *The Lancet*, 386(9991), 369–375. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(14\)62114-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(14)62114-0)
- Gough, W., Anderson, V., & Herod, K. (2016). *Étude de modélisation de l'Ontario sur le changement climatique et la santé*. Ministère de la Santé et des Soins de longue durée de l'Ontario. https://www.health.gov.on.ca/fr/common/ministry/publications/reports/climate_change_toolkit/climate_change_health_modelling_study.pdf
- Grigorescu, I., Mocanu, I., Mitrica, B., Dumitrascu, M., Dumitrica, C., & Dragota, C. S. (2021). Socio-economic and environmental vulnerability to heat-related phenomena in Bucharest metropolitan area. *Environmental Research*, 192, 110268. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110268>
- Guo, X., Huang, G. L., Jia, P., & Wu, J. G. (2019). Estimating Fine-Scale Heat Vulnerability in Beijing Through Two Approaches: Spatial Patterns, Similarities, and Divergence. *Remote Sensing*, 11(20), 2358. <https://doi.org/10.3390/rs11202358>
- Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., & Anderson, R. E. (2014). *Multivariate data analysis* (7^e éd.). Pearson Education.
- Hajat, S., O'Connor, M., & Kosatsky, T. (2010). Health effects of hot weather: from awareness of risk factors to effective health protection. *The Lancet*, 375(9717), 856–863. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(09\)61711-6](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(09)61711-6)
- Harlan S. L., Brazel, A. J., Prashad, L., Stefanov, W. L., & Larsen, L. (2006). Neighborhood microclimates and vulnerability to heat stress. *Social Science & Medicine*, 63(11), 2847–2863. <https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2006.07.030>
- He, C., Ma, L., Zhou, L., Kan, H. D., Zhang, Y., Ma, W. C., & Chen, B. (2019). Exploring the mechanisms of heat wave vulnerability at the urban scale based on the application of big data and

- artificial societies. *Environment International*, 127, 573-583.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.01.057>
- Ho, H. C., Knudby, A., & Huang, W. (2015). A Spatial Framework to Map Heat Health Risks at Multiple Scales. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(12), 16110-16123.
<https://doi.org/10.3390/ijerph121215046>
- Ho, H. C., Knudby, A., Chi, G. Q., Aminipouri, M., & Lai, D. Y. F. (2018). Spatiotemporal analysis of regional socio-economic vulnerability change associated with heat risks in Canada. *Applied Geography*, 95, 61-70. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.04.015>
- Ho, H. C., Knudby, A., Walker, B. B., & Henderson, S. B. (2017). Delineation of Spatial Variability in the Temperature-Mortality Relationship on Extremely Hot Days in Greater Vancouver, Canada. *Environmental Health Perspectives*, 125(1), 66-75. <https://doi.org/10.1289/ehp224>
- Houghton, A., & Castillo-Salgado, C. (2020). Analysis of correlations between neighborhood -level vulnerability to climate change and protective green building design strategies: A spatial and ecological analysis. *Building and Environment*, 168, 106523.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106523>
- Hulley, G., Shivers, S., Wetherley, E., & Cudd, R. (2019). New ECOSTRESS and MODIS Land Surface Temperature Data Reveal Fine-Scale Heat Vulnerability in Cities: A Case Study for Los Angeles County, California. *Remote Sensing*, 11(18), 2136. <https://doi.org/10.3390/rs11182136>
- Jagarnath, M., Thambiran, T., & Gebreslasie, M. (2020). Heat stress risk and vulnerability under climate change in Durban metropolitan, South Africa-identifying urban planning priorities for adaptation. *Climatic Change*, 163(2), 807-829. <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02908-x>
- Janicke, B., Holtmann, A., Kim, K. R., Kang, M., Fehrenbach, U., & Scherer, D. (2019). Quantification and evaluation of intra-urban heat-stress variability in Seoul, Korea. *International Journal of Biometeorology*, 63(1), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s00484-018-1631-2>
- Josse, J., & Husson, F. (2016). missMDA: A Package for Handling Missing Values in Multivariate Data Analysis. *Journal of Statistical Software*, 70(1), 1–31. <https://doi.org/10.18637/jss.v070.i01>
- Kaplan, G. (2019). Evaluating the roles of green and built-up areas in reducing a surface urban heat island using remote sensing data. *Urbani Izziv*, 30(2), 105-112. <https://doi.org/10.5379/urbani-izziv-en-2019-30-02-004>
- Ketterer, C., & Matzarakis, A. (2015). Comparison of different methods for the assessment of the urban heat island in Stuttgart, Germany. *International Journal of Biometeorology*, 59, 1299-1309.
<https://doi.org/10.1007/s00484-014-0940-3>
- Khatami, R., Mountrakis, G., & Stehman, S. V. (2016). A meta-analysis of remote sensing research on supervised pixel-based land-cover image classification processes: General guidelines for practitioners and future research. *Remote Sensing of Environment*, 177, 89-100.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.028>
- Kim, D. W., Deo, R. C., Lee, J. S., & Yeom, J. M. (2017). Mapping heatwave vulnerability in Korea. *Natural Hazards*, 89(1), 35-55. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-2951-y>

