

Réalisation d'une carte interactive pour la communication de l'exposition et la vulnérabilité aux changements climatiques

par

Jean-Cédric FAUCHER

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE, CONCENTRATION PERSONNALISÉE
M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 10 FÉVRIER 2026

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Jean-Cédric Faucher, 2026



Cette licence Creative Commons signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette oeuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'oeuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE:

Mme. Annie Levasseur, directrice de mémoire
Département de génie de la construction de l'École de Technologie Supérieure

Mme. Janie Masse-Dufresne, présidente du jury
Département de génie de la construction de l'École de Technologie Supérieure

M. Richard Arsenault, membre du jury
Département de génie de la construction de l'École de Technologie Supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 30 JANVIER 2026

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

J'aimerais commencer par remercier le comité étudiant Tributerre où j'ai rencontré des personnes formidables et passionnées de l'environnement qui m'ont appris beaucoup. Je veux aussi remercier le club étudiant SerreETS grâce auquel j'ai pu approfondir mes connaissances et ma pratique sur l'agriculture urbaine.

Je remercie également ma famille et mes amis (et mon chat Gnocchi) pour m'avoir supporté pendant ma maîtrise. Un grand merci aussi à mes collègues Marianne et Paul pour avoir réalisé ce magnifique projet avec moi. Je tiens aussi à saluer les groupes de recherches des professeurs Annie Levasseur et Andrew Henderson pour avoir apporté une ambiance extraordinaire au bureau.

Finalement, je tiens à remercier Annie Levasseur pour son encadrement et ses conseils tout au long de ma maîtrise et de mon projet de recherche. Merci aussi à l'institut AdapT et à l'ensemble des chercheurs qui ont pris le temps de nous rencontrer et de nous donner des conseils pour améliorer le projet.

Réalisation d'une carte interactive pour la communication de l'exposition et la vulnérabilité aux changements climatiques

Jean-Cédric FAUCHER

RÉSUMÉ

L'augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes liés aux changements climatiques exerce une pression croissante sur les bâtiments, les infrastructures et la population du Québec. Les aléas climatiques tels que les vagues de chaleur, les précipitations abondantes et les tempêtes destructrices se font de plus en plus sentir dans la province. Pourtant, l'accès à l'information et à des solutions d'adaptation reste un frein majeur pour la société québécoise.

Ce mémoire a pour objectif principal de concevoir une carte interactive du Québec permettant de visualiser, pour un emplacement donné, l'exposition aux principaux aléas climatiques tout en proposant des solutions d'adaptation et de résilience pour les bâtiments et les infrastructures. Il vise à rendre accessibles des données climatiques complexes issues de sources scientifiques reconnues afin de sensibiliser la population québécoise et de l'outiller pour faire face aux défis climatiques. En s'appuyant sur une revue de littérature des sources de données climatiques existantes au Québec, ce mémoire vise à créer une méthodologie pour rassembler l'information existante en un seul outil pour la population québécoise. La première version de l'outil comporte sept aléas climatiques : augmentation des températures, pluies abondantes, chaleur extrême, froid extrême, tempêtes destructrices, sécheresses et crues.

Après l'analyse de diverses bases de données climatiques au Québec, les projections climatiques incluses dans la carte interactive proviennent principalement de l'outil Portraits climatiques d'Ouranos et de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional tandis que les données de vulnérabilité proviennent de l'analyse de vulnérabilité de la ville de Montréal. En plus de permettre de visualiser un total de 39 indicateurs climatiques, la plateforme permet d'obtenir un rapport personnalisé en fonction de son emplacement. Le rapport permet de voir quels aléas sont les plus critiques pour un emplacement et propose plus d'une centaine de solutions d'adaptation pour les bâtiments et les infrastructures.

Finalement, le projet vise donc à renforcer la résilience climatique au Québec en créant une première version de la carte interactive et en ouvrant la voie à de futurs travaux en matière d'adaptation et de résilience climatique au Québec.

Mots-clés: changements climatiques, adaptation, résilience, sensibilisation, carte interactive, données climatiques

Development of an interactive map for communicating climate change exposure and vulnerability

Jean-Cédric FAUCHER

ABSTRACT

The increasing frequency and intensity of climate-related extreme events are placing growing pressure on buildings, infrastructure, and populations across Québec. Climate hazards such as heat waves, heavy precipitation, and destructive storms are becoming increasingly prevalent throughout the province. Despite this, limited access to clear information and practical adaptation solutions remains a major barrier to effective climate resilience within Québec society.

The main objective of this thesis is to design an interactive map of Québec that enables users to visualize, for a given location, exposure to major climate hazards while also providing adaptation and resilience solutions for buildings and infrastructure. The project aims to make complex climate data from recognized scientific sources accessible in order to raise awareness among the Québec population and support informed decision-making in the face of climate-related challenges. Building on a literature review of existing climate data sources in Québec, this thesis proposes a methodology to consolidate existing information into a single, user-oriented tool. The first version of the platform includes seven climate hazards : rising temperatures, heavy precipitation, extreme heat, extreme cold, destructive storms, droughts, and flooding.

Following an analysis of several climate databases available in Québec, the climate projections integrated into the interactive map are primarily derived from Ouranos' Portraits climatiques tool and the Atlas hydroclimatique du Québec méridional, while vulnerability data are based on the vulnerability assessment conducted by the City of Montréal. In addition to enabling the visualization of a total of 39 climate indicators, the platform generates a location-based personalized report. This report identifies the most critical climate hazards for a given site and proposes more than one hundred adaptation measures for buildings and infrastructure.

Ultimately, this project seeks to strengthen climate resilience in Québec by developing a first version of an interactive climate mapping tool and by laying the groundwork for future research and initiatives in climate adaptation and resilience across the province.

Keywords: climate change, adaptation, resilience, public awareness, interactive map, climate data

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 CONTEXTE ET OBJECTIFS	3
1.1 Contexte	3
1.2 Objectifs du projet	4
1.2.1 Objectifs du projet global	5
1.2.2 Objectifs spécifiques au mémoire	5
1.2.3 Retombées du projet	6
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	7
2.1 Changements climatiques	7
2.1.1 Climat actuel	7
2.1.2 Climat futur	8
2.1.3 Modélisation climatique	9
2.1.3.1 Modèles climatiques	9
2.1.3.2 Projet d'intercomparaison de modèles couplés	10
2.1.3.3 Scénarios climatiques établis par le GIEC	11
2.2 Résilience climatique	14
2.2.1 Définition	14
2.2.2 Exemple de projet de résilience	15
2.2.2.1 Exercice Paris à 50°C	15
2.2.2.2 Plan climat 2020-2030 de la Ville de Montréal	16
2.2.2.3 Mesures de résilience à plus petite échelle	18
2.3 Sources de données climatiques	19
2.3.1 Outils utilisant les données d'Ouranos	19
2.3.1.1 Atlas climatique du Canada	19
2.3.1.2 Portraits climatiques	21
2.3.1.3 Données climatiques	24
2.3.1.4 PAVICS	26
2.3.2 L'atlas hydroclimatique du Québec méridional	27
2.3.2.1 Les familles d'indicateurs	30
2.3.2.2 La récurrence des débits	32
2.3.2.3 Les horizons temporels	32
2.3.2.4 Les descripteurs	32
2.3.2.5 Les scénarios d'émission de GES	34
2.3.3 Analyse de vulnérabilité de la ville de Montréal	34
2.4 Plateformes de visualisation existantes	35
2.4.1 Géorisque France	35
2.4.2 Carte climat par Équiterre	36
2.4.3 Plateformes proposées par Ouranos	38

2.5	Communication sur les changements climatiques	38
2.5.1	Communication et sensibilisation	38
2.5.1.1	Le rôle de l'individu dans la communication	39
2.5.1.2	Bien communiquer sur les changements climatiques	40
2.5.1.3	L'influence de la pandémie sur la communication des changements climatique	44
2.5.2	Baromètre de l'action climatique 2024	45
CHAPITRE 3	MÉTHODOLOGIE	47
3.1	Méthodologie générale du projet	47
3.2	Sondage	49
3.3	Sélection des aléas climatiques	50
3.4	Sélection des indicateurs climatiques	52
3.5	Sélection des scénarios d'émissions et horizons temporels	54
3.5.1	Scénarios d'émissions	54
3.5.2	Horizons temporels	54
3.6	Extraction et manipulations des données de projections climatiques	55
3.6.1	Portraits climatiques	55
3.6.2	Atlas hydroclimatique du Québec méridional	59
3.6.2.1	Utilisation de l'Atlas hydroclimatique pour le territoire du Québec	60
3.6.2.2	Méthode par bassin versant	62
3.6.2.3	Méthode par séparation des régions administratives	65
3.6.2.4	Méthode choisie	67
3.6.3	PAVICS	68
3.7	Extraction des données de vulnérabilité	69
3.7.1	Cartes de vulnérabilité de la ville de Montréal	69
3.7.2	Autres bases de données utilisées pour la vulnérabilité	70
3.7.2.1	Carte des dépôts meubles	70
3.7.2.2	Carte des îlots de chaleur	72
3.7.2.3	Carte des cuvettes de rétention d'eau de ruissellement à Montréal	72
CHAPITRE 4	RÉSULTATS	77
4.1	Communication et sondage	77
4.1.1	Changements climatiques	78
4.1.2	Résilience climatique	82
4.2	Modélisation	85
4.2.1	Aléas climatiques	87
4.2.2	Type de données	88
4.2.3	Indicateurs	89
4.2.4	Paramètres supplémentaires	90
4.2.5	Carte de vulnérabilité	91
4.2.6	Rapport personnalisé	91

4.2.7	Incertitudes	96
4.3	Programmation de l'application	98
4.3.1	Exigences fonctionnelles de la plateforme	98
4.3.2	Exigences non-fonctionnelles	101
4.3.3	Plateforme d'administration	103
4.4	Retour sur les objectifs et perspectives futures	104
4.4.1	Retour sur les objectifs	104
4.4.2	Perspectives futures de modélisation et données climatiques	105
4.4.3	Perspective future de la plateforme web	107
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		111
ANNEXE I	SONDAGE SUR L'ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET LA RÉSILIENCE DES INFRASTRUCTURES	113
ANNEXE II	SCRIPT PYTHON POUR L'EXTRACTION ET LA MANIPULATION DES FICHIERS	125
ANNEXE III	TABLEAU PRÉSENTANT LES CRITÈRES DE SÉLECTION DES INDICATEURS DE PORTRAITS CLIMATIQUES	127
ANNEXE IV	TABLEAU DES INDICATEURS DE VULNÉRABILITÉ	131
BIBLIOGRAPHIE		135

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 2.1	Classification des indicateurs climatiques selon leur type de variable de la plateforme Atlas climatique du Canada 21
Tableau 2.2	Classification des indicateurs climatiques selon leur type de variable de la plateforme Portraits climatiques 24
Tableau 2.3	Classification des indicateurs climatiques selon leur type de variable de la plateforme Données climatiques 26
Tableau 2.4	Contextes d’usage des outils de l’Atlas hydroclimatique. Tiré de Angelica Alberti-Dufort & Raphaël Desjardins (2022) 28
Tableau 2.5	Caractérisation des types d’indicateurs. Tiré de Angelica Alberti-Dufort & Raphaël Desjardins (2022) 29
Tableau 2.6	Échelle associée à la direction dans l’AHQM 33
Tableau 3.1	Choix des aléas et des définitions 51
Tableau 3.2	Indicateurs climatiques par aléa 53
Tableau 3.3	Indicateurs climatiques pour les aléas crues et sécheresses. Tiré du mémoire de Marianne Lipp (2025) 60
Tableau 3.4	Seuils de l’indicateur Contraction des sols ; géologie des dépôts meubles (code). Tiré du mémoire de Marianne Lipp (2025) 71
Tableau 3.5	Correspondance des classe de cuvettes 74
Tableau 4.1	Seuils de l’indicateur Précipitations maximales durant 1 jour l’été (mm) 93
Tableau 4.2	Options possibles pour le public cible en lien avec la proposition de mesures dans l’outil. Tiré du mémoire de Marianne Lipp (2025) 96
Tableau 4.3	Exigences non-fonctionnelles 102

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 2.1	Combinaisons de voies socioéconomiques partagées et de forçage radiatif de l'année 2100. Tiré de Gouvernement du Canada (2023) 11
Figure 2.2	Complémentarité entre atténuation et adaptation. Tiré de Ouranos & MELCCFP (2024) 15
Figure 2.3	Nombre de vague de chaleur à Montréal en 2080. Tiré de Atlas climatique du Canada 20
Figure 2.4	Nombre de vagues de chaleur au Québec en 2100. Tiré de Portraits climatiques (Ouranos, 2025) 23
Figure 2.5	Température maximale annuelle au Québec entre 2041 et 2070, selon le scénario d'émissions SSP2-4.5. Tiré de Données climatiques (ECCC, 2025) 25
Figure 2.6	Exemple de visualisation de l'atlas hydroclimatique. Tiré de l' <i>Atlas hydroclimatique du Québec méridional</i> (MELCCFP, 2025) 30
Figure 2.7	Exemples d'évaluations de risques présentés sur la plateforme Géorisques 36
Figure 2.8	Inondation majeure au Québec en 2019 37
Figure 2.9	Les embûches à la communication des changements climatiques et les solutions qui y répondent. Tiré de INSPQ (2024b) 41
Figure 3.1	Phases du projet, étapes principales et jalons 48
Figure 3.2	Exemple de découpage de la carte de projections climatiques extraite de <i>Portraits climatiques</i> . La carte montre les événements de gel-dégel annuels, selon le scénario climatique SSP3-7.0 et un horizon temporel de 2070 à 2100 58
Figure 3.3	Exemple de visualisation des tronçons de l'atlas hydroclimatique. Tiré de l' <i>Atlas hydroclimatique du Québec méridional</i> (MELCCFP, 2025) .. 61
Figure 3.4	Visualisation des Bassins hydrographiques multiéchelles du Québec avec les tronçons de l'AHQM 62
Figure 3.5	Exemple de fusion entre la carte des bassins versants et l'AHQM pour la variable Q1MAX100HP 64