- Klotz, M., Kemper, T., Geic, C., Esch, T., & Taubenbock, H. (2016). How good is the map? A multi-scale cross-comparison framework for global settlement layers: Evidence from Central Europe. *Remote Sensing of Environment*, *178*, 191-212. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.03.001>
- Koman, P. D., Romo, F., Swinton, P., Mentz, G. B., de Majo, R. F., Sampson, N. R., Battaglia, M. J., Hill-Knott, K., Williams, G. O., O'Neill, M. S., & Schulz, A. J. (2019). MI-Environment: Geospatial patterns and inequality of relative heat stress vulnerability in Michigan. *Health & Place*, *60*, 102228. <https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2019.102228>
- Krstic, N., Yuchi, W., Ho, H. C., Walker, B. B., Knudby, A. J., & Henderson, S. B. (2017). The Heat Exposure Integrated Deprivation Index (HEIDI): A data-driven approach to quantifying neighborhood risk during extreme hot weather. *Environment International*, *109*, 42-52. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.09.011>
- Lê, S., Josse, J., & Husson, F. (2008). FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. *Journal of Statistical Software*, *25*(1), 1-18. <https://doi.org/10.18637/jss.v025.i01>
- Li, F., Yigitcanlar, T., Nepal, M., Thanh, K. N., & Dur, F. (2022). Understanding Urban Heat Vulnerability Assessment Methods: A PRISMA Review. *Energies*, *15*, 6998. <https://doi.org/10.3390/en15196998>
- Li, H., Zhou, Y., Li, X., Meng, L., Wang, X., Wu, S., & Sodoudi, S. (2018). A new method to quantify surface urban heat island intensity. *Science of the Total Environment*, *624*, 262-272. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.360>
- Li, W., El-Askary, H., Lakshmi, V., Piechota, T., & Struppa, D. (2020). Earth Observation and Cloud Computing in Support of Two Sustainable Development Goals for the River Nile Watershed Countries. *Remote Sensing*, *12*(9), 1391. <https://doi.org/10.3390/rs12091391>
- Linard, C., Gilbert, M., & Tatem, A. J. (2011). Assessing the use of global land cover data for guiding large area population distribution modelling. *GeoJournal*, *76*(5), 525-538. <https://doi.org/10.1007/s10708-010-9364-8>
- Liu, X., Yue, W. Z., Yang, X. C., Hu, K. J., Zhang, W., & Huang, M. Y. (2020). Mapping Urban Heat Vulnerability of Extreme Heat in Hangzhou via Comparing Two Approaches. *Complexity*, *2020*, 9717658. <https://doi.org/10.1155/2020/9717658>
- Mallen, E., Stone, B., & Lanza, K. (2019). A methodological assessment of extreme heat mortality modeling and heat vulnerability mapping in Dallas, Texas. *Urban Climate*, *30*, 100528. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100528>
- Maragno, D., Dalla Fontana, M., & Musco, F. (2020). Mapping Heat Stress Vulnerability and Risk Assessment at the Neighborhood Scale to Drive Urban Adaptation Planning. *Sustainability*, *12*(3), 1056. <https://doi.org/10.3390/su12031056>
- Marchal, J., Bour, B., Budei, B. C., Nininahazwe, F., Armellin, C., & Varin, M. (2022). *Cartographie des îlots de chaleur et de fraîcheur dans le Québec urbain à l'aide d'imagerie satellitaire Landsat-8 (2013-2014)* (Rapport 2022-29). Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy inc. (CERFO). https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/0512ae16-1273-46e2-ae09-a87a80437079/resource/a33969ba-143a-4524-88c3-8ec7485676b1/download/rapport-metho-ilots-chaleur-fraicheur-2013-2014-inspq-cerfo_2023-03-10-0924.pdf

- Martin, S. L., Cakmak, S., Hebborn, C. A., Avramescu, M. L., & Tremblay, N. (2012). Climate change and future temperature-related mortality in 15 Canadian cities. *International Journal of Biometeorology*, 56(4), 605-619. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0449-y>
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., & Zhou, B. (dir.). (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H.-O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P. R., Pirani, A., Moufouma-Okia, W., Péan, C., Pidcock, R., Connors, S., Matthews, J. B. R., Chen, Y., Zhou, X., Gomis, M. I., Lonnoy, E., Maycock, T., Tignor, M., & Waterfield, T. (dir.). (2018). *Réchauffement planétaire de 1,5 °C : Rapport spécial du GIEC sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels et les trajectoires associées d'émissions mondiales de gaz à effet de serre, dans le contexte du renforcement de la parade mondiale au changement climatique, du développement durable et de la lutte contre la pauvreté*. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/SR15_Summary_Volume_french.pdf
- Matthies, F., Bickler, G., Hales, S., & Marín, N. C. (2008). *Heat-health action plans: guidance*. World Health Organization. <https://www.who.int/publications/i/item/9789289071918>
- Mendez-Lazaro, P., Muller-Karger, F. E., Otis, D., McCarthy, M. J., & Rodriguez, E. (2018). A heat vulnerability index to improve urban public health management in San Juan, Puerto Rico. *International Journal of Biometeorology*, 62(5), 709-722. <https://doi.org/10.1007/s00484-017-1319-z>
- Nayak, S. G., Lin, S., Sheridan, S. C., Lu, Y., Graber, N., Primeau, M., Jones Rafferty, C., & Hwang, S.-A. (2017). Surveying Local Health Departments and County Emergency Management Offices on Cooling Centers as a Heat Adaptation Resource in New York State. *Journal of Community Health*, 42(1), 43-50. <https://doi.org/10.1007/s10900-016-0224-4>
- Nayak, S. G., Shrestha, S., Kinney, P. L., Ross, Z., Sheridan, S. C., Pantea, C. I., Hsu, W. H., Muscatello, N., & Hwang, S. A. (2018). Development of a heat vulnerability index for New York State. *Public Health*, 161, 127-137. <https://doi.org/10.1016/j.puhe.2017.09.006>
- Niu, Y. L., Li, Z. C., Gao, Y., Liu, X. B., Xu, L., Vardoulakis, S., Yue, Y. J., Wang, J., & Liu, Q. Y. (2021). A Systematic Review of the Development and Validation of the Heat Vulnerability Index: Major Factors, Methods, and Spatial Units. *Current Climate Change Reports*, 7(3), 87-97. <https://doi.org/10.1007/s40641-021-00173-3>
- Oke, T. R. (1987) *Boundary Layer Climates* (2^e éd.). Routledge.
- Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. (2017). *Urban Climates*. Cambridge University Press.
- Olofsson, P., Foody, G. M., Herold, M., Stehman, S. V., Woodcock, C. E., & Wulder, M. A. (2014). Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sensing of Environment*, 148, 42-57. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.015>
- Osborne, J. W., & Costello, A. B. (2004). Sample size and subject to item ratio in principal components analysis. *Practical Assessment, Research, and Evaluation*, 9(11). <https://doi.org/10.7275/ktzq-jq66>

- Oukawa, G. Y., Krecl, P., & Targino, A. C. (2022). Fine-scale modeling of the urban heat island: A comparison of multiple linear regression and random forest approaches. *Science of the Total Environment*, 815, 152836. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152836>
- Parry, M., Canziani, O., Palutikof, J., van der Linden, P., & Hanson, C. (2007). *Bilan 2007 des changements climatiques : Conséquences, adaptation et vulnérabilité*. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2020/02/ar4-wg2-sum-vol-fr.pdf>
- Pett, M. A., Lackey, N. R., & Sullivan, J. J. (2003). *Making Sense of Factor Analysis: The Use of Factor Analysis for Instrument Development in Health Care Research*. SAGE Publications, Inc.
- Räsänen, A., Heikkinen, K., Piila, N., & Juhola, S. (2019). Zoning and weighting in urban heat island vulnerability and risk mapping in Helsinki, Finland. *Regional Environmental Change*, 19, 1481-1493. <https://doi.org/10.1007/s10113-019-01491-x>
- Sagris, V., & Sepp, M. (2017). Landsat-8 TIRS Data for Assessing Urban Heat Island Effect and Its Impact on Human Health. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 14(12), 2385-2389. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2017.2765703>
- Santamouris, M. (2020). Recent progress on urban overheating and heat island research. Integrated assessment of the energy, environmental, vulnerability and health impact. Synergies with the global climate change. *Energy and Buildings*, 207, 109482. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109482>
- Schiavina, M., Melchiorri, M., Pesaresi, M., Politis, P., Freire, S., Maffenini, L., Florio, P., Ehrlich, D., Goch, K., Tommasi, P. & Kemper, T. (2022). *GHS-L Data Package 2022*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2760/19817>
- Song, J., Huang, B., Kim, J. S., Wen, J., & Li, R. (2020). Fine-scale mapping of an evidence-based heat health risk index for high-density cities: Hong Kong as a case study. *Science of The Total Environment*, 718, 137226. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137226>
- Stafford, J., & Bodson, P. (2006). *L'analyse multivariée avec SPSS*. Presses de l'Université du Québec.
- Statistique Canada. (2017). *Glossaire illustré – Îlots de diffusion (ID)*. <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/92-195-x/2016001/geo/db-id/db-id-fra.htm>
- Statistique Canada. (2022a). *Dictionnaire du Recensement de la population 2021*. <https://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2021/ref/dict/index-fra.cfm>
- Statistique Canada (2022b). *Estimations de la population au 1er juillet, par âge et sexe*. <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/tv.action?pid=1710000501>
- Statistique Canada (2022c). *Glossaire illustré – Aire de diffusion (AD)*. <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/92-195-x/2021001/geo/da-ad/da-ad-fra.htm>
- Statistique Canada (2022d). *Glossaire illustré – Région métropolitaine de recensement (RMR) et agglomération de recensement (AR)*. <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/92-195-x/2021001/geo/cma-rmr/cma-rmr-fra.htm>
- Statistique Canada (2022e). *La croissance et l'étalement des grands centres urbains du Canada se poursuivent*. <https://www150.statcan.gc.ca/n1/daily-quotidien/220209/dq220209b-fra.htm>

- Statistique Canada (2022f). *L'Environnement de couplage de données ouvertes*.
<https://www.statcan.gc.ca/fr/ecdo>
- Stehman, S. V. (2009). Sampling designs for accuracy assessment of land cover. *International Journal of Remote Sensing*, 30(20), 5243-5272. <https://doi.org/10.1080/01431160903131000>
- Strahler, A. H., Boschetti, L., Foody, G. M., Friedl, M. A., Hansen, M. C., Herold, M., Mayaux, P., Morisette, J. T., Stehman, S. V. & Woodcock, C. E. (2006). *Global Land Cover Validation: Recommendations for Evaluation and Accuracy Assessment of Global Land Cover Maps*. Publications Office of the European Union. <https://op.europa.eu/s/yCm1>
- Straub, A., Berger, K., Breitner, S., Cyrus, J., Geruschkat, U., Jacobeit, J., Kühnbach, B., Kusch, T., Philipp, A., Schneider, A., Umminger, R., Wolf, K., & Beck, C. (2019). Statistical modelling of spatial patterns of the urban heat island intensity in the urban environment of Augsburg, Germany. *Urban Climate*, 29, 100491. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100491>
- Tran, D. N., Doan, V. Q., Nguyen, V. T., Khan, A., Thai, P. K., Huang, C. R., Chu, C., Schak, E., & Phung, D. (2020). Spatial patterns of health vulnerability to heatwaves in Vietnam. *International Journal of Biometeorology*, 64(5), 863-872. <https://doi.org/10.1007/s00484-020-01876-2>
- Turek-Hankins, L. L., Hino, M., & Mach, K. J. (2020). Risk screening methods for extreme heat: Implications for equity-oriented adaptation. *Plos One*, 15(11), 0240841. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0240841>
- Voelkel, J., Hellman, D., Sakuma, R., & Shandas, V. (2018). Assessing vulnerability to urban heat: A study of disproportionate heat exposure and access to refuge by socio-demographic status in Portland, Oregon. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(4). <https://doi.org/10.3390/ijerph15040640>
- von Bergmann, J., Shkolnik, D., & Jacobs, A. (2021). *cancensus: R package to access, retrieve, and work with Canadian Census data and geography* (version 0.4.2). [package R]. <https://mountainmath.github.io/cancensus/>
- Wang, M., Zhang, Z., Hu, T., Wang, G., He, G., Zhang, Z., ... & Liu, X. (2020). An efficient framework for producing Landsat-based land surface temperature data using Google Earth engine. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13, 4689-4701. <https://doi:10.1109/jstars.2020.3014586>
- Widerynski, S., Schramm, P., Conlon, K., Noe, R., Grossman, E., Hawkins, M., Nayak, S., Roach, M. & Hilts, A. (2017). *The Use of Cooling Centers to Prevent Heat-Related Illness: Summary of Evidence and Strategies for Implementation*. National Center for Environmental Health (US). <https://stacks.cdc.gov/view/cdc/47657>
- Wolf, T., Chuang, W.-C., & McGregor, G. (2015). On the Science-Policy Bridge: Do Spatial Heat Vulnerability Assessment Studies Influence Policy? *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(10), 13321-13349. <https://doi.org/10.3390/ijerph121013321>
- Yu, J. S., Castellani, K., Forysinski, K., Gustafson, P., Lu, J. M., Peterson, E., Tran, M., Yao, A., Zhao, J. X., & Brauer, M. (2021). Geospatial indicators of exposure, sensitivity, and adaptive capacity to assess neighbourhood variation in vulnerability to climate change-related health hazards. *Environmental Health*, 20(1), Article 31. <https://doi.org/10.1186/s12940-021-00708-z>