Figure 3.6	Exemple de fusion entre la carte du découpage administratif et l’AHQM pour la variable Q1MAX100HP 66
Figure 3.7	Visualisation de la carte interactive pour l’indicateur de baisse des cours d’eau (étiage estival) - Q7MIN10EA 68
Figure 4.1	Graphique présentant l’estimation du niveau de connaissance de la population sur les changements climatiques et la résilience 78
Figure 4.2	Graphique présentant quels aléas climatiques ont été vécus par la population et lesquels sont les plus inquiétants 79
Figure 4.3	Graphique présentant la réponse face à la question : Pensez-vous que votre région est particulièrement vulnérable aux changements climatiques ? 80
Figure 4.4	Niveau de menace climatique à court terme perçu par les Québécoises et les Québécois. Tiré de Champagne St-Arnaud, Labonté, Olivier & Vincent (2024) 81
Figure 4.5	Graphique présentant quelles actions individuelles ont été entreprises pour réduire l’impact environnemental de la population 82
Figure 4.6	Graphique présentant le type de mesure que la population serait prête à mettre en place sur sa propriété 83
Figure 4.7	Graphique présentant les informations souhaitées sur le fiches de mesures d’adaptation 84
Figure 4.8	Synthèse des modélisations de l’outil 86
Figure 4.9	Sélection de l’aléa climatique dans l’outil 87
Figure 4.10	Sélection du type de données et de l’indicateur dans l’outil 88
Figure 4.11	Visualisation de l’indicateur de <i>précipitations maximales en une journée l’été</i> pour l’aléa <i>pluies abondantes</i> 89
Figure 4.12	Sélection des paramètres supplémentaires dans l’outil 90
Figure 4.13	Visualisation des <i>cuvettes de rétention</i> pour l’aléa <i>pluies abondantes</i> dans l’outil 91
Figure 4.14	Affichage du rapport personnalisé montrant les différents aléas 92

Figure 4.15	Rapport personnalisé montrant le détail de l'aléa <i>hausse des températures</i> et un exemple d'infographie 94
Figure 4.16	Affichage des solutions dans le rapport personnalisé 95
Figure 4.17	Présentation de la première version de l'outil réalisée dans Figma pour le volet visualisation des données climatiques 100
Figure 4.18	Présentation de la première version de l'outil dans Figma pour le volet rapport personnalisé 100
Figure 4.19	Plateforme administrative de l'outil 104
Figure 4.20	Exemple de rapport personnalisé avec les valeurs des indicateurs en rouge 108
Figure 4.21	Exemple de mailles fusionnées pour la carte de vulnérabilités aux sécheresses 109
Figure 4.22	Exemple de découpage de la carte de projections climatiques extraite de <i>Portraits climatiques</i> . La carte montre les événements de gel-dégel annuels, selon le scénario climatique SSP3-7.0 et un horizon temporel de 2070 à 2100 110

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ADT	Augmentation de la température
AHQM	Atlas hydroclimatique du Québec méridional
BTER	Bureau de la transition écologique et de la résilience
C	Crues
CE	Chaleur extrême
CMIP	Projet d'intercomparaison de modèles couplés
CMIP6	Sixième phase du Projet d'intercomparaison de modèles couplés
CRIM	Centre de recherche informatique de Montréal
DECK	Expériences de diagnostic, d'évaluation et de caractérisation de Klima
ECCC	Environnement et Changement Climatique Canada
ÉTS	École de Technologie Supérieure
FE	Froid extrême
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat
ICLEI	Conseil international pour les initiatives écologiques locales
INSPQ	Institut national de santé publique du Québec
MELCCFP	Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs
MGC	Modèles climatiques globaux
MRC	Modèles climatiques régionaux
ONU	Organisation des nations unies
PA	Pluies abondantes
PAVICS	Pôle d'analyse et de visualisation de l'information climatique et scientifique
PCM	Projets d'intercomparaison de modèles
PIB	Produit intérieur brut
PMRC	Programme mondial de recherche sur le climat

RCP	Representative Concentration Pathways (Profils représentatifs d'évolution de concentration)
S	Sécheresses
SSP	Shared Socioeconomic Pathways (Profils socioéconomiques partagés)
SHP	Shapefile
TD	Tempêtes destructrices
VDM	Ville de Montréal
QGIS	Quantum Geographic Information System

INTRODUCTION

Les changements climatiques représentent l'un des plus grands défis du 21^e siècle, tant par l'ampleur de leurs impacts que par la complexité des réponses nécessaires pour s'y adapter. Partout dans le monde, les transformations du climat se manifestent déjà par des hausses de température, des perturbations des cycles hydrologiques, des événements météorologiques extrêmes plus fréquents et une pression accrue sur les infrastructures, les écosystèmes et les communautés. Le Canada n'y échappe pas : d'après le rapport de synthèse *Le Canada dans un climat en changement* (Lulham, Warren, Walsh & Szwarc, 2023), le pays se réchauffe à un rythme environ deux fois plus rapide que la moyenne mondiale, entraînant une intensification marquée des vagues de chaleur, des feux de forêt, des précipitations extrêmes, des inondations et des sécheresses. Ces transformations touchent l'ensemble des secteurs socioéconomiques et mettent en lumière la vulnérabilité croissante de la population québécoise et canadienne.

C'est dans ce contexte que vient s'inscrire le projet de développement d'une carte interactive présentant les impacts des changements climatiques à travers divers indicateurs et des mesures de résilience pour un emplacement choisi. La carte vise tout d'abord la sensibilisation de la population québécoise aux impacts croissants des changements climatiques et encourage la mise en place de mesures d'adaptation. L'outil cherche à combler le manque d'information accessible au grand public afin d'aider à comprendre les concepts de changements climatiques et de résilience, tout en proposant des mesures d'adaptation pour les infrastructures et l'environnement bâti.

La carte a été élaborée à partir des recommandations de divers organismes gouvernementaux et internationaux, notamment : les rapports du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) et du consortium Ouranos pour les prévisions et les modélisations climatiques, ainsi que l'Organisation des Nations Unies (ONU) et l'Institut national de santé publique du Québec (INSPQ) pour la communication sur les enjeux climatiques.

Le projet a débuté en août 2023 et regroupe les travaux de deux étudiants à la maîtrise recherche : Jean-Cédric Faucher, maîtrise en génie, concentration personnalisée et Marianne Lipp, maîtrise en énergies renouvelables et efficacité énergétique. Les deux projets de recherche sont supervisés par Annie Levasseur. Une maîtrise projet en génie logiciel, menée par Paul Caillier et supervisée par Ghizlane El Boussaid, a également participé au développement de l'outil dans tout ce qui a trait à la création de la plateforme web hébergeant la carte interactive. Le présent mémoire se concentre principalement sur l'aspect collecte et création de la base de données de projections climatiques et les données de vulnérabilité ainsi que le volet communication de l'information. Le mémoire de Marianne Lipp se focalisera sur l'aspect résilience climatique et l'utilisation des données de projection pour la création d'un rapport personnalisé à l'utilisateur.

CHAPITRE 1

CONTEXTE ET OBJECTIFS

Ce chapitre présente le contexte actuel des changements climatiques au Québec et l'importance d'avoir un outil de sensibilisation à la population et présente ensuite les objectifs du projet.

1.1 Contexte

Au Québec, les impacts des changements climatiques sont déjà bien visibles et devraient s'accroître dans les prochaines décennies (Ouranos, s.d.c). Les données d'Environnement et Changement climatique Canada montrent une hausse généralisée des températures depuis le milieu du 20^e siècle, accompagnée d'un accroissement de la variabilité climatique et de la fréquence des aléas extrêmes (Environnement et Changement climatique Canada, 2023). Les vagues de chaleur prolongées, les pluies intenses provoquant des inondations urbaines, les sécheresses estivales, les tempêtes hivernales violentes et les feux de forêt comme ceux observés en 2023 affectent directement la sécurité des citoyens, la santé publique, l'intégrité des bâtiments et des infrastructures, ainsi que les services essentiels (Arsenault, 2023). Dans les milieux urbains densément construits, ces événements nourrissent des enjeux préexistants comme les îlots de chaleur, les problèmes de drainage ou la vétusté de certains réseaux. Dans les milieux ruraux et nordiques, la dégradation des sols, la hausse du niveau des cours d'eau et la dépendance à des infrastructures plus isolées amplifient la vulnérabilité.

Face à ces constats, la notion de résilience climatique s'impose comme un concept clé pour orienter les stratégies d'adaptation dans la province. La résilience renvoie à la capacité des individus, des communautés et des systèmes à anticiper, absorber, s'adapter et se remettre des perturbations climatiques (Environnement et du Changement climatique Canada, 2023). Elle implique une vision intégrée qui tient compte des dimensions sociales, physiques, environnementales et institutionnelles du territoire.

Au Québec, plusieurs initiatives témoignent d'un mouvement croissant vers une adaptation proactive : projets de verdissement urbain, parcs-éponge, plans municipaux d'adaptation,

cartographie des zones à risque, programmes de résilience communautaire, et plateformes de données climatiques telles que Portraits climatiques ou l'Atlas hydroclimatique. Toutefois, malgré ces avancées, les efforts demeurent inégaux et souvent difficiles d'accès pour le grand public. Une part significative de la population n'est pas en mesure de déterminer avec précision les risques climatiques qui affectent son lieu de résidence, ni quelles mesures d'adaptation pourraient réduire cette vulnérabilité. Le rapport de synthèse *Le Canada dans un climat en changement* (Lulham *et al.*, 2023) insiste d'ailleurs sur l'importance de développer des outils de visualisation intuitifs et accessibles afin de rendre l'information scientifique compréhensible et utile pour les citoyens et pour les décideurs locaux.

C'est dans ce contexte que s'inscrit le présent mémoire. L'objectif est de concevoir et de développer une carte interactive destinée à la population québécoise, permettant d'identifier facilement les aléas climatiques les plus critiques à un emplacement donné et de proposer des solutions d'adaptation adaptées au contexte du bâtiment ou des infrastructures. En rendant les données climatiques plus accessibles, plus visuelles et plus proches de l'expérience quotidienne des citoyens, cette initiative vise à réduire l'écart entre la science et l'action, et à contribuer à une adaptation plus proactive, équitable et informée des collectivités québécoises.

1.2 Objectifs du projet

L'outil propose trois grandes fonctionnalités : la visualisation d'indicateurs climatiques sous forme de cartes, la génération d'un rapport personnalisé par emplacement avec un score attribué à chaque aléa, et la suggestion de mesures d'adaptation. Le premier volet sera traité dans ce mémoire tandis que le volet sur le rapport personnalisé et les mesures d'adaptation sera présenté dans le mémoire de Marianne Lipp. Les sections suivantes décrivent les objectifs du projet global puis les objectifs plus spécifiques au mémoire.

1.2.1 Objectifs du projet global

Comme indiqué à la section 1.1, l'objectif principal du projet consiste à développer une carte interactive conçue pour la population québécoise. Cette carte vise à illustrer les impacts des changements climatiques à l'aide de différents indicateurs, tout en proposant des stratégies d'adaptation pour une localisation spécifique. L'outil vise à sensibiliser la population aux enjeux climatiques grandissants en offrant la possibilité de visualiser facilement le climat changeant tout en proposant une boîte à outils de solutions pour adapter les infrastructures et l'environnement bâti au Québec. Il s'impose également comme un outil de communication et de mobilisation auprès de la population québécoise en regroupant les analyses et données disponibles actuellement dans une seule plateforme.

Un objectif secondaire est établi pour la conception de la plateforme, qui vise à intégrer des concepts d'informatique durable. Le projet sera conçu de façon à réduire la consommation énergétique de la plateforme afin de réduire l'empreinte environnementale globale de l'outil. Dans une société caractérisée par une croissance significative et marquante de la consommation de données stockées sur des serveurs, il est impératif d'envisager des mesures visant à atténuer l'empreinte environnementale du numérique, spécialement pour la conception d'un outil de sensibilisation aux enjeux climatiques.

1.2.2 Objectifs spécifiques au mémoire

L'objectif principal du mémoire est de créer la base de données des cartes qui serviront à visualiser les indicateurs de projections climatiques et de vulnérabilité dans l'outil en développement. Il s'agit de faire une revue des différentes plateformes de modélisation climatique existantes au Québec et au Canada, et d'en extraire les données nécessaires à la modélisation de la plateforme interactive. Certaines cartes nécessiteront des ajustements et des modifications afin de les rendre utilisables dans l'application.

1.2.3 Retombées du projet

L'outil, visant à faciliter l'accès à l'information pour la population québécoise, permet de prendre conscience de l'impact des changements climatiques dans la province et propose une boîte à outils essentielle pour s'adapter face à ces enjeux. En plus de proposer des actions concrètes, la plateforme encourage l'engagement collectif afin d'avoir un impact positif sur la société. Cela contribuera à l'établissement d'une collectivité plus résiliente et facilitera la transition vers une société plus durable, en favorisant l'accroissement de la biodiversité et en renforçant les écosystèmes.

À long terme, l'outil pourra servir d'aide à la décision pour les municipalités en incitant à investir dans des infrastructures plus résilientes, permettant ainsi d'éviter d'énormes coûts associés aux dommages causés par les changements climatiques au Québec.

CHAPITRE 2

REVUE DE LITTÉRATURE

Ce chapitre présente une revue des concepts actuels sur les changements climatiques et la résilience climatique ainsi qu'un aperçu des différents outils existants qui permettent d'orienter les choix de conception pour la plateforme. La revue débute par un état actuel et futur des changements climatiques, suivi par une description des concepts de résilience climatique et se termine par une comparaison de projets existants qui serviront de base pour établir des critères de fonctionnalité de l'outil en développement.

2.1 Changements climatiques

Cette section présente l'état actuel ainsi que l'état futur des changements climatiques au Québec et au Canada. Elle a pour but de montrer où se dirige le climat dans des horizons à court, moyen et long terme.