- Zemtsov, S., Shartova, N., Varentsov, M., Konstantinov, P., Kidyaeva, V., Shchur, A., Timonin, S., & Grischchenko, M. (2020). Intraurban social risk and mortality patterns during extreme heat events: A case study of Moscow, 2010-2017. *Health & Place*, 66, Article 102429. <https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2020.102429>
- Zhang, W., McManus, P., & Duncan, E. (2018). A Raster-Based Subdividing Indicator to Map Urban Heat Vulnerability: A Case Study in Sydney, Australia. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(11), 2516. <https://doi.org/10.3390/ijerph15112516>
- Zhang, W., Zhao, Q., & Pei, M. (2021). How much uncertainty does the choice of data transforming method brings to heat risk mapping? Evidence from China. *Natural Hazards*, 106, 349-373. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04466-y>
- Zhang, X., Flato, G., Kirchmeier-Young, M., Vincent, L., Wan, H., Wang, X., Rong, R., Fyfe, J., Li, G., & Kharin, V. V. (2019). Les changements de température et de précipitations pour le Canada. Dans E. Bush et D. S. Lemmen (dir), *Rapport sur le climat changeant du Canada* (p. 113-193). Gouvernement du Canada. <https://doi.org/10.4095/314614>
- Zheng, M. X., Zhang, J. H., Shi, L. M., Zhang, D., Sharma, T. P. P., & Prodhan, F. A. (2020). Mapping Heat-Related Risks in Northern Jiangxi Province of China Based on Two Spatial Assessment Frameworks Approaches. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(18), 6584. <https://doi.org/10.3390/ijerph17186584>
- Zuhra, S. S., Tabinda, A. B., & Yasar, A. (2019). Appraisal of the heat vulnerability index in Punjab: a case study of spatial pattern for exposure, sensitivity, and adaptive capacity in megacity Lahore, Pakistan. *International Journal of Biometeorology*, 63(12), 1669-1682. <https://doi.org/10.1007/s00484-019-01784-0>

7 ANNEXES

7.1 ANNEXE 1: LISTE DES 156 RMR ET AR CARTOGRAPHIÉES

Tableau 44: Liste complète des 156 RMR/AR de la zone d'étude

Régions urbaines (RMR/AR)	Types de région urbaine	Provinces	Population en 2021
Abbotsford - Mission	RMR	Colombie-Britannique	195 726
Alma	AR	Québec	30 331
Amos	AR	Québec	18 873
Baie-Comeau	AR	Québec	26 643
Barrie	RMR	Ontario	212 856
Bathurst	AR	Nouveau-Brunswick	31 387
Belleville - Quinte West	RMR	Ontario	111 184
Brandon	AR	Manitoba	54 268
Brantford	RMR	Ontario	144 162
Brockville	AR	Ontario	31 661
Brooks	AR	Alberta	14 924
Calgary	RMR	Alberta	1 481 806
Campbell River	AR	Colombie-Britannique	40 704
Campbellton (partie du Nouveau-Brunswick)	AR	Nouveau-Brunswick	11 986
Campbellton (partie du Québec)	AR	Québec	1 344
Camrose	AR	Alberta	18 772
Canmore	AR	Alberta	15 990
Cape Breton	AR	Nouvelle-Écosse	98 318
Centre Wellington	AR	Ontario	31 093
Charlottetown	AR	Île-du-Prince-Édouard	78 858
Chatham-Kent	AR	Ontario	104 316
Chilliwack	RMR	Colombie-Britannique	113 767
Cobourg	AR	Ontario	20 519
Collingwood	AR	Ontario	24 811
Corner Brook	AR	Terre-Neuve-et-Labrador	29 762
Cornwall	AR	Ontario	61 415
Courtenay	AR	Colombie-Britannique	63 282
Cowansville	AR	Québec	15 234
Cranbrook	AR	Colombie-Britannique	27 040
Dawson Creek	AR	Colombie-Britannique	17 878
Dolbeau-Mistassini	AR	Québec	15 306
Drummondville	RMR	Québec	101 610
Duncan	AR	Colombie-Britannique	47 582
Edmonton	RMR	Alberta	1 418 118
Edmundston	AR	Nouveau-Brunswick	22 144

Elliot Lake	AR	Ontario	11 372
Essa	AR	Ontario	22 970
Estevan	AR	Saskatchewan	12 798
Fort St. John	AR	Colombie-Britannique	28 729
Fredericton	RMR	Nouveau-Brunswick	108 610
Gander	AR	Terre-Neuve-et-Labrador	13 414
Granby	AR	Québec	90 833
Grand Falls-Windsor	AR	Terre-Neuve-et-Labrador	13 853
Grand Sudbury	RMR	Ontario	170 605
Grande Prairie	AR	Alberta	64 141
Guelph	RMR	Ontario	165 588
Halifax	RMR	Nouvelle-Écosse	465 703
Hamilton	RMR	Ontario	785 184
Hawkesbury (partie de l'Ontario)	AR	Ontario	10 194
Hawkesbury (partie du Québec)	AR	Québec	1 816
High River	AR	Alberta	14 324
Ingersoll	AR	Ontario	13 693
Joliette	AR	Québec	52 706
Kamloops	RMR	Colombie-Britannique	114 142
Kawartha Lakes	AR	Ontario	79 247
Kelowna	RMR	Colombie-Britannique	222 162
Kenora	AR	Ontario	14 967
Kentville	AR	Nouvelle-Écosse	26 929
Kingston	RMR	Ontario	172 546
Kitchener - Cambridge - Waterloo	RMR	Ontario	575 847
Lachute	AR	Québec	14 100
Lacombe	AR	Alberta	13 396
Ladysmith	AR	Colombie-Britannique	15 501
Lethbridge	RMR	Alberta	123 847
Lloydminster (partie de la Saskatchewan)	AR	Saskatchewan	16 769
Lloydminster (partie de l'Alberta)	AR	Alberta	19 739
London	RMR	Ontario	543 551
Matane	AR	Québec	18 474
Medicine Hat	AR	Alberta	76 376
Midland	AR	Ontario	27 894
Miramichi	AR	Nouveau-Brunswick	27 593
Moncton	RMR	Nouveau-Brunswick	157 717
Montréal	RMR	Québec	4 291 732
Moose Jaw	AR	Saskatchewan	34 872
Nanaimo	RMR	Colombie-Britannique	115 459
Nelson	AR	Colombie-Britannique	19 119