2.1.1 Climat actuel

Les données récentes d'Environnement et Changement climatique Canada confirment une hausse marquée des températures au Québec depuis le milieu du 20^e siècle, avec des augmentations moyennes saisonnières de 1,6 °C l'été à 3,3 °C l'hiver entre 1948 et 2022 (Environnement et Changement climatique Canada, 2023). Cette tendance s'accompagne d'une intensification des phénomènes météorologiques extrêmes, tels que :

- des vagues de chaleur plus fréquentes et prolongées ;
- des précipitations extrêmes entraînant des inondations urbaines ;
- des sécheresses estivales accentuées ;
- des tempêtes hivernales plus intenses affectant le réseau électrique et le transport ;
- des feux de forêt de plus en plus dévastateurs, comme ceux de 2023, qui ont touché plusieurs régions du Québec (Arsenault, 2023).

Les aléas climatiques génèrent des coûts matériels et humains de plus en plus importants, touchant à la fois la santé publique et la sécurité des infrastructures. Les épisodes de pluies extrêmes au Québec en sont une illustration parlante : leurs conséquences dépassent largement le cadre des données hydrométéorologiques et se manifestent par des perturbations sociales, des dommages aux infrastructures, des pertes économiques ainsi que des effets sanitaires persistants. Parmi les événements récents les plus marquants, on peut citer la tempête Debby d'août 2024 ainsi que les pluies diluviennes survenues à Montréal en juillet 2025, deux épisodes dont l'ampleur met en lumière la gravité croissante des aléas hydrométéorologiques dans le contexte québécois (Benessaïeh, 2025).

2.1.2 Climat futur

Le rapport régional sur les changements climatiques au Québec confirme ces tendances et en précise les implications futures. Les projections climatiques indiquent qu'à l'horizon 2050, la température moyenne annuelle pourrait augmenter d'environ 3,5 °C sous un scénario à fortes émissions, avec des effets amplifiés dans le nord et l'est du territoire (Alberti-Dufort *et al.*, 2022). Les régimes de précipitations se modifient également : les précipitations hivernales et printanières augmentent, principalement sous forme de pluie dans le sud, tandis que l'épaisseur et la durée du manteau neigeux diminuent rapidement. À cela s'ajoute une fréquence accrue des épisodes pluvieux extrêmes, des crues plus précoces et, paradoxalement, des sécheresses estivales plus intenses dans certaines régions.

Ces changements affectent déjà de multiples secteurs : accentuation des îlots de chaleur dans les milieux urbains, érosion et submersion dans les zones côtières de l'est, instabilité du pergélisol dans le nord, et pressions croissantes sur l'agriculture, la foresterie, les infrastructures et la santé publique (Berry & Schnitter, 2022). Ces constats soulignent que les vulnérabilités québécoises sont plurielles, touchant autant les systèmes naturels, les populations que les infrastructures, et justifient la mise en place d'outils d'aide à la décision, tels que la cartographie interactive, pour cibler les zones les plus à risque et orienter les mesures d'adaptation.

2.1.3 Modélisation climatique

Les prochaines sections présenteront les différents modèles et scénarios climatiques existants ainsi que les projets de modélisation au Québec.

2.1.3.1 Modèles climatiques

Les modélisations climatiques au Québec et au Canada s'appuient principalement sur deux grandes familles de modèles, chacune jouant un rôle complémentaire dans la projection des changements climatiques : les modèles climatiques globaux (MGC) et les modèles climatiques régionaux (MRC).

Les MGC simulent le climat global en représentant les interactions entre atmosphère, océan, glace, terre et végétation. Ils effectuent la modélisation de processus à grande échelle spatiale et temporelle, typiquement de l'ordre de 200 à 300 km, représentant une résolution souvent grossière, mais assurant une couverture globale de la planète (Ouranos, s.d.b). Ils sont plus souvent utilisés à l'échelle d'un pays que d'une région. Les MRC, pour leur part, permettent de faire un « zoom » sur des régions spécifiques (par exemple l'Amérique du Nord, ou le Québec) avec une résolution plus fine, de l'ordre de 50 km ou moins (Ouranos, s.d.a). Ils sont pilotés aux frontières par des données provenant des MGC. Comme elles fournissent des sorties à résolution spatiale plus fine, cela permet de mieux capturer les variations régionales dues à la topographie, à la couverture terrestre, aux plans d'eau, etc.

Un point important mis en avant par Ouranos est l'usage de scénarios de concentration de gaz à effet de serre (GES) pour alimenter les deux types de modèles. Auparavant, les scénarios appelés en anglais « Representative Concentration Pathways » (RCP) étaient largement utilisés à la suite du 5^e rapport du GIEC (Liza Leclerc, Robert Siron, Beatriz Osorio, Hélène Côté & Travis Logan, 2015). Selon le rapport le plus récent, ce sont les scénarios appelés « Shared Socio-economic Pathways » (SSP) associés au Projet d'intercomparaison de modèles couplés (CMIP6) qui sont détaillés respectivement aux chapitres 2.1.3.3 et 2.1.3.2 et qui proviennent du sixième rapport du GIEC qui servent de base pour les projections. Ces scénarios permettent de modéliser

des trajectoires possibles d'émissions de GES selon les usages futurs, et sont essentiels pour comprendre l'étendue des futurs climatiques possibles (Ouranos, 2024).

2.1.3.2 Projet d'intercomparaison de modèles couplés

Le Projet d'intercomparaison de modèles couplés (CMIP), créé par la communauté internationale de modélisation climatique, permet d'obtenir des valeurs de projections plus solides en calculant des statistiques d'ensembles, comme des moyennes et des tendances (Gouvernement du Canada, 2023). Les ensembles proviennent de modélisations climatiques de plusieurs institutions partout dans le monde, qui produisent des modèles spécifiques à un climat ou une région en particulier, pour ne prendre que quelques exemples. Ces ensembles sont ensuite intégrés dans un cadre normalisé permettant d'évaluer systématiquement les performances des modèles, de produire des projections plus robustes via des moyennes intermodèles, et de quantifier l'incertitude et l'intervalle de confiance de ces valeurs.

La sixième phase du Projet d'intercomparaison de modèles couplés (CMIP6), coordonnée par le Programme mondial de recherche sur le climat (PMRC), constitue le cadre de référence international pour la modélisation du climat. Au fil du temps, l'augmentation du nombre et de la complexité des modèles climatiques a conduit à structurer le CMIP6 en un ensemble intégré de projets d'intercomparaison de modèles (PCM). Les PCM servent à comparer et à mettre à l'essai différents modèles climatiques en établissant un plan expérimental incluant des éléments précis tels que les processus physiques du système climatique et la réponse du système climatique comme l'augmentation des GES.

Le CMIP6 comprend 23 PCM individuels inclus dans un ensemble appelé ScenarioMIP (Scenario Model Intercomparison Project), qui coordonne les simulations futures des changements climatiques à partir d'environ 30 modèles climatiques mondiaux (O'Neill *et al.*, 2016). Les différents scénarios issus de cet ensemble, montrés à la figure 2.1 et expliqués à la section 2.1.3.3, servent à définir les différentes routes de projections climatiques possibles. En parallèle, un

ensemble d'expériences de diagnostic, d'évaluation et de caractérisation de Klima¹ (DECK) constitue la base du programme et inclut des simulations historiques, de 1850 à 2014, permettant d'évaluer la capacité des modèles à reproduire le climat passé (Eyring *et al.*, 2016). Les expériences DECK sont donc obligatoires pour tout PCM voulant être inclus dans le CMIP, assurant ainsi la cohérence et la comparabilité des résultats entre modèles et entre institutions.

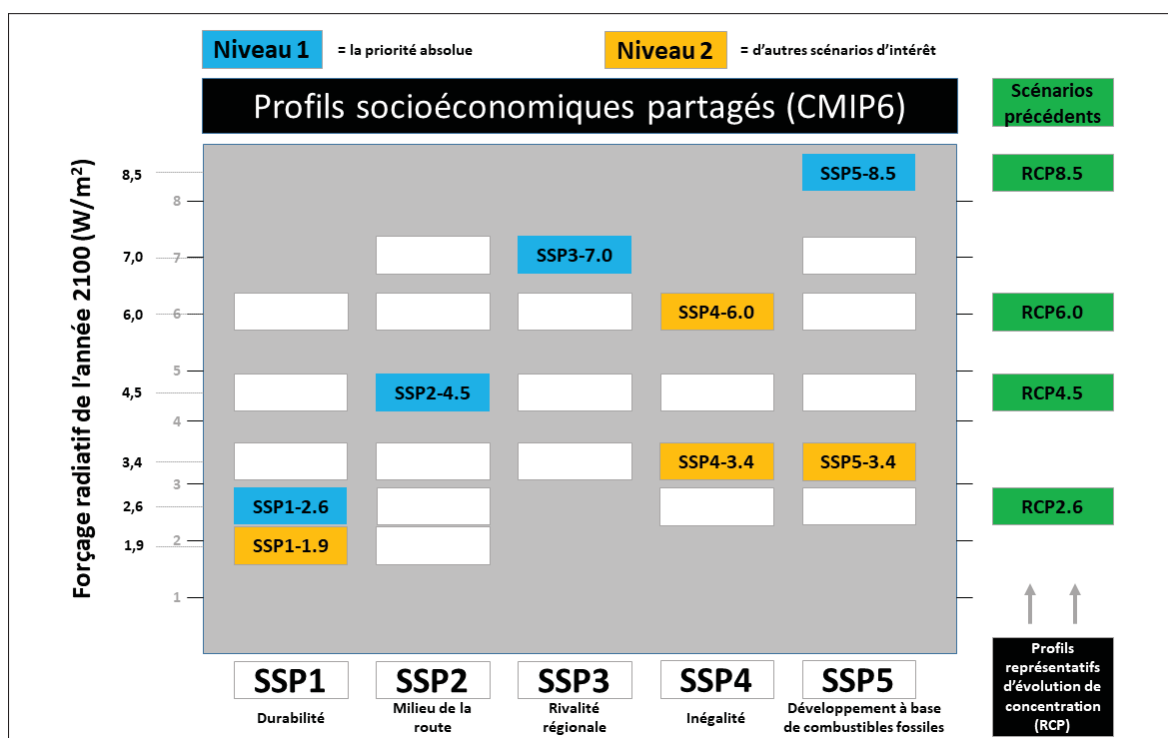


Figure 2.1 Combinaisons de voies socioéconomiques partagées et de forçage radiatif de l'année 2100. Tiré de Gouvernement du Canada (2023)

2.1.3.3 Scénarios climatiques établis par le GIEC

Les changements climatiques représentent un défi mondial sans précédent, dont les impacts touchent l'ensemble des sociétés et des écosystèmes. Pour orienter l'action et les politiques, le GIEC élabore des évaluations scientifiques qui servent de référence internationale. Dans ce cadre, les Shared Socio-economic Pathways (SSP) ont été développés afin de proposer différents

¹Klima : Mot grec pour « climat »

scénarios plausibles de l'évolution socio-économique mondiale au 21^e siècle. Ces trajectoires servent de base pour analyser les risques climatiques, explorer les options d'adaptation et d'atténuation, et soutenir la prise de décision éclairée à l'échelle internationale comme nationale.

Les trajectoires communes d'évolution socio-économiques (SSP) proposent cinq scénarios plausibles pour le 21^e siècle, utilisés en combinaison avec les scénarios climatiques pour explorer les futurs possibles. Chaque SSP repose sur un récit qualitatif (histoire du développement sociétal) et sur des projections quantitatives de facteurs clés tels que la population, le produit intérieur brut (PIB) ou l'urbanisation. Les SSP ne tiennent pas compte directement des impacts climatiques, ni de nouvelles politiques climatiques, mais ils permettent d'évaluer comment les conditions socio-économiques peuvent influencer les capacités d'atténuation et d'adaptation (Deliang Chen *et al.*, 2023).

Les SSP sont séparées en cinq catégories permettant de suivre une certaine ligne directrice de fonctionnement pour la société. Les catégories sont :

- SSP1 : Correspond à un futur axé sur la durabilité et la coopération internationale
- SSP2 : Illustre une trajectoire intermédiaire et tendancielle
- SSP3 : Met en avant des rivalités régionales et une faible coopération
- SSP4 : Décrit un monde marqué par de fortes inégalités sociales et économiques
- SSP5 : Suppose une croissance rapide reposant largement sur l'usage des énergies fossiles

Ces scénarios offrent ainsi un cadre structuré pour analyser les impacts climatiques et la résilience des territoires, en tenant compte non seulement des conditions physiques du climat, mais aussi de l'évolution socio-économique des sociétés.

Les scénarios de projection SSP démontrent que les niveaux de forçage radiatif² mondial peuvent résulter de multiples combinaisons d'émissions de CO₂, de gaz à effet de serre non CO₂, d'aérosols et de changements d'utilisation des terres. Ce cadre établit ainsi une matrice reliant différents niveaux de forçage global à des trajectoires socio-économiques distinctes. O'Neill *et al.* (2016) identifient quatre scénarios de référence à utiliser, représentant respectivement une voie de développement durable (SSP1-2.6), une trajectoire intermédiaire (SSP2-4.5), un monde marqué par les rivalités régionales (SSP3-7.0) et un avenir à forte dépendance aux énergies fossiles (SSP5-8.5) (June-Yi Lee *et al.*, 2023). Ces combinaisons servent de base aux exercices de modélisation climatique afin d'explorer la diversité des futurs possibles et leurs implications pour l'atténuation et l'adaptation aux changements climatiques.

La figure 2.1 présente une matrice des différentes combinaisons possibles entre le forçage radiatif et les scénarios SSP mentionnés précédemment. Elle permet de visualiser les scénarios prioritaires et certains scénarios pouvant être d'intérêt pour certaines études, tels que le SSP1-1.9, le scénario qui reflète le plus fidèlement l'objectif du 1,5 °C de l'accord de Paris (Meinshausen *et al.*, 2020) et le SSP4-6.0 qui peut être utilisé pour diverses applications.

En observant la figure de plus près, on peut aussi y apercevoir une colonne présentant les *scénarios précédents*, qui représentent l'ancienne méthodologie de projections climatiques établie par le GIEC dans son 5^e rapport, soit les profils représentatifs d'évolution de concentration (RCP). Ces profils sont influencés par des facteurs tels que la taille de la population, l'activité économique, la consommation, la technologie et même la politique climatique. Tout comme les SSP, les RCP sont présentés sous différentes trajectoires afin d'obtenir plusieurs scénarios plausibles de trajectoire du climat. Les quatre scénarios élaborés par le GIEC sont le RCP2.6, qui représente une voie avec forte atténuation des GES, deux scénarios intermédiaires avec le RCP4.5 et le RCP6.0 et un profil avec des émissions des GES très élevées avec un RCP8.5 (GIEC,

²« Le forçage radiatif est la mesure de l'influence que possède tel ou tel facteur dans l'altération de l'équilibre des énergies entrantes et sortantes dans le système atmosphère / Terre et constitue un indice de l'importance du facteur donné en tant que mécanisme potentiel de modification du climat. Le forçage positif tend à chauffer la surface tandis que le forçage négatif tend à la refroidir. » (Solomon *et al.*, 2007) Le forçage radiatif est exprimé en watts par mètre carré (W/m²)

2015). L'ensemble de ces scénarios forme la cinquième phase du Projet d'intercomparaison de modèles couplés ou la CMIP5.

La figure 2.1 permet de lier chacun des profils RCP à son profil respectif dans les nouveaux scénarios élaborés avec le CMIP6 en fonction de leur niveau de forçage radiatif.

2.2 Résilience climatique

Face à l'intensification des aléas climatiques et à l'augmentation de la vulnérabilité des milieux bâtis, la résilience climatique s'impose comme un concept central des stratégies d'adaptation. Le chapitre 18 du sixième rapport du GIEC s'intéresse aux trajectoires de développement résilientes au climat (CRDP) et les définit comme des trajectoires de développement qui intègrent avec succès les efforts d'atténuation, ou réduction des émissions de gaz à effet de serre, d'adaptation aux effets du climat et de développement durable (GIEC, 2023).

2.2.1 Définition

La ville de Montréal (VDM) définit la résilience climatique, ou l'adaptation aux changements climatiques, comme « un processus par lequel une communauté et les écosystèmes qui la composent s'ajustent et se préparent à ces derniers afin d'en limiter les conséquences négatives, et d'en tirer les bénéfices potentiels » (Ville de Montréal, 2020). Elle établit toutefois une différence entre la résilience urbaine et l'adaptation aux changements climatiques, en décrivant la résilience comme la capacité d'une communauté, d'une personne ou même d'une institution à « résister, s'adapter et se développer » (Ville de Montréal, 2020), et ce, pour n'importe quel type d'impact, que ce soit au niveau environnemental, social, économique, sanitaire ou autre. L'adaptation, quant à elle, permet à une communauté et à ses écosystèmes de s'ajuster et de se préparer aux effets négatifs des enjeux climatiques pour limiter les conséquences de ceux-ci.

La figure 2.2, élaborée par le MELCCFP et Ouranos, illustre la complémentarité entre l'atténuation, ou la réduction de l'impact environnemental responsable des changements climatiques, et l'adaptation. Elle démontre l'importance d'utiliser des stratégies de réduction

des émissions de GES avec des mesures d'adaptation qui permettront de « générer des avantages nets dans la lutte contre les changements climatiques et d'en minimiser les coûts » (Ouranos & MELCCFP, 2024).

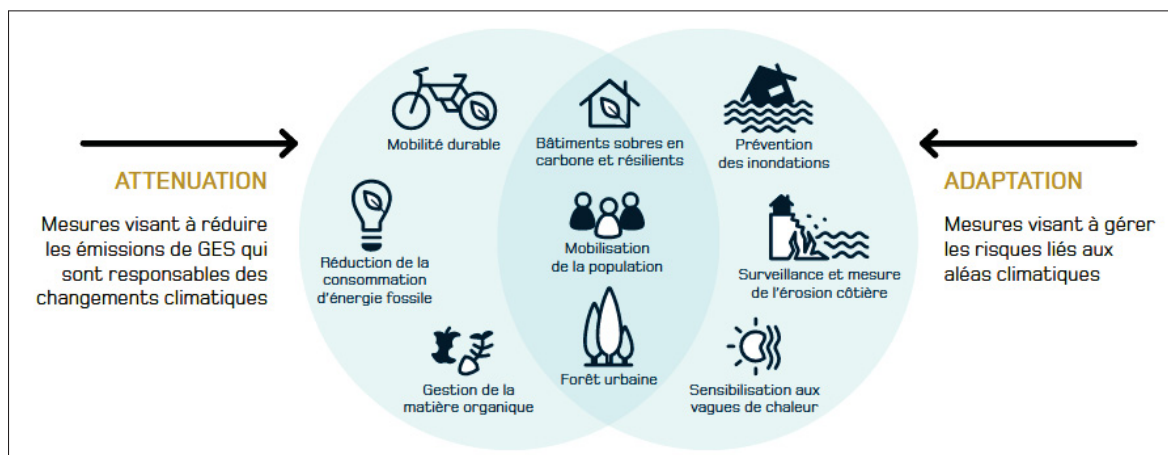


Figure 2.2 Complémentarité entre atténuation et adaptation. Tiré de Ouranos & MELCCFP (2024)

2.2.2 Exemple de projet de résilience

Dans la section suivante, quelques exemples de projets de résilience climatique seront présentés. Ces exemples permettront de mettre en contexte des solutions concrètes qui peuvent être implémentées, autant au niveau individuel que collectif.

2.2.2.1 Exercice Paris à 50°C

La Ville de Paris a organisé en octobre 2023 un exercice de crise inédit, appelé Paris à 50 °C, simulant un « dôme de chaleur » extrême sur la capitale (Ville de Paris, 2023). L'objectif était de tester les capacités de résilience de la ville (institutions, infrastructures, population) face à un épisode caniculaire de forte intensité, tout en mobilisant les acteurs locaux et les habitants. Ce scénario s'appuie sur des projections climatiques réalisées par le groupe régional d'expertise sur le changement climatique en Ile-de-France (ou le GREC francilien), qui estiment que des

valeurs extrêmes de température pourraient devenir possibles à Paris au 21^e siècle, surtout dans un avenir court à long terme si les émissions ne sont pas contenues.

L'étude a permis d'observer et de quantifier la vulnérabilité de la ville et d'établir un plan d'action pour l'adaptation aux changements climatiques de la ville de Paris. Elle a démontré, entre autres, que le système urbain parisien est fortement dépendant d'infrastructures qui ne sont pas conçues pour des températures extrêmes et que les « effets dominos » constituent un défi majeur pour la ville. L'exercice a également montré que les ressources humaines, notamment les personnels de terrain et de secours, sont directement exposées aux contraintes climatiques que peut apporter le dôme de chaleur, ce qui limite leur efficacité alors que la demande de services est la plus élevée.

L'exercice a permis de bonifier la stratégie « Paris s'adapte » pour mettre l'accent sur l'ajout de végétalisation, l'éclaircissement des revêtements, l'augmentation de l'accès à l'eau dans la ville et le déploiement de mobiliers destinés à ajouter de l'ombre aux Parisiens. La ville de Paris a aussi décidé de créer une trousse méthodologique pour permettre aux villes et territoires intéressés à lancer ce type de projet à l'interne de le faire avec une méthodologie déjà établie (Ville de Paris, 2024).

2.2.2.2 Plan climat 2020-2030 de la Ville de Montréal

Le plan climat 2020-2030 a été établi afin d'outiller la VDM pour atteindre la carboneutralité d'ici 2050. Le plan a pour but d'établir la feuille de route afin d'atteindre une réduction des émissions de GES de la ville de 55% en 2030 par rapport à 1990, alors que les émissions sont réduites de 30% en 2020. Le plan mentionne aussi la mise en place de mesures d'adaptation et de résilience aux changements climatiques et aux perturbations environnementales pour la collectivité (Ville de Montréal, 2020). Le plan climat contient cinq chantiers d'interventions regroupant 46 actions à mettre en œuvre d'ici 2030 afin de réduire les émissions de GES et d'augmenter la résilience de la ville. Parmi ces actions, 16 d'entre elles ont été désignées comme

actions phares, c'est-à-dire qu'elles auront un grand impact sur la mobilisation de la population à agir dans la transition écologique.

Le premier chantier a pour but la mobilisation de la communauté montréalaise pour la transition. Il prévoit des actions comme l'incitation à l'adoption de pratiques écoresponsables (mobilité active, autopartage, zéro déchet, etc.), l'élaboration des lignes directrices pour l'encadrement et le suivi des écoquartiers, la promotion de l'économie circulaire, la réduction du gaspillage alimentaire et toutes sortes d'autres actions qui auront un impact positif sur le comportement de la communauté.

Le deuxième chantier est axé sur la mobilité, l'urbanisme et l'aménagement. Il vise à favoriser le transport collectif, à augmenter le nombre de véhicules électriques au centre-ville, à électrifier les transports pour réduire les émissions de GES du secteur routier. Il inclut aussi plusieurs actions qui ciblent la mise en place d'espaces végétalisés en augmentant la superficie des parcs et des zones plus vulnérables aux vagues de chaleur.

Le troisième chantier vise le secteur du bâtiment. La cible principale est d'améliorer la performance énergétique des bâtiments, que ce soit par la rénovation, le virage vers des énergies moins carbonées ou un soutien pour la construction durable de nouveaux bâtiments.

Le quatrième chantier met en valeur l'exemplarité de la ville. Les deux actions phares visent à réduire à zéro l'empreinte carbone du côté municipal, autant pour le parc immobilier de la ville que pour son personnel.

Le dernier chantier, la gouvernance, vise à réduire l'impact des émissions de GES pour l'ensemble des décisions municipales et à renforcer celles en lien avec l'adaptation aux changements climatiques. Il vise aussi à axer une partie du budget municipal pour la transition écologique.

2.2.2.3 Mesures de résilience à plus petite échelle

À plus petite échelle, beaucoup de mesures de résilience existent et permettent aux citoyens et citoyennes d'adapter leur bâtiment ou infrastructure aux changements climatiques. Ces mesures peuvent être mises en œuvre aussi bien au niveau individuel qu'au niveau collectif, contribuant ainsi à promouvoir la transition écologique de la société.

Échelle individuelle

À l'échelle individuelle, plusieurs mesures peuvent être appliquées afin de réduire les impacts des changements climatiques chez soi. En voici quelques exemples, catégorisés par aléa climatique :

- **Chaleur extrême** : installation de volets, murs végétalisés, amélioration de l'isolation, climatisation naturelle ; (INSPQ, 2025).
- **Pluies abondantes** : déconnexion des gouttières, utilisation de barils de récupération d'eau de pluie, pavés perméables, toit végétalisé ;
- **Crues et inondations** : installation d'un clapet antiretour, surélévation des biens entreposés au sous-sol
- **Froid extrême** : amélioration de l'isolation des murs, de la toiture et des fenêtres

Échelle municipale

Au même titre qu'au niveau individuel, les mesures à l'échelle municipale permettent de réduire les impacts des changements climatiques dans la ville, permettent ainsi une résilience accrue de la société. Les exemples ci-dessous, classés par aléa climatique, illustrent quelques mesures de résilience qui peuvent être mises en place à l'échelle d'une ville, autant dans ses infrastructures que pour ses bâtiments.

- **Pluies abondantes** : mise en place de parcs-éponges, bassins de rétention, surfaces perméables, jardin de pluie ;

- **Chaleur extrême** : plantation d'arbres, toitures végétalisées, bâtiments climatisés accessibles au public, mur végétalisé sur infrastructures routières ;
- **Froid extrême** : Installation de matériaux avec grande inertie comme le béton ou la brique, système géothermique, thermopompe ;

2.3 Sources de données climatiques

Cette section présente les différentes plateformes existantes au Québec permettant de visualiser et de télécharger des données de projection et de vulnérabilité climatiques et pour la province.

2.3.1 Outils utilisant les données d'Ouranos

Le consortium de scientifiques Ouranos, un leader au Québec et même au Canada en termes de projections climatiques, a élaboré et participé à plusieurs plateformes permettant de visualiser le climat futur, autant dans la province qu'au pays. Trois outils sont mis à la disposition afin de visualiser les changements climatiques, soit l'Atlas climatique du Canada (section 2.3.1.1), Portraits climatiques (section 2.3.1.2 et Données climatiques (section 2.3.1.3). En plus de ces plateformes, toutes les données utilisées pour les trois cartes sont conservées dans une base de données, gérée par un outil nommé PAVICS (section 2.3.1.4).

2.3.1.1 Atlas climatique du Canada

L'Atlas climatique du Canada, développé par le Centre climatique des Prairies de l'Université de Winnipeg, est un outil interactif permettant de visualiser des projections climatiques partout au Canada. Il regroupe les résultats de 38 indicateurs répartis en cinq catégories, soit temps chaud, temps froid, température, précipitation et saison de croissance. Les données sont issues des modèles climatiques du CMIP5 (voir section 2.1.3.3 pour plus de détails) et sont représentées selon deux scénarios de changements climatiques, soit le « moins sévère » basé sur le RCP4.5 et le « plus grave » basé sur le RCP8.5. Les projections climatiques sont ensuite présentées sur trois

périodes de temps différentes, soit le passé récent (1976-2005), l’avenir immédiat (2021-2050) et le proche avenir (2051-2080).