New Glasgow	AR	Nouvelle-Écosse	34 397
Norfolk	AR	Ontario	67 490
North Battleford	AR	Saskatchewan	19 374
North Bay	AR	Ontario	71 736
Okotoks	AR	Alberta	30 405
Orillia	AR	Ontario	33 411
Oshawa	RMR	Ontario	415 311
Ottawa - Gatineau (partie de l'Ontario)	RMR	Ontario	1 135 014
Ottawa - Gatineau (partie du Québec)	RMR	Québec	353 293
Owen Sound	AR	Ontario	32 712
Parksville	AR	Colombie-Britannique	31 054
Pembroke	AR	Ontario	23 814
Penticton	AR	Colombie-Britannique	47 380
Petawawa	AR	Ontario	18 160
Peterborough	RMR	Ontario	128 624
Port Alberni	AR	Colombie-Britannique	25 786
Port Hope	AR	Ontario	17 294
Portage la Prairie	AR	Manitoba	13 270
Powell River	AR	Colombie-Britannique	17 825
Prince Albert	AR	Saskatchewan	45 718
Prince George	AR	Colombie-Britannique	89 490
Prince Rupert	AR	Colombie-Britannique	13 442
Québec	RMR	Québec	839 311
Quesnel	AR	Colombie-Britannique	23 113
Red Deer	RMR	Alberta	100 844
Regina	RMR	Saskatchewan	249 217
Rimouski	AR	Québec	53 944
Rivière-du-Loup	AR	Québec	30 025
Rouyn-Noranda	AR	Québec	42 313
Saguenay	RMR	Québec	161 567
Saint John	RMR	Nouveau-Brunswick	130 613
Sainte-Agathe-des-Monts	AR	Québec	19 892
Sainte-Marie	AR	Québec	13 134
Saint-Georges	AR	Québec	34 833
Saint-Hyacinthe	AR	Québec	59 980
Salaberry-de-Valleyfield	AR	Québec	42 787
Salmon Arm	AR	Colombie-Britannique	19 705
Sarnia	AR	Ontario	97 592
Saskatoon	RMR	Saskatchewan	317 480
Sault Ste. Marie	AR	Ontario	76 731
Sept-Îles	AR	Québec	27 729

Shawinigan	AR	Québec	49 620
Sherbrooke	RMR	Québec	227 398
Sorel-Tracy	AR	Québec	41 934
Squamish	AR	Colombie-Britannique	24 232
St. Catharines - Niagara	RMR	Ontario	433 604
St. John's	RMR	Terre-Neuve-et-Labrador	212 579
Steinbach	AR	Manitoba	17 806
Stratford	AR	Ontario	33 232
Strathmore	AR	Alberta	14 339
Summerside	AR	Île-du-Prince-Édouard	18 157
Swift Current	AR	Saskatchewan	18 745
Sylvan Lake	AR	Alberta	16 514
Terrace	AR	Colombie-Britannique	19 606
Thetford Mines	AR	Québec	28 287
Thompson	AR	Manitoba	13 035
Thunder Bay	RMR	Ontario	123 258
Tillsonburg	AR	Ontario	18 615
Timmins	AR	Ontario	41 145
Toronto	RMR	Ontario	6 202 225
Trail	AR	Colombie-Britannique	14 268
Trois-Rivières	RMR	Québec	161 489
Truro	AR	Nouvelle-Écosse	46 157
Val-d'Or	AR	Québec	34 037
Vancouver	RMR	Colombie-Britannique	2 642 825
Vernon	AR	Colombie-Britannique	67 086
Victoria	RMR	Colombie-Britannique	397 237
Victoriaville	AR	Québec	52 936
Wasaga Beach	AR	Ontario	24 862
Wetaskiwin	AR	Alberta	12 594
Weyburn	AR	Saskatchewan	12 247
Whitehorse	AR	Yukon	31 913
Williams Lake	AR	Colombie-Britannique	23 608
Windsor	RMR	Ontario	422 630
Winkler	AR	Manitoba	32 655
Winnipeg	RMR	Manitoba	834 678
Wood Buffalo	AR	Alberta	73 837
Woodstock	AR	Ontario	46 705
Yellowknife	AR	Territoires du Nord-Ouest	20 340
Yorkton	AR	Saskatchewan	19 859

7.2 ANNEXE 2: UTILISATION DU PROTOTYPE DE L'OUTIL CARTOGRAPHIQUE PAR LA VILLE DE VICTORIA À L'ÉTÉ 2022

Le prototype en ligne de la cartographie de la vulnérabilité et de l'exposition des populations aux vagues de chaleur accablantes de la région métropolitaine de recensement de Victoria a été consulté 257 fois entre le début du mois de mai et la fin du mois de septembre (figure 33). Il y a eu un pic du nombre de consultations de la page au mois de juin autour de la date de la réunion du 13 juin. L'outil était disponible à partir du début juin pour les intervenants, ce qui explique le nombre de consultations. Il y a également eu un petit pic au mois de septembre lors de la période du sondage.

On peut constater que l'achalandage n'est pas très important pendant l'été sur l'outil en ligne. Cela s'explique en partie par le groupe restreint de personnes qui y avait accès et par l'absence de grosse vague de chaleur en Colombie-Britannique cet été contrairement à l'été 2021, alors que la province avait connu une vague de chaleur historique et qu'un nouveau record de température canadien avait été établi dans le village de Lytton avec 49,6 degrés Celsius. Plus de 1000 nouveaux records locaux de températures journalière avaient été enregistrés entre la fin juin et le début juillet (British Columbia Coroners Service, 2022). Également, l'outil n'avait pas encore fait l'objet d'un plan de communications. Cette étape étant prévue pour le printemps 2023.