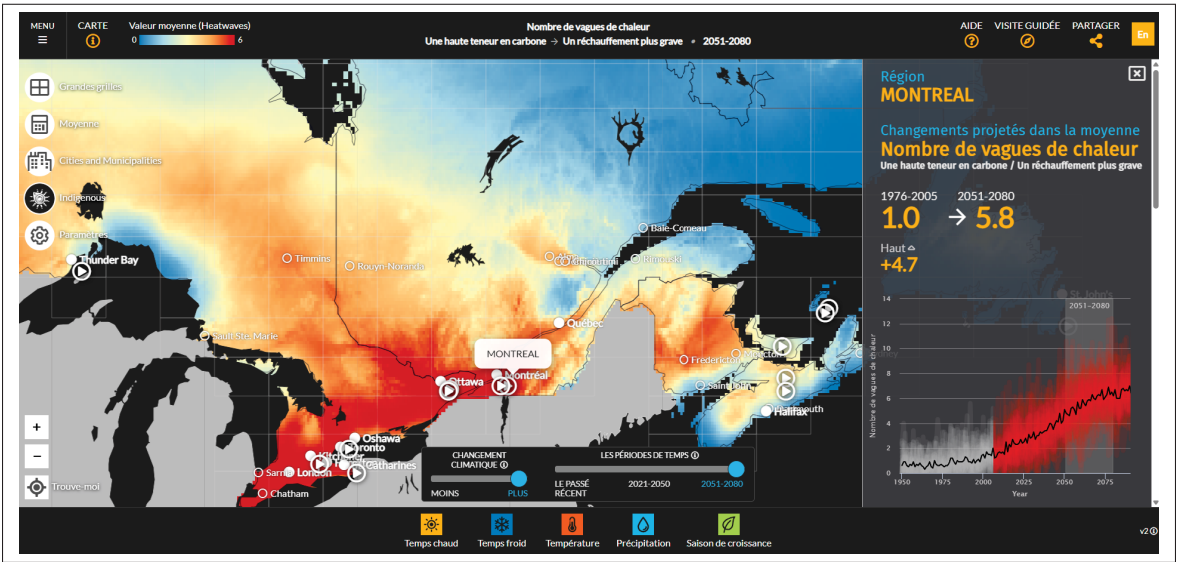


Figure 2.3 Nombre de vague de chaleur à Montréal en 2080. Tiré de Atlas climatique du Canada

Comme on peut le voir à la figure 2.3, l’outil permet aussi de voir les variables sélectionnées sous forme de graphique pour montrer l’évolution dans le temps. L’outil montre aussi la différence entre la période de référence et la période de temps choisie pour quantifier l’évolution de la variable. De plus, la plateforme propose des vidéos et des articles de vulgarisation scientifique pour la population afin d’en apprendre plus sur les changements climatiques.

Au niveau des indicateurs offerts par la plateforme, le site de l’Atlas climatique les présente par *types de variables*. Le tableau 2.1 présente les différents indicateurs classés selon leur type.

Tableau 2.1 Classification des indicateurs climatiques selon leur type de variable de la plateforme Atlas climatique du Canada

Type de variable	Indicateurs associées
Temps chaud	Les jours très chauds (+30°C) • nuits tropicales • température maximale la plus chaude • jours d'été • Degrés-jours de refroidissement • Nombre de vagues de chaleur • Durée moyenne des vagues de chaleur • Plus longue période de jours de +30 °C • Saison chaude (+30 °C) • Jours extrêmement chauds (+32 °C) • Jours extrêmement chauds (+34 °C)
Temps froid	Jours très froids (-30°C) • Cycles de gel/dégel • Jours de givre • Jours de gel • Température minimale la plus froide • Degrés-jours de chauffage • Degré-jours de gel • Jours hivernaux doux (-5 °C) • Jours d'hiver (-15 °C)
Température	Température moyenne (annuelle, saisonnière, mensuelle) • température minimale (annuelle, saisonnière, mensuelle) • température maximale (annuelle, saisonnière, mensuelle)
Précipitation	Précipitations (annuelle, saisonnière, mensuelle) • Jours de précipitations fortes (10 mm) • Jours de précipitations fortes (20 mm) • Jours de pluie • Jours secs • Précipitations maximales sur 1, 3 et 5 jour
Saison de croissance	Saison sans gel • Date du premier gel automnal • Date du dernier gel printanier • Unité thermique maïs • Degrés-jours de croissance (Base 4, 5, 10 et 15 °C) • épisodes de longue durée de pluie verglaçante • épisodes intenses de pluie verglaçante

2.3.1.2 Portraits climatiques

La plateforme Portraits climatiques présente une carte axée sur les projections climatiques au Québec. Elle permet de visualiser 28 variables de projection basées sur six aléas climatiques,

soit température, froid/gel/dégel, chaleur extrême, précipitation, pluie verglaçante et neige au sol. Les variables peuvent être projetées selon trois scénarios de climat futur basés sur les données du CMIP6, soit les scénarios modéré (SSP2-4.5), élevé (SSP3-7.0) et très élevé (SSP5-8.5). Il est aussi possible de modifier l'horizon temporel des données, en choisissant parmi plusieurs horizons d'un intervalle de 30 ans chacun entre 2010 et 2100. En plus du scénario et de l'horizon temporel, l'utilisateur peut sélectionner la période (annuelle ou saison) et le centile. Comme Ouranos le mentionne dans son *Guide de recommandations scientifiques visant à faciliter l'utilisation de projections climatiques* (Ouranos, 2024), les centiles représentent les « valeurs correspondant à un rang dans un échantillon ou une distribution statistique ». » C'est-à-dire que si on prend comme exemple la valeur du 50^e centile dans un scénario climatique, elle a une chance sur deux d'être plus élevée que ce que l'on simule. On peut donc dire que les valeurs sous le 10^e centile et au-dessus du 90^e centile sont des événements très rares. Enfin, la plateforme permet de comparer les résultats obtenus avec les moyennes historiques, qui représentent les 30 ans entre 1991 et 2020. La figure 2.4 présente un exemple de carte pouvant être obtenue, montrant ici le nombre d'événements de vague de chaleur extrême entre 2071 et 2100, selon le scénario d'émissions élevées, soit le SSP3-7.0.

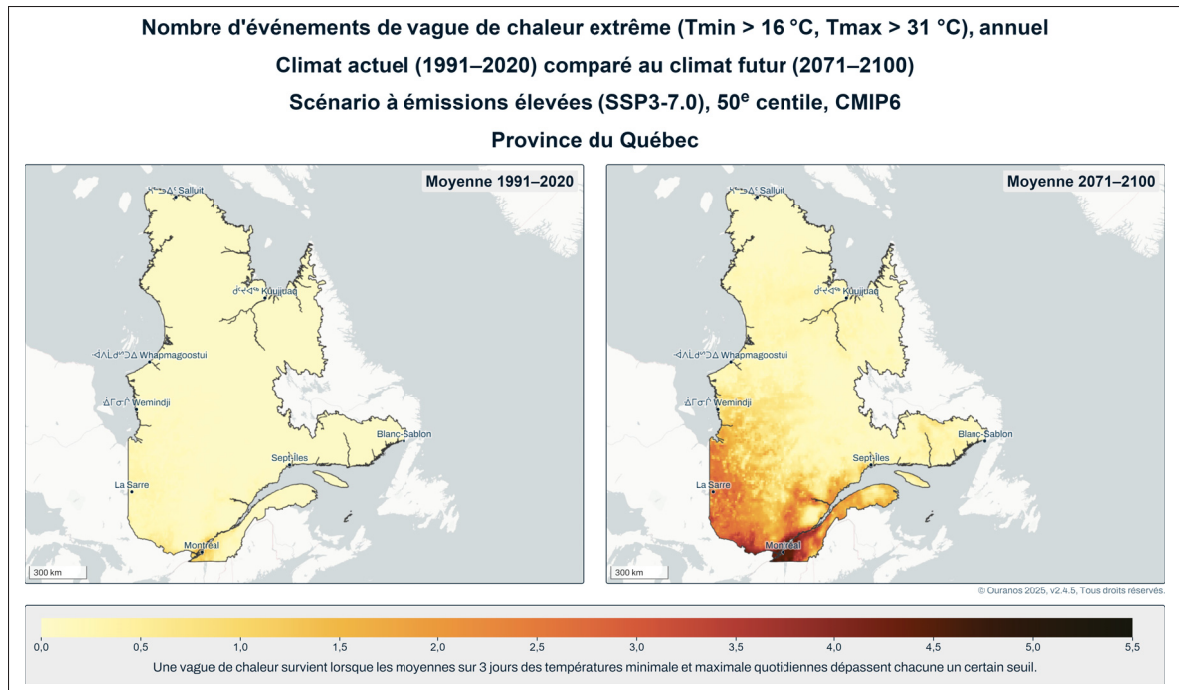


Figure 2.4 Nombre de vagues de chaleur au Québec en 2100.
Tiré de Portraits climatiques (Ouranos, 2025)

Au niveau des indicateurs offerts par la plateforme, le site de portraits climatiques les présente par *types de variables*. Le tableau 2.2 présente les différents indicateurs classés selon leur type.

Tableau 2.2 Classification des indicateurs climatiques selon leur type de variable de la plateforme Portraits climatiques

Type de variable	Indicateurs associées
Température	Température moyenne • température minimale • température maximale • degrés-jours de croissance • degrés-jours de chauffage • premier gel d'automne • degrés-jours de climatisation
Froid, gel et dégel	Évènements de gel-dégel • degrés-jours de gel • degrés-jours sans gel • saison sans gel • nombre de jours sans dégel • nombre de nuits sans gel • nombre de nuits froides • nuit la plus froide • nombre de jours de vague de froid extrême • nombre d'évènements de vague de froid extrême
Chaleur extrême	Nombre de jours chauds • nombre de nuits chaudes • jour le plus chaud • nombre de vague de chaleur extrême • nombre d'évènements de vague de chaleur extrême
Précipitation	Précipitations accumulées • nombre de jours avec précipitations • maximum des précipitations court-terme • nombre de jours sans précipitation • fréquence des séquences sèches
Pluie verglaçante	Heures de pluie verglaçante • épisodes de longue durée de pluie verglaçante • épisodes intenses de pluie verglaçante
Neige au sol ³	Maximum de neige au sol • nombre de jours sans neige au sol • saison de couvert de neige continu

2.3.1.3 Données climatiques

La troisième plateforme proposée par Ouranos est la carte de données climatiques, qui offre des projections climatiques sur tout le Canada. Le portail de données est composé de 38 variables répertoriées sous quatre catégories : Chaleur extrême, température, humide et sec et froid, gel

³Ces indicateurs ont été ajoutés dans la version 3.1 de la plateforme de Portraits climatiques, lancée à l'automne 2025. Ils sont ajoutés dans ce mémoire à titre d'information seulement mais ne font pas partie des indicateurs sélectionnés lors de la conception de la première version de la plateforme.

et dégel. Il est aussi possible de sélectionner un filtre parmi cinq secteurs d'impact distincts, soit l'agriculture, les bâtiments, la santé, les variables marines et le transport. Tout comme la carte Portraits climatiques, l'utilisateur peut choisir parmi plusieurs scénarios d'émissions SSP et une multitude de périodes temporelles. La figure 2.5 montre un visuel de la carte de Données climatiques. On peut y voir la variable sélectionnée, soit la température maximale, avec le scénario climatique SSP2-4.5 et l'horizon temporel 2041 à 2070. Contrairement à l'Atlas climatique, elle ne permet pas d'avoir de courbe de tendance et ne comporte pas de volet éducatif sur les changements climatiques. Elle permet strictement de visualiser les données offertes par la plateforme.

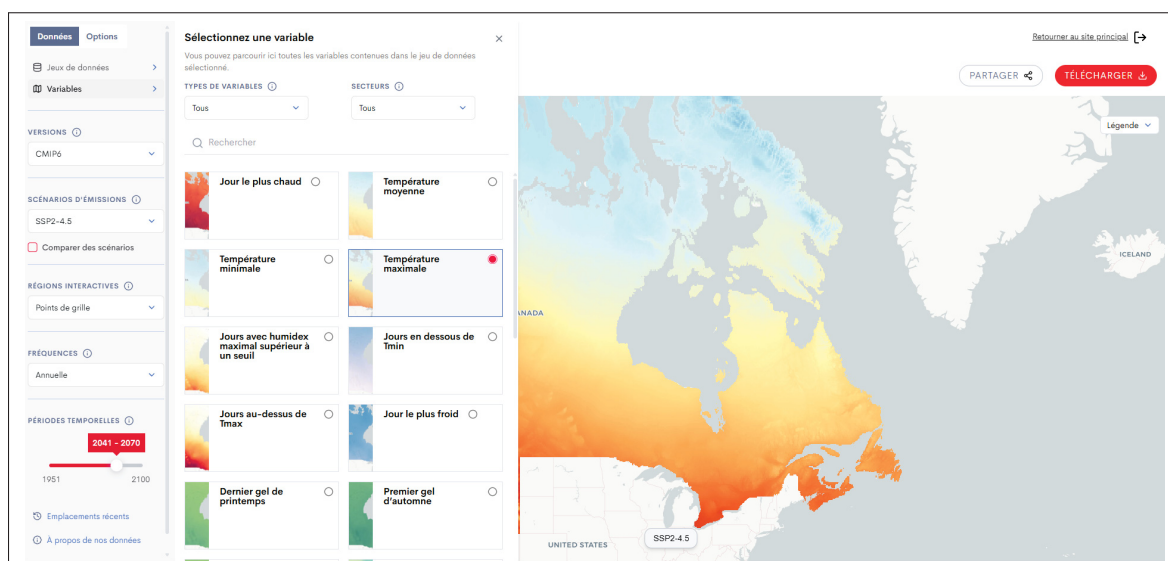


Figure 2.5 Température maximale annuelle au Québec entre 2041 et 2070, selon le scénario d'émissions SSP2-4.5.

Tiré de Données climatiques (ECCC, 2025)

Au niveau des indicateurs offerts par la plateforme, le site de données climatiques les présente par *types de variables*. Le tableau 2.3 présente les différents indicateurs classés selon leur type.