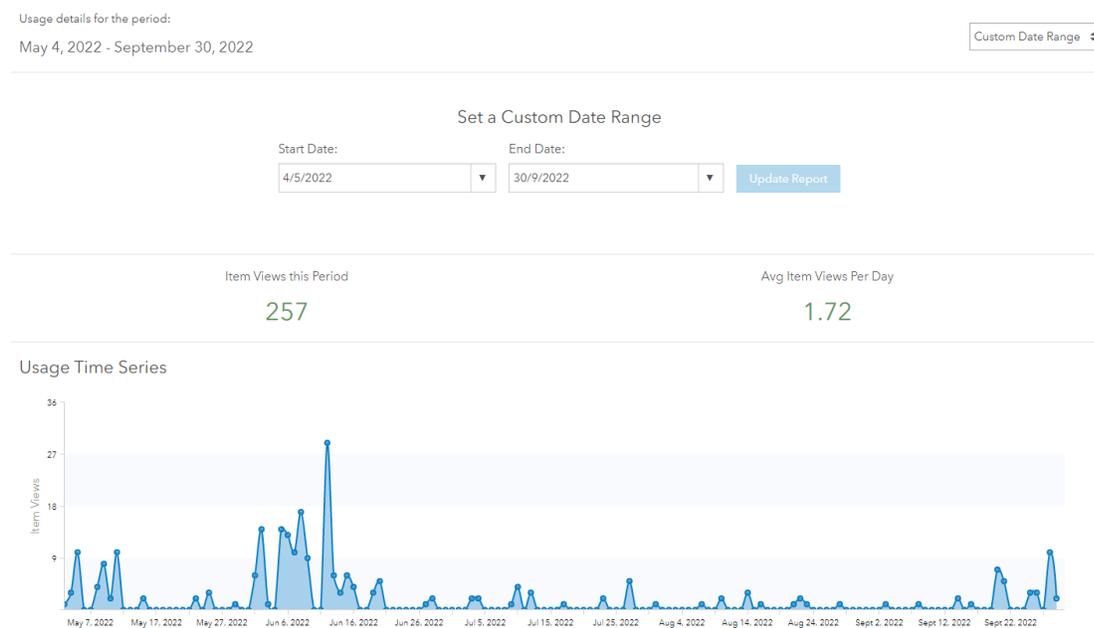


Figure 33: Historique des consultations de l'outil cartographique en ligne

7.3 ANNEXE 3: AIDE À LA NAVIGATION (VERSION ORDINATEUR)

INTRODUCTION À LA NAVIGATION

Pour vous déplacer sur la carte, maintenez enfoncer le bouton gauche de la souris et une main apparaîtra, vous permettant de faire glisser et de repositionner votre vue en bougeant la souris. Si vous utilisez le pavé tactile de votre ordinateur, maintenez enfoncer le bouton gauche et déplacez votre doigt sur le pavé tactile pour arriver au même résultat.

Les 156 régions urbaines couvertes par le projet de cartographie de vulnérabilité et de l'exposition aux vagues de chaleur accablante sont celles qui apparaissent en gris pâle avec une bordure blanche sur la carte du Canada. En zoomant sur la région de votre choix, la couche grise va disparaître pour faire place à la couche d'exposition aux vagues de chaleur.

Vous retrouverez dans l'application un total de six thématiques :

- Exposition aux vagues de chaleur
- Sensibilité aux vagues de chaleur
- Capacité à faire face aux vagues de chaleur
- Vulnérabilité aux vagues de chaleur
- Vulnérabilité et exposition aux vagues de chaleur
- Îlots de chaleur urbains

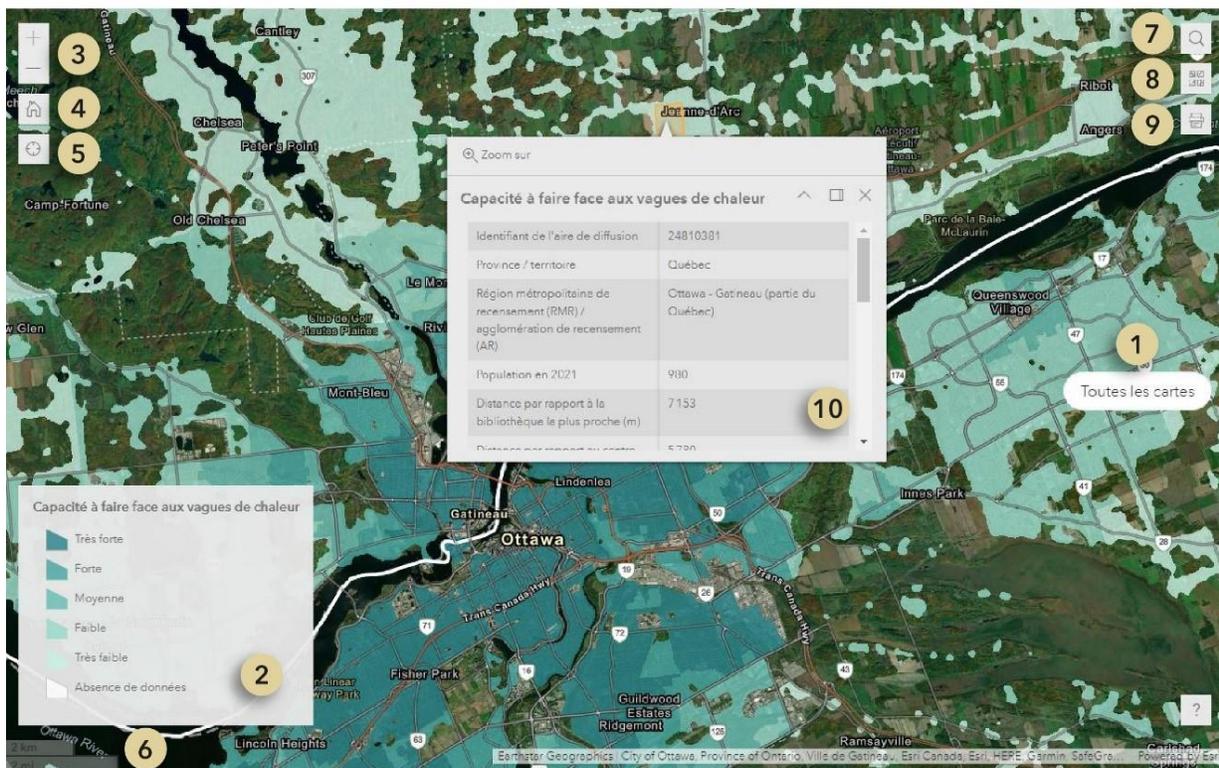


Figure 34: Emplacement des widgets dans l'interface cartographique

TOUTES LES CARTES (N° 1)

Pour afficher une autre thématique, cliquez sur le bouton « Toutes les cartes » et sélectionnez celle qui vous intéresse. Deux modes s'offrent à vous : « 1 carte » et « 2 cartes ». Si vous cliquez sur l'icône « 1 carte », vous pourrez sélectionner celle que vous désirez visualiser parmi les 6.

En cliquant sur le mode « 2 cartes » vous pourrez visualiser et vous déplacer sur 2 cartes simultanément (vulnérabilité/exposition et îlots de chaleur urbains).

LÉGENDE (N° 2)

La légende de la carte apparaît automatiquement avec le mode « 1 carte » et le nom de la couche se trouve en haut de la légende.

En mode 2 cartes, seul le nom de la thématique apparaît afin de faire plus de place aux données sur les cartes. La légende peut cependant être consultée en cliquant sur le bouton « Couches » des cartes respectives représenté par l'icône avec trois carrés horizontaux superposés. Une fois la fenêtre ouverte, cliquez sur le mot légende pour la voir apparaître.

ZOOM (N° 3)

Vous pouvez utiliser les symboles plus et moins pour effectuer un zoom avant et arrière. Il est également possible d'utiliser la molette de défilement de votre souris pour le faire. Si vous utilisez le pavé tactile de votre ordinateur, écartez deux doigts pour faire un zoom avant sur un emplacement et rapprochez deux doigts pour faire un zoom arrière.

Chaque carte à un zoom indépendant dans le mode « 1 carte », vous devez donc zoomer de nouveau sur la région de votre choix si vous changez de carte.

VUE CARTOGRAPHIQUE PAR DÉFAUT (N° 4)

En cliquant sur l'icône de la maison, vous reviendrez à la vue cartographique par défaut du Canada.

RECHERCHER MA LOCALISATION (N° 5)

Rechercher ma localisation (icône en forme de cible) permet de détecter l'emplacement où vous vous trouvez pour ensuite effectuer un zoom dans votre secteur. Il est possible que cet outil ne fonctionne pas selon les paramètres de confidentialité de votre ordinateur en ce qui a trait à la géolocalisation.

ÉCHELLE (N° 6)

Pour vous donner une idée du rapport entre la distance mesurée sur la carte et la distance réelle sur le terrain, consultez l'échelle graphique en bas à gauche de la carte. Elle s'affiche en kilomètres et en miles.

RECHERCHER (N° 7)

Vous pouvez chercher un emplacement ou une adresse spécifique à l'aide de l'outil « Rechercher ». En saisissant un ou plusieurs mots dans la boîte de texte, un menu déroulant apparaîtra avec les choix. En choisissant une des options et en appuyant sur le symbole de la loupe, l'outil zoomera sur votre résultat de recherche.

FOND DE CARTE (N° 8)

La bibliothèque de fonds de carte présente différentes options que vous pouvez sélectionner en tant que fond de carte. En cliquant sur l'icône, un menu déroulant avec tous les choix va apparaître. Le fond de carte par défaut de notre application est « *Imagery Hybrid* ».

IMPRIMER (N° 9)

L'outil « Imprimer » vous permet de créer une carte de format JPG représentant l'étendue cartographique choisie qu'il sera possible d'enregistrer sur votre ordinateur ou d'imprimer par la suite.

En cliquant sur l'icône de l'imprimante, un menu déroulant avec les différents formats va apparaître. Vous devez sélectionner un et ensuite cliquez sur le bouton « Imprimer ». La procédure peut prendre quelques secondes. Lorsque l'on voit un cercle à gauche du nom de la carte, c'est que l'opération est en cours. Lorsque le petit cercle se transforme en icône de page, vous pouvez cliquer dessus et un nouvel onglet va apparaître avec votre carte. Pour enregistrer la carte sur votre ordinateur, cliquez avec le bouton droit de votre souris ou de votre pavé tactile et un menu va apparaître avec l'option « Enregistrer l'image sous ». Vous pouvez alors décider du nom et de l'emplacement de votre fichier. Si vous avez un ordinateur Apple, cliquez avec deux doigts en même temps pour faire apparaître le menu.

Si vous désirez produire une autre carte, cliquez sur le bouton « Réinitialiser » pour recommencer la procédure.

En cliquant sur l'option « Aperçu des étendues d'impression », la zone en bleue qui apparaît correspond à la zone qui se retrouvera sur votre carte.

**Nous sommes conscients que les cartes produites n'ont pas de légende, il s'agit d'une problématique hors de notre contrôle qui provient du logiciel et qui sera réglé éventuellement.*

FENÊTRE CONTEXTUELLE (N° 10)

Vous pouvez cliquer sur une aire de diffusion sur la carte et une fenêtre contextuelle apparaîtra. Cette fenêtre contient les informations sur les variables et les indices. L'outil « Zoom sur » au bas ou en haut de la fenêtre permet quant à lui de zoomer sur le polygone en sélection.

*Il n'y a pas de fenêtre contextuelle pour la carte des îlots de chaleur urbains.

7.4 ANNEXE 4: AIDE À LA NAVIGATION (VERSION TABLETTE)

AVANT DE COMMENCER

Pour une expérience optimale de l'outil cartographique en ligne, il est recommandé d'utiliser un ordinateur plutôt qu'un téléphone portable ou une tablette. L'écran plus grand de l'ordinateur offre une meilleure visualisation de la carte et un plus grand nombre de fonctionnalités est offert sur ce support.

INTRODUCTION À LA NAVIGATION

Pour commencer, vous pouvez zoomer en écartant deux doigts pour agrandir la carte ou en les rapprochant pour la réduire. Pas la suite, localisez la zone que vous souhaitez explorer et placez un doigt sur l'écran et faites-le glisser vers le haut, le bas, la gauche ou la droite pour déplacer la carte dans la direction souhaitée.

Chaque carte à un zoom indépendant dans le mode « 1 carte », vous devez donc zoomer de nouveau sur la région de votre choix si vous changez de carte.

Les 156 régions urbaines couvertes par le projet de cartographie de vulnérabilité et de l'exposition aux vagues de chaleur accablante sont celles qui apparaissent en gris pâle avec une bordure blanche sur la carte du Canada. En zoomant sur la région de votre choix, la couche grise va disparaître pour faire place à la couche d'exposition aux vagues de chaleur.

Vous retrouverez dans l'application un total de six thématiques :

- Exposition aux vagues de chaleur
- Sensibilité aux vagues de chaleur
- Capacité à faire face aux vagues de chaleur
- Vulnérabilité aux vagues de chaleur
- Vulnérabilité et exposition aux vagues de chaleur
- Îlots de chaleur urbains

TOUTES LES CARTES

Pour afficher une autre thématique, appuyer sur le bouton « Toutes les cartes » et sélectionnez celle qui vous intéresse. Deux modes s'offrent à vous : « 1 carte » et « 2 cartes ». Si vous appuyer sur l'icône « 1 carte », vous pourrez sélectionner celle que vous désirez visualiser parmi les 6.