Tableau 2.3 Classification des indicateurs climatiques selon leur type de variable de la plateforme Données climatiques

Type de variable	Indicateurs associées
Chaleur extrême	Jour le plus chaud • jours avec humidex maximal supérieur à un seuil • jours au-dessus de Tmax • nuits tropicales (température minimale > seuil) • degrés-jours de climatisation
Froid, gel et dégel	Jours en dessous de Tmin • jour le plus froid • dernier gel de printemps • premier gel d'automne • saison sans gel • jours de gel • cycles de gel/dégel • degrés-jours de chauffage • jours sans dégel
Humide et sec	Jours de précipitations • précipitation totale • précipitation maximale durant 1 jour • précipitations maximales sur 5 jours • maximum de jours consécutifs secs • nombre de périodes de plus de 5 jours secs consécutifs • indice normalisé d'évapotranspiration des précipitations (3 mois) • indice normalisé d'évapotranspiration des précipitations (12 mois)
Température	Température moyenne • température minimale • température maximale • dernier gel de printemps • premier gel d'automne • saison sans gel • degrés-jours de climatisation • degrés-jours de croissance (5 °C) • degrés-jours cumulés au-dessus de 0 °C • degrés-jours de chauffage

2.3.1.4 PAVICS

Le Pôle d'analyse et de visualisation de l'information climatique et scientifique, communément appelé PAVICS, est un outil développé en collaboration entre Ouranos et le Centre de recherche informatique de Montréal (CRIM) qui permet d'accéder aux données climatiques qui fonctionnent derrière tous les outils présentés à la section 2.3.1. En effet, l'outil a été développé de façon à pouvoir accueillir un très grand nombre de données permettant de faciliter l'accès aux données

climatiques partout au Canada. PAVICS offre un environnement Python donnant accès à toutes ses bases de données pour pouvoir ensuite les manipuler de façon à obtenir des projections climatiques au Canada. Il est possible de simplement analyser les données directement dans l'interface Python ou de les télécharger depuis le serveur pour les utiliser dans une autre interface.

La plateforme propose une panoplie d'outils d'analyse de données climatiques permettant aux chercheurs de visualiser les données, de calculer des statistiques d'ensemble, calculer des indicateurs climatiques, de créer des cartes et des graphiques et de faire du découpage spatio-temporel pour obtenir des cartes à l'échelle plus locale avec une évolution des changements climatiques. Elle permet donc de manipuler les données directement sur le serveur sans avoir à télécharger des fichiers extrêmement lourds localement. Enfin, PAVICS est un outil très puissant pour la manipulation de données climatiques, mais reste une plateforme assez complexe pour les chercheurs du domaine.

2.3.2 L'atlas hydroclimatique du Québec méridional

L'Atlas hydroclimatique du Québec méridional (AHQM) est un outil cartographique interactif développé par le ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP) en collaboration avec Ouranos. Il vise à illustrer l'impact des changements climatiques sur les débits des rivières, en couvrant environ 10 000 tronçons répartis sur le sud du Québec, avec une évolution sur les horizons 2020, 2050 et 2080. L'Atlas propose plusieurs types de données pouvant être extraites, soit une carte des stations hydrométriques du Québec, le portrait des cours d'eau au Québec sur une série de valeurs temporelles de débits journaliers entre 1970 et 2022, et des indicateurs hydrologiques permettant de visualiser l'évolution des crues, des étiages et d'autres indicateurs hydrologiques (Angelica Alberti-Dufort & Raphaël Desjardins, 2022). Le tableau 2.4, tiré du Guide de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional 2022 (Angelica Alberti-Dufort & Raphaël Desjardins, 2022), présente les différents contextes d'utilisation de l'atlas.

Tableau 2.4 Contextes d’usage des outils de l’Atlas hydroclimatique.
Tiré de Angelica Alberti-Dufort & Raphaël Desjardins (2022)

Outils	Description	Utilisation
Stations hydrométriques	Informations et liens vers les données de plus de 730 stations hydrométriques, dont plus de 250 ouvertes.	Accès aux métadonnées des stations, Accès aux données historiques observées et Accès aux données en temps réel et aux prévisions, le cas échéant.
Portrait	Reconstitution de l’hydrologie historique par la combinaison des données observées et des simulations hydrologiques. Données quotidiennes avec leurs incertitudes pour 9 665 tronçons de rivières jaugés et non jaugés depuis le 1er janvier 1970.	Valeurs de débits historiques pour une période pour laquelle les données de la station n’étaient pas disponibles et Valeurs de débits historiques pour un tronçon de rivière sans station.
Indicateurs	Descripteurs statistiques du régime hydrologique (crue, étiage, etc.) sur 9 665 tronçons de rivières, pour la période historique ainsi qu’en climat futur.	Indicateurs hydrologiques pour la période historique, avec incertitude, Indicateurs projetés en climat futur, avec incertitude et Ampleur et direction du changement en climat futur.

Le présent mémoire se concentre principalement sur la partie indicateurs de l’atlas afin de récupérer des cartes et des données climatiques sur les cours d’eau au Québec. Les indicateurs hydrologiques permettent de visualiser différents aspects du régime hydrique québécois, comme les étiages en été ou les crues printanières, et proposent des cartes de données pour 76 indicateurs classés dans trois catégories : les crues, les étiages et l’hydraulicité. Le tableau 2.5 présente les différentes familles d’indicateurs avec leur période, indicateur de base, une brève description, la récurrence et le total d’indicateurs pour la famille.

Tableau 2.5 Caractérisation des types d'indicateurs.
Tiré de Angelica Alberti-Dufort & Raphaël Desjardins (2022)

Familles d'indicateurs		Période	Indicateur de base	Description	Réurrences (ans)	Nombre d'indicateur
Crues	Pointe de crue	AN, HP, EA	Q1MAX	Débit journalier maximal annuel (m3/s)	2, 5, 10, 20, 100, 350	18
		HP	JQ1MAX	Jour d'occurrence moyen du débit journalier maximal (nombre de jours depuis le premier janvier)	2	1
	Volume de crue	AN, HP	Q14MAX	Débit moyen sur 14 jours maximal annuel (m3/s)	2, 5, 10, 20, 100, 350	12
Etiages		AN, HP, EA	Q30MIN	Débit moyen sur 30 jours minimal (m3/s)	2, 5, 10	9
		AN, HP, EA	Q7MIN	Débit moyen sur 7 jours minimal (m3/s)	5, 10	6
		AN, HP, EA, mensuel			2	15
Hydraulicité		AN, HP, EA, mensuel	QMOY	Débit moyen (m3/s)	2	15
						76

Les périodes indiquées au tableau représentent : AN = Annuel ; HP = Hiver-printemps ou printanière ; EA = Été-automne ou estivale et automnale.

La figure 2.6 présente un aperçu de l'interface de l'AHQM sur leur plateforme. On peut y voir le débit journalier maximal pour les crues printanières avec une récurrence de 100 ans.

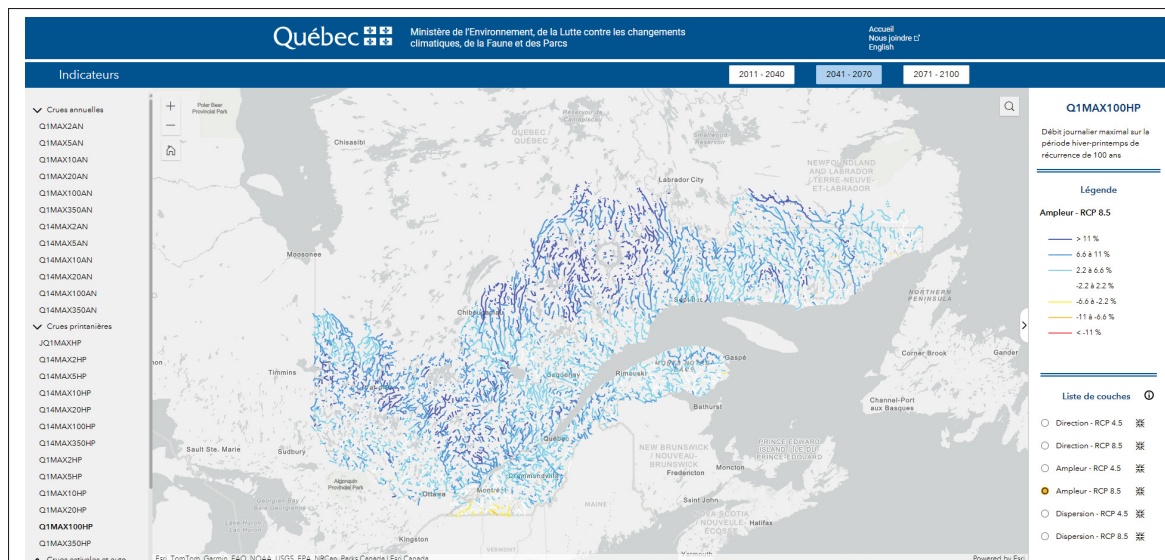


Figure 2.6 Exemple de visualisation de l'atlas hydroclimatique.
Tiré de l'*Atlas hydroclimatique du Québec méridional* (MELCCFP, 2025)

2.3.2.1 Les familles d'indicateurs

Crues

La première famille d'indicateurs, les crues, représente la montée subite du niveau d'eau d'une rivière au-dessus du niveau habituel due à un fort débit d'eau. Elle n'est pas nécessairement liée à une inondation, mais peut en provoquer une. Les indicateurs de crues de l'AHQM sont décrits par des variables composées de lettres et de chiffres qui désignent le nom de l'indicateur, la période et la récurrence afin de facilement les identifier. Les variables sont donc identifiées comme suit :

- **Q1MAX** : Réfère au débit journalier maximal pour une année. Il sera ensuite suivi de la récurrence (2, 5, 10 ans, etc.) et de la saison (hiver-printemps [HP] ou été-automne [EA]).
- **JQ1MAX** : Réfère au jour d'occurrence moyen du débit journalier maximal. Cela veut dire le jours de l'année où se déroule la pointe de crue, ou le niveau le plus haut.

- Q14MAX : Réfère au débit moyen sur 14 jours, associé aux volumes de crues. Cela permet entre autres de voir les grands volumes d'eau généralement dus à la fonte des neiges et aux fortes pluies au printemps.

Si on décide alors de sélectionner l'indicateur de *débit journalier maximal sur la saison hiver-printemps de récurrence de 10 ans*, on aura Q1MAX10HP comme variable.

Étiages

La deuxième famille d'indicateurs comporte les étiages. Ils représentent les observations de débit faibles dans les cours d'eau, liés aux périodes sans précipitations. Cela se produit en période estivale où il y a absence de pluie et la température est élevée, ce qui favorise l'évaporation. Les étiages peuvent aussi arriver en hiver, puisque les précipitations tombent sous forme de neige, ce qui ne contribue pas directement au débit des cours d'eau. L'appellation des variables est similaire aux crues et établie de cette façon :

- Q7MIN : Réfère au débit minimal moyenné sur sept jours consécutifs. Cet indicateur montre la fluctuation du débit minimal du cours d'eau et permet donc d'en voir sa sévérité.
- Q30MIN : Réfère au débit minimal moyenné sur 30 jours consécutifs. Similaire au débit sur sept jours, cet indicateur permet de voir l'étiage sur une plus grande durée plutôt que sur sa sévérité.

Lorsqu'on sélectionne par exemple l'indicateur de *débit moyen sur sept jours minimal sur la période hiver-printemps de récurrence de cinq ans*, on aura Q7MIN5HP comme variable.

Hydraulicité

La dernière famille d'indicateurs est l'hydraulicité et permet de voir la valeur moyenne de débits sur une longue durée, comme les mois, les saisons ou même les années. Elle est identifiée par la variable QMOY.

Si on prend comme exemple l'indicateur de *débit moyen sur la période été-automne*, le nom de la variable serait QMOYEA.

2.3.2.2 La récurrence des débits

La période de retour de l'évènement hydrologique, ou récurrence, représente la probabilité que l'évènement se produise. En d'autres mots, cela veut dire à quel point il est probable que l'évènement se produise. On peut prendre par exemple une récurrence de 20 ans pour une crue. Cela signifie que l'évènement de crue se produira en moyenne une fois tous les 20 ans. La récurrence peut donc nous permettre de connaître l'évolution d'évènements hydrologiques extrêmes, qui n'arrivent qu'une seule fois tous les 100 ans en moyenne.

2.3.2.3 Les horizons temporels

L'atlas hydroclimatique est paramétré selon trois horizons temporels futurs. Il s'agit de l'horizon 2020, qui représente la période de 2011 à 2040, l'horizon 2050, qui représente l'horizon de 2041 à 2070, et l'horizon 2080, qui représente l'horizon de 2071 à 2100. Chacun de ses horizons permet de comparer les valeurs des variables à celle d'une période de référence passée, soit de 1981 à 2010.

2.3.2.4 Les descripteurs

Lorsque l'indicateur selon un certain horizon temporel est comparé à la période de référence, la différence obtenue entre les deux valeurs s'appelle un *signal de changement*. Ce signal est ensuite présenté sous la forme de trois descripteurs distincts, soit : la *direction*, l'*ampleur* et la *dispersion*.

Direction

La *direction* représente la « proportion des projections hydroclimatiques indiquant l'augmentation ou la diminution éventuelle d'un indicateur donné » (Angelica Alberti-Dufort & Raphaël

Desjardins, 2022) et est définie dans le tableau 2.6 selon le Guide de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional 2022.

Tableau 2.6 Échelle associée à la direction dans l'AHQM

<i>Augmentation très probable</i>	plus de 90 % des projections hydroclimatiques indiquent une augmentation
<i>Augmentation probable</i>	de 66 à 90 % des projections hydroclimatiques indiquent une augmentation
<i>Absence de consensus</i>	de 33 à 66 % des projections hydroclimatiques indiquent une augmentation ou une diminution. L'absence de consensus peut indiquer un changement faible ou des projections hydroclimatiques dispersées, c'est-à-dire dont la moitié indique une diminution et l'autre moitié indique une augmentation.
<i>Diminution probable</i>	de 66 à 90 % des projections hydroclimatiques indiquent une diminution
<i>Diminution très probable</i>	plus de 90 % des projections hydroclimatiques indiquent une diminution

Ampleur

L'*ampleur* représente la valeur médiane des changements relatifs produits entre un horizon temporel de projections climatiques et la période de référence. Elle indique la valeur d'augmentation ou de diminution de la variable en pourcentage.

Dispersion

La *dispersion*, quant à elle, représente la comparaison entre la plage de données incluse entre le 25^e et le 75^e percentile des projections avec l'ampleur (ou la médiane). Cette valeur représente à quel point le signal autour de la médiane est certain ou pas. En d'autres mots, on parle de l'incertitude des valeurs obtenues autour de la médiane et donc à quel point notre résultat est fiable.

2.3.2.5 Les scénarios d'émission de GES

La dernière option lors de la visualisation des variables est la sélection du scénario d'émissions de gaz à effet de serre. Ayant été réalisé en 2022, le rapport du GIEC le plus récent à ce moment était le 5^e rapport. Celui-ci avait établi quatre trajectoires représentatives de concentration (GIEC, 2013), les RCP, détaillées à la section 2.1.3.3. Parmi les quatre scénarios, deux ont été choisis pour modéliser les valeurs de l'atlas hydroclimatique. Pour rappel, le RCP4.5 représente le scénario d'émissions modérées avec un forçage radiatif de $4,5 \text{ W/m}^2$ et le RCP8.5 représente des émissions élevées avec un forçage radiatif de $8,5 \text{ W/m}^2$ (voir section 2.1.3.3).

On peut donc choisir entre ces deux scénarios d'émissions pour voir les différents résultats de projections climatiques afin de voir la variation des valeurs hydrologiques de l'atlas.

2.3.3 Analyse de vulnérabilité de la ville de Montréal

Le Bureau de la transition écologique et de la résilience (BTER) de la VDM a réalisé une carte interactive sur la Vulnérabilité aux aléas climatiques de l'agglomération de Montréal. L'outil présente plusieurs cartes issues de l'analyse de vulnérabilité de la VDM par le BTER, réalisée en utilisant la méthodologie développée par Ouranos et l'Université de Montréal pour une étude de cas sur les inondations (Isabelle Thomas *et al.*, 2012). Les cartes disponibles présentement sont des analyses de vulnérabilité pour les années 2015 et 2022 et sont composées de mailles, ou cellules carrées, de 25 m x 25 m.

Le BTER décrit la vulnérabilité comme étant « la propension ou la prédisposition d'un système (collectivité, infrastructures et milieu naturel) à subir des dommages causés par la manifestation d'un aléa climatique. Elle varie en fonction de la nature, de l'ampleur et du rythme de l'évolution de la manifestation ainsi que de la variation du climat à laquelle le système est exposé, de la sensibilité de ce système et de sa capacité d'adaptation » (BTER, 2025). L'outil propose donc des cartes de vulnérabilité aux pluies abondantes, aux vagues de chaleur, aux tempêtes destructrices, aux sécheresses et aux crues pour les deux années, représentant ainsi comment la population montréalaise est susceptible à ces aléas climatiques.

2.4 Plateformes de visualisation existantes

La présente section fait un état de l’art des outils existant aujourd’hui. Le but de cette revue est d’établir des critères de fonctionnalités et de déterminer les forces et faiblesses de chacun de ces outils pour permettre le développement d’une plateforme la plus épurée et fonctionnelle possible. Il ne s’agit pas d’une revue de chaque outil, mais bien d’une revue de surface pour permettre d’établir des critères précis. Les outils exposés dans cette section ont été choisis en raison de leur pertinence pour le développement de la plateforme. Une revue plus en détail, analysant une grande quantité d’outils existants partout dans le monde, est présentée dans le mémoire de Marianne Lipp.

2.4.1 Géorisque France

La plateforme **Géorisques** est une plateforme interactive réalisée en partenariat entre le Ministère de la Transition Écologique, de la Biodiversité, de la Forêt, de la Mer et de la Pêche et le BRGM en France. Elle permet de visualiser les risques associés à son emplacement, en y entrant son adresse directement ou en allant cliquer sur la carte.

L’outil nous permet ensuite de visualiser le niveau de risque naturel et technologique spécifique à notre emplacement sous la forme de plusieurs indicateurs. Il est aussi possible d’avoir plus d’informations sur chaque risque identifié pour savoir que faire en cas d’évènement. La figure 2.7a présente un exemple du rapport permettant de visualiser les différents risques naturels et technologiques à un emplacement. On peut voir qu’elle donne un niveau de risque qualitatif à son adresse et un autre de même type pour sa commune. La figure 2.7b quant à elle permet d’observer un exemple de présentation du risque d’inondation.

6 Risques naturels identifiés :

INONDATION

à mon adresse :
INCONNU

sur ma commune :
EXISTANT

REMONTÉE DE NAPPE

à mon adresse :
PAS DE RISQUE CONNU

sur ma commune :
EXISTANT

SÉISME

à mon adresse :
MODÉRÉ

sur ma commune :
MODÉRÉ

MOUVEMENTS DE TERRAIN

à mon adresse :
INCONNU

sur ma commune :
EXISTANT

RETRAIT GONFLEMENT DES ARGILES

à mon adresse :
MODÉRÉ

sur ma commune :
MODÉRÉ

RADON

à mon adresse :
FAIBLE

sur ma commune :
FAIBLE

2 Risques technologiques identifiés :

INSTALLATIONS INDUSTRIELLES CLASSÉES (ICPE)

à mon adresse :
NON CONCERNÉ

sur ma commune :
CONCERNÉ

POLLUTION DES SOLS

à mon adresse :
CONCERNÉ

sur ma commune :
CONCERNÉ

a) Exemple du rapport de risques par la plateforme Géorisques.

Risque d'inondation près de chez moi

Risque à mon adresse : INCONNU

Risque sur la commune : EXISTANT

L'inondation est une submersion, rapide ou lente, d'une zone habituellement hors de l'eau.

Les types de risques d'inondation à mon adresse

- Par ruissellement et coulée de boue
L'inondation par ruissellement se produit lorsque les eaux de pluie ne peuvent pas ou plus s'infiltre dans le sol. En ville, ces eaux de pluies peuvent saturer rapidement les réseaux d'évacuation et emprunter alors les rues en créant des courants dangereux. En milieu rural, le ruissellement peut se transformer en coulée de boue.
- Par une crue torrentielle ou à montée rapide de cours d'eau
Crue torrentielle ou à montée rapide de cours d'eau: Une crue dite « éclair », se caractérise par une montée des eaux rapide, qui s'accompagne d'un courant très puissant et dangereux, pouvant charrier des éléments solides (sable, galets, etc).
- Par remontées de nappes naturelles
En cas de précipitations de longue durée, le niveau de la nappe phréatique, excessivement chargée, peut remonter à la surface du sol, et inonder les zones alentours.
- En cas de précipitations violentes, particulièrement sur des zones de montagne, les crues des torrents peuvent entraîner des écoulements très rapides mêlant de l'eau, des sédiments et des matériaux de toutes tailles (rocher, arbres, ...).

Zone à risque entraînant une servitude d'utilité publique

Informations détaillées :

DDRM : DDRM74

Dans son Dossier Départemental des Risques Majeurs (DDRM), la préfecture a classé votre commune à risque pour les aléas et sous aléas :

- Inondation
- Par ruissellement et coulée de boue
- Par une crue torrentielle ou à montée rapide de cours d'eau
- Par remontées de nappes naturelles
- Par lave torrentielle (torrent et talweg)

3 inondations classées en catastrophe naturelle dans ma commune :

Une CATNAT est une Catastrophe Naturelle, liée à un phénomène ou conjonction de phénomènes dont les effets sont particulièrement dommageables. Lorsqu'une catastrophe naturelle frappe un territoire, on dit que "le territoire est en état de catastrophe naturelle".

Code NOR	Libellé	Début le	Sur le journal officiel du
INTX921012A	Inondations et/ou Coulées de Boue	30/06/1990	05/02/1992
INTER900196A	Inondations et/ou Coulées de Boue	10/02/1990	24/05/1990
NOR198211B	Inondations et/ou Coulées de Boue	06/11/1982	19/11/1982

b) Exemple du risque d'inondation par la plateforme Géorisques.

Figure 2.7 Exemples d'évaluations de risques présentés sur la plateforme Géorisques

La plateforme est intuitive et permet de bien s’informer sur près de 20 risques naturels et technologiques. Elle propose des fiches descriptives sur chacun de ses risques, y compris une description de celui-ci, des solutions pour se préparer en cas d’urgence face à ces risques et un accompagnement pour avoir plus d’informations. Cet outil est l’une des principales sources d’inspiration du projet, autant pour sa simplicité d’utilisation, la clarté de l’information que la facilité de compréhension de l’interface.

Il ne permet pas d’avoir des solutions de résilience.

2.4.2 Carte climat par Équiterre

La Carte Climat réalisée par l’association québécoise Équiterre est l’une des seules cartes recensées qui vise en premier lieu la population. La carte sert d’outil de visualisation de projections climatiques au Québec avec un horizon jusqu’à 2100. En plus de voir les données

futures, l'outil permet d'observer des événements climatiques extrêmes survenus partout dans la province, classés sous sept aléas différents. Les événements sont représentés sous forme de pastilles colorées sur la carte à l'emplacement auquel ils sont survenus, permettant ainsi une visualisation facile et agréable de ceux-ci. La figure 2.8 présente un exemple des inondations qui ont touché le Québec en 2019. Cela nous permet de voir la quantité de municipalités touchées, incluant le nombre de résidences et de personnes affectées, l'impact sur les routes et l'environnement riverain, et même les coûts en dommages causés.

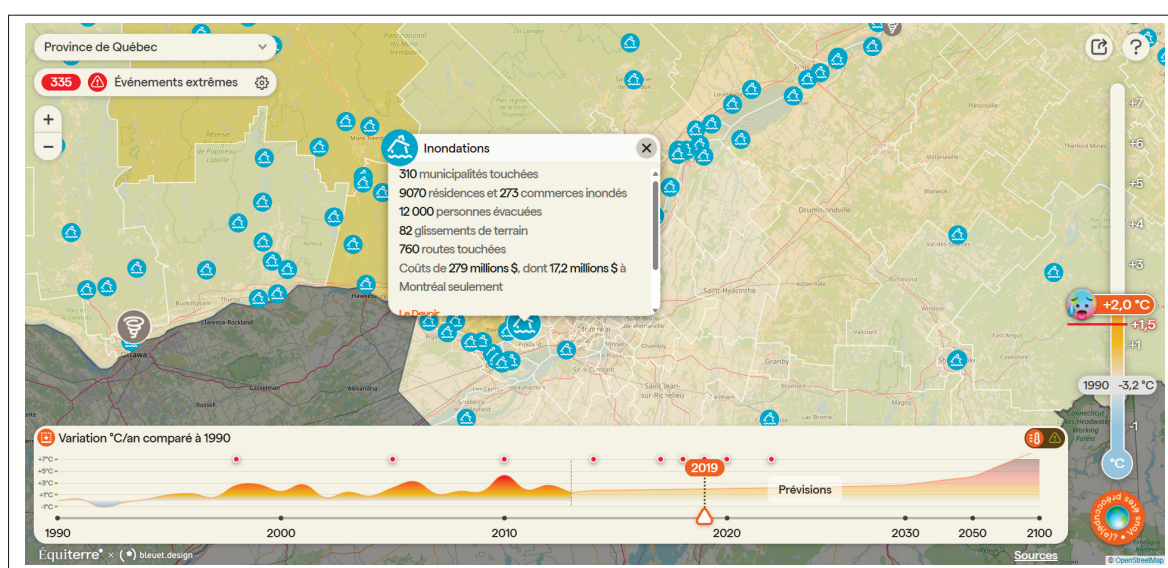


Figure 2.8 Inondation majeure au Québec en 2019.
Tiré de Carte Climat Équiterre (2025)

La carte nous permet aussi de visualiser la courbe de tendance de la température au Québec, en plus de voir l'avancement du réchauffement de la région par rapport à 1990, suivant l'accord de Paris à limiter le réchauffement global à 1,5°C (ONU, 2015). Cette carte constitue donc un très bon exemple d'outil de sensibilisation pour la population, tant pour sa facilité d'utilisation et de compréhension que pour son aspect visuel coloré et agréable. Elle sert d'inspiration du côté visuel et ludique pour l'outil en développement.

2.4.3 Plateformes proposées par Ouranos

Tel que mentionné à la section 2.3.1, les trois plateformes utilisant les données de PAVICS permettent de visualiser des données de projection climatiques, soit au Québec dans le cas de Portraits climatiques ou au Canada pour l'Atlas climatique et le portail de Données climatiques. Les deux derniers outils présentent un deuxième volet sur leur plateforme offrant de l'information sur les variables utilisées et de l'information complémentaire sur les changements climatiques. Pour l'Atlas climatique, le volet éducation est plus centré sur le côté humain, en offrant des ressources sur la *santé mentale* et l'écoanxiété, les maladies, la qualité de l'air et les impacts des changements climatiques sur les premières nations. L'outil propose également des vidéos d'apprentissage sur ces sujets sous forme de capsules de deux à quatre minutes. La zone d'apprentissage de Données climatiques, quant à elle, est plus axée sur la science du climat, en présentant les concepts sous forme de petits articles ou grâce à une formule interactive. Les deux plateformes offrent donc un volet synthétisant l'information et permettant de sensibiliser la population face aux concepts de changements climatiques.

2.5 Communication sur les changements climatiques

La section suivante présente une revue des bonnes pratiques en matière de communication sur les changements climatiques. En effet, le projet étant principalement axé sur la sensibilisation de la population québécoise, il est impératif de bien comprendre et d'analyser les meilleures méthodes de communication sur le sujet. Le chapitre présente aussi une brève analyse du Baromètre de l'action climatique 2024.

2.5.1 Communication et sensibilisation

La communication sur les changements climatiques est un élément essentiel pour sensibiliser la population et encourager des actions concrètes. Une communication claire et efficace peut permettre de surmonter les barrières psychologiques et sociales qui entravent l'engagement face aux changements actuels.