En appuyant sur le mode « 2 cartes » vous pourrez visualiser et vous déplacer sur 2 cartes simultanément (vulnérabilité/exposition et îlots de chaleur urbains).

VUE CARTOGRAPHIQUE PAR DÉFAUT

En appuyant sur l'icône de la maison, vous reviendrez à la vue cartographique par défaut du Canada.

RECHERCHER MA LOCALISATION

Rechercher ma localisation (icône en forme de cible) permet de détecter l'emplacement où vous vous trouvez pour ensuite effectuer un zoom dans votre secteur. Il est possible que cet outil ne fonctionne pas selon les paramètres de confidentialité de votre tablette en ce qui a trait à la géolocalisation.

ÉCHELLE

Pour vous donner une idée du rapport entre la distance mesurée sur la carte et la distance réelle sur le terrain, consultez l'échelle graphique en bas à gauche de la carte. Elle s'affiche en kilomètres et en miles.

LÉGENDE

Pour accéder à la légende, appuyer sur l'onglet « Couches » qui est représenté par trois carrés à l'horizontale superposés. Une fenêtre s'ouvrira avec deux menus (« Couche » et « Légende »). Appuyer sur le mot légende pour la faire apparaître.

FOND DE CARTE

La bibliothèque de fonds de carte présente différentes options que vous pouvez sélectionner en tant que fond de carte. En appuyant sur l'icône, un menu déroulant avec tous les choix va apparaître. Le fond de carte par défaut de notre application est « *Imagery Hybrid* ».

IMPRIMER

L'outil « Imprimer » vous permet de créer une carte de format JPG représentant l'étendue cartographique choisie qu'il sera possible d'enregistrer sur votre tablette ou d'imprimer par la suite.

En appuyant sur l'icône de l'imprimante, un menu déroulant avec les différents formats va apparaître. Vous devez en sélectionner un et ensuite appuyez sur le bouton « Imprimer ». La procédure peut prendre quelques secondes. Lorsque l'on voit un cercle à gauche du nom de la carte, c'est que l'opération est en cours. Lorsque le petit cercle se transforme en icône de page, vous pouvez appuyer dessus et un nouvel onglet va apparaître avec votre carte.

Si vous désirez produire une autre carte, appuyez sur le bouton « Réinitialiser » pour recommencer la procédure.

En appuyant sur l'option « Aperçu des étendues d'impression », la zone en bleue qui apparaît correspond à la zone qui se retrouvera sur votre carte.

**Nous sommes conscients que les cartes produites n'ont pas de légende, il s'agit d'une problématique hors de notre contrôle qui provient du logiciel et qui sera réglé éventuellement.*

FENÊTRE CONTEXTUELLE

Vous pouvez appuyer sur une aire de diffusion sur la carte et une fenêtre contextuelle apparaîtra. Cette fenêtre contient les informations sur les variables et les indices. L'outil « Zoom sur » au bas ou en haut de la fenêtre permet quant à lui de zoomer sur le polygone en sélection.

*Il n'y a pas de fenêtre contextuelle pour la carte des îlots de chaleur urbains.

7.5 ANNEXE 5: AIDE À LA NAVIGATION (VERSION TÉLÉPHONE)

AVANT DE COMMENCER

Pour une expérience optimale de l'outil cartographique en ligne, il est recommandé d'utiliser un ordinateur plutôt qu'un téléphone portable ou une tablette. L'écran plus grand de l'ordinateur offre une meilleure visualisation de la carte et un plus grand nombre de fonctionnalités est offert sur ce support.

INTRODUCTION À LA NAVIGATION

Pour commencer, vous pouvez zoomer en écartant deux doigts pour agrandir la carte ou en les rapprochant pour la réduire. Pas la suite, localisez la zone que vous souhaitez explorer et placez un doigt sur l'écran et faites-le glisser vers le haut, le bas, la gauche ou la droite pour déplacer la carte dans la direction souhaitée.

Chaque carte à un zoom indépendant dans le mode « 1 carte », vous devez donc zoomer de nouveau sur la région de votre choix si vous changez de carte.

Les 156 régions urbaines couvertes par le projet de cartographie de vulnérabilité et de l'exposition aux vagues de chaleur accablante sont celles qui apparaissent en gris pâle avec une bordure blanche sur la carte du Canada. En zoomant sur la région de votre choix, la couche grise va disparaître pour faire place à la couche d'exposition aux vagues de chaleur.

Vous retrouverez dans l'application un total de six thématiques :

- Exposition aux vagues de chaleur
- Sensibilité aux vagues de chaleur
- Capacité à faire face aux vagues de chaleur
- Vulnérabilité aux vagues de chaleur
- Vulnérabilité et exposition aux vagues de chaleur
- Îlots de chaleur urbains

TOUTES LES CARTES

Pour consulter les différentes couches d'information géographique et changer la couche affichée, appuyez sur le bouton « Toutes les cartes » et sélectionner celle que vous désirez visualiser parmi les 6.

LÉGENDE

Pour accéder à la légende, appuyez sur l'outil « Couches » qui est représenté par trois carrés à l'horizontale superposés. Une fenêtre s'ouvrira avec deux menus (« Couche » et « Légende »). Appuyez sur le mot légende pour la faire apparaître.

FOND DE CARTE

La bibliothèque de fonds de carte présente différentes options que vous pouvez sélectionner en tant que fond de carte. En appuyant sur l'icône, un menu déroulant avec tous les choix va apparaître. Le fond de carte par défaut de notre application est « *Imagery Hybrid* ».

VUE CARTOGRAPHIQUE PAR DÉFAUT

En appuyant sur l'icône de la maison, vous reviendrez à la vue cartographique par défaut du Canada.

RECHERCHER MA LOCALISATION

Rechercher ma localisation (icône en forme de cible) permet de détecter l'emplacement où vous vous trouvez pour ensuite effectuer un zoom dans votre secteur. Il est possible que cet outil ne fonctionne pas selon les paramètres de confidentialité de votre téléphone en ce qui a trait à la géolocalisation.

FENÊTRE CONTEXTUELLE

Vous pouvez appuyer sur une aire de diffusion sur la carte et une fenêtre contextuelle apparaîtra. Cette fenêtre contient les informations sur les variables et les indices. L'outil « Zoom sur » au bas ou en haut de la fenêtre permet quant à lui de zoomer sur le polygone en sélection.

*Il n'y a pas de fenêtre contextuelle pour la carte des îlots de chaleur urbains.