2.5.1.1 Le rôle de l'individu dans la communication

L'ONU nous dit que « Tout le monde peut jouer un rôle en faisant entendre sa voix, en partageant des solutions et en plaidant pour le changement » (Nations Unies, s.d.) et propose des stratégies afin de bien communiquer l'information afin d'inciter les gens à agir pour la lutte contre les changements climatiques. L'ONU recommande d'utiliser les trois stratégies suivantes lorsqu'on communique afin de mieux transmettre l'information :

1. **S'appuyer sur des faits scientifiques et des sources faisant autorité :** Il est recommandé de toujours vérifier et valider nos sources pour que les propos soient fiables et fondés sur la science. L'utilisation de rapports les plus récents possible permet d'avoir des faits et des chiffres plus représentatifs de la réalité actuelle. L'ONU mentionne de se servir de rapports provenant d'organismes et de sources qui ont une certaine autorité et reconnaissance dans le domaine, tels que le GIEC et leurs rapports sur l'évolution du climat ou encore le consortium Ouranos, reconnu au Canada et même à l'international pour sa recherche sur les changements climatiques. Il est aussi important de mentionner qu'il faut éviter la désinformation dans son message et de faire attention à l'écoblanchiment (ou « greenwashing »).
2. **Parler autant du problème que des solutions :** Lorsqu'on parle de changements climatiques, on peut parfois se sentir impuissant. Il est donc important de présenter des actions positives et des solutions plutôt que de se concentrer uniquement sur les problèmes, afin d'éviter que le public ne se sente dépassé par le sujet. Il est important de parler de choses concrètes et de présenter des faits réels pour permettre aux gens de s'y retrouver et de créer des liens avec la cause. Les histoires personnelles et les exemples locaux sont plus susceptibles de toucher le public et de rendre les enjeux plus tangibles. Les Nations Unies mentionnent aussi le fait de montrer aux gens qu'ils ont le pouvoir d'agir, que ce soit pour réduire son empreinte environnementale ou pour s'adapter aux changements climatiques.

3. **Encourager l'action :** Il faut encourager les gens à prendre action maintenant. L'urgence climatique nous montre que c'est maintenant que nous devons agir rapidement afin d'avoir un impact positif pour les générations futures. Selon l'ONU, il faut trouver un équilibre entre la gravité de la situation et l'espoir d'un avenir meilleur grâce à des actions individuelles et collectives tout en évitant un langage trop technique. Il faut présenter l'information de façon à ce que notre public cible se sente interpellé et soit porté à prendre action naturellement. Il est important de proposer des actions concrètes et réalisables pour que les gens se sentent capables de contribuer.

Les trois stratégies de l'ONU nous montrent donc que pour informer et sensibiliser la population, il faut savoir s'appuyer sur des sources fiables et fondées sur la science, il faut donner la force d'agir avec un message basé sur des solutions concrètes et accessibles, et il faut encourager la population à passer à l'action (Nations Unies, s.d.).

2.5.1.2 Bien communiquer sur les changements climatiques

Lorsqu'on parle de changements climatiques, il est important de bien savoir communiquer l'information. L'INSPQ mentionne que « Communiquer au sujet des changements climatiques s'avère complexe et peut générer des réactions non désirables comme l'évitement, le déni ou le découragement. » (INSPQ, 2024b) Cela dit, il faut donc trouver des stratégies efficaces afin de minimiser les réactions négatives. Dans son étude, l'INSPQ identifie six grandes barrières dans la communication sur les changements climatiques au Québec. La figure 2.9 ci-dessous présente les six catégories et montre une panoplie de solutions et leviers qui peuvent permettre de pallier ces différentes embûches.



Figure 2.9 Les embûches à la communication des changements climatiques et les solutions qui y répondent. Tiré de INSPQ (2024b)

Parmi tous les leviers d'action possibles présentés par l'INSPQ, on peut y voir ressortir cinq stratégies permettant d'aborder les changements climatiques dans un langage accessible, en minimisant les réponses émotionnelles négatives telles que la détresse, la colère, l'écoanxiété ou les comportements d'évitement. Les cinq stratégies proposées sont :

- Adapter le contenu au public cible (valeurs, connaissances, préoccupations)
- Privilégier la qualité plus que la quantité dans les messages
- Aborder les risques sans tomber dans l'alarmisme
- Parler davantage des solutions concrètes et des cobénéfices (santé, économie, collectivité)
- Nourrir un espoir lucide et garder une attitude positive et proactive

Le premier levier d'action étant d'adapter le contenu à son public cible, l'INSPQ nous recommande donc de s'assurer de tenir compte des préoccupations et des intérêts de celui-ci, en plus de bien personnaliser son message en fonction du niveau de connaissance, des capacités et même de son attitude face aux changements climatiques. Le rapport mentionne qu'il est important d'adapter son message avec un cadrage informationnel, qui permet d'orienter la discussion vers les intérêts du public cible. Le cadrage peut être axé sur le côté sanitaire, qui parle des effets sur la santé physique, psychologique et sociale, ou encore centré sur l'économie, les conséquences sur l'environnement ou peut traiter des enjeux sociaux de la crise climatique.

Les deuxièmes et troisièmes leviers, visant à privilégier la qualité à la quantité et à éviter d'être alarmiste, recommandent d'utiliser un message qui répond aux préoccupations du public et qui apporte une valeur ajoutée au message, en étant succinct et efficace dans les propos. Il n'est pas nécessaire de réduire la quantité d'information, mais plutôt d'adapter son contenu pour être plus efficace. L'INSPQ met l'accent sur le fait d'éviter d'être alarmiste en améliorant la compréhension des changements climatiques afin de permettre au public de prendre conscience des risques associés. Il faut donc toujours accompagner la présentation des risques aux solutions possibles permettant de prévenir ces mêmes risques, passant ainsi un message positif sur les actions concrètes qui peuvent être entreprises.

Les deux derniers leviers proposent de parler davantage des solutions et de nourrir un espoir lucide. Tout comme l'a mentionné l'ONU à la section 2.5.1.1, l'INSPQ rappelle qu'il est important de proposer des solutions concrètes, disponibles et de bien montrer les bénéfices de celles-ci. Il faut aussi présenter les bénéfices de ces solutions ainsi que les compétences nécessaires à leur mise en place, en plus de donner des options adaptées au public cible afin qu'il se sente apte à les réaliser. Toutefois, le rapport met en garde de ne pas surresponsabiliser le public afin d'éviter de décourager et d'alimenter l'écoanxiété de la population. Il faut aussi prioriser les solutions collectives plus qu'individuelles, et non seulement donner des solutions de réduction et d'atténuation, mais aussi d'adaptation aux changements climatiques pour réduire les inquiétudes de la population. Enfin, l'INSPQ met l'accent sur la nécessité de nourrir un espoir lucide et de garder une attitude positive. En effet, la crise climatique peut générer un

comportement et des émotions anxieuses qui peuvent grandement impacter la santé mentale de la population, et ce, à long terme. Il est donc important de « reconnaître le fardeau, les craintes et les risques de la situation présente, tout en reconnaissant les avancées réalisées et en privilégiant une attitude positive et proactive face aux défis actuels et à venir » (INSPQ, 2024b).

Le rapport *Climate Communications Playbook : Behavioural Strategies for Community Action* publié par ICLEI Canada (2025) propose un cadre stratégique pour améliorer la communication climatique au niveau local et favoriser le passage de la sensibilisation à l'action. L'objectif est de concevoir des campagnes qui ne se limitent pas à informer, mais qui motivent des comportements concrets d'adaptation et de réduction des émissions.

Le document souligne que les approches traditionnelles de communication, centrées sur les rapports scientifiques et les données climatiques, atteignent surtout le public étant déjà convaincu et sensibilisé aux changements climatiques, tandis qu'une grande partie de la population demeure passive ou indécise. Comme l'a présenté le rapport de l'INSPQ précédemment, ICLEI recommande d'adopter des stratégies ciblées selon les valeurs, les motivations et les obstacles propres à chaque segment de population. Plutôt que de diffuser des messages uniformes et de proposer des solutions trop générales, on incite à identifier les leviers d'action spécifiques à chaque groupe afin d'éviter le sentiment d'impuissance ou d'inefficacité.

Le manuel de communication met également l'accent sur l'usage d'outils issus des sciences comportementales pour stimuler l'engagement. ICLEI propose des stratégies comme le cadrage positif des messages (en mettant en avant les cobénéfices de l'action climatique), l'influence sociale (valorisation des comportements positifs dans la communauté) et les incitatifs comportementaux comme l'engagement, le jeu, les récompenses ou les défis collectifs. ICLEI insiste aussi sur la nécessité d'une communication inclusive, transparente et éthique et qui respecte la diversité des publics.

Enfin, le guide propose plusieurs stratégies complémentaires au guide de l'INSPQ, et permet de mieux comprendre l'importance d'une communication ciblée, adaptée, et centrée sur l'action et les bénéfices plutôt qu'être alarmiste. En favorisant la participation citoyenne et

l'appropriation locale des enjeux, les municipalités peuvent renforcer la cohésion sociale et la capacité d'adaptation face aux risques climatiques. Le guide d'ICLEI met davantage l'accent sur les stratégies comportementales (cadre, segmentation des publics, incitations positives) tandis que l'INSPQ se concentre sur le contexte québécois, les obstacles psychologiques à la mobilisation et les recommandations opérationnelles pour la communication. Ensemble, ces deux documents fournissent un cadre complémentaire pour concevoir des démarches de sensibilisation et d'engagement auprès de la population.

2.5.1.3 L'influence de la pandémie sur la communication des changements climatique

Le rapport d'Ouranos (Maxime Boivin *et al.*, 2023) explore les défis liés à la communication sur l'adaptation aux changements climatiques dans le contexte particulier de la pandémie de COVID-19. Malgré le fait de ne pas être directement lié à ce projet, cette étude met en évidence l'importance d'une bonne communication face à un défi mondial réel. Elle permet de voir comment la crise sanitaire a temporairement mis sur pause la question climatique dans l'espace public québécois, entraînant une baisse de la couverture médiatique d'environ 50% et de l'engagement citoyen envers les enjeux d'adaptation. Bien que la préoccupation pour le climat demeure élevée au sein de la population et que certains semblent avoir développé une forme d'écoanxiété, Ouranos constate l'émergence d'une fatigue climatique et d'une distance psychologique accrue. Les impacts du changement climatique sont souvent perçus comme des phénomènes abstraits, lointains ou affectant surtout d'autres régions au Canada ou ailleurs dans le monde. Cette perception contribue à limiter la volonté d'agir localement, malgré la reconnaissance générale de la gravité de la crise, en laissant le problème aux générations futures.

L'analyse de contenu des médias et les expérimentations menées par les chercheurs montrent que certains cadrages de communication peuvent réduire cette distance et stimuler l'engagement. En particulier, les messages axés sur la santé publique, les répercussions économiques et les impacts locaux tangibles (illustrés par des outils visuels ou des cartes interactives) s'avèrent plus efficaces pour susciter l'intérêt et la compréhension du public. Le rapport recommande donc d'adapter la communication à la diversité et à l'intérêt du public, de privilégier des récits concrets,

positifs et porteurs de solutions, et de renforcer la crédibilité des messagers, en augmentant la présence de scientifiques dans les médias plutôt que les instances gouvernementales. Ces constats soulignent que la réussite des stratégies d'adaptation au Québec dépend autant de la diffusion d'une information scientifique accessible que de la capacité à mobiliser la population autour d'une vision commune de la résilience climatique.

Le rapport formule neuf recommandations pratiques pour améliorer la communication sur l'adaptation aux changements climatiques au Québec. En voici quelques-unes :

- Adapter les messages aux différents publics cibles
- Privilégier un ton réaliste mais optimiste
- Favoriser les messagers crédibles tels que les scientifiques et organismes connus
- Mettre l'accent sur les effets locaux et collectifs plutôt qu'individuels
- Promouvoir la solidarité sociale

Ce travail de recherche permet donc de voir l'importance de la communication sur les changements climatiques dans la société, en offrant des façons de s'outiller pour avoir un impact positif sur la communauté.

2.5.2 Baromètre de l'action climatique 2024

Le Baromètre de l'action climatique 2024, rapport émis annuellement par le *Groupe de recherche sur la communication marketing climatique* de l'Université Laval, fait l'état des lieux de la vision des changements climatiques pour les Québécois, réalisé auprès de 2513 Québécois et Québécoises.

D'après les résultats du Baromètre, 82% de la population estiment qu'il est urgent d'agir face aux changements climatiques au Québec, et le même pourcentage estime qu'il faut réduire les émissions de GES de tous les secteurs immédiatement (Champagne St-Arnaud *et al.*, 2024). Suite au sondage, 67% des répondants indiquent avoir subi des effets négatifs liés aux changements climatiques, que ce soit par les événements météorologiques extrêmes, des effets sur la santé

physique ou mentale ou des pertes financières. Tout comme constaté dans le rapport de Maxime Boivin *et al.* à la section 2.5.1.3, la population québécoise semble ne pas s'inquiéter de la menace de la crise climatique dans leur région, alors que 65% voient la menace plus importante pour le reste du monde.

Face à cette réalité, il est important de souligner le rôle essentiel de l'outil conçu dans le cadre de ce projet pour sensibiliser la population et aider les individus touchés à se préparer aux défis posés par les changements climatiques.

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE

Ce projet de recherche consiste à créer deux types de base de données, soit une série de cartes pour les données de projections climatiques et de vulnérabilité, puis une base de données de solutions de résilience pour les infrastructures et l'environnement bâti à l'aide d'un rapport personnalisé. Comme mentionné dans la section 1.2, ce mémoire se focalise sur l'extraction et la manipulation des cartes climatiques qui servent à alimenter la base de données du projet. Le volet résilience climatique sera traité dans le mémoire de Marianne Lipp.

3.1 Méthodologie générale du projet

Le projet global, soit le développement de la carte interactive, mené par trois projets de maîtrise (voir chapitre 1), est séparé en quatre grandes phases distinctes. La figure 3.1 présente les différentes phases et permet de voir la répartition des tâches selon les trois étudiants : Jean-Cédric Faucher (JCF), Marianne Lipp (ML) et Paul Caillier (PC).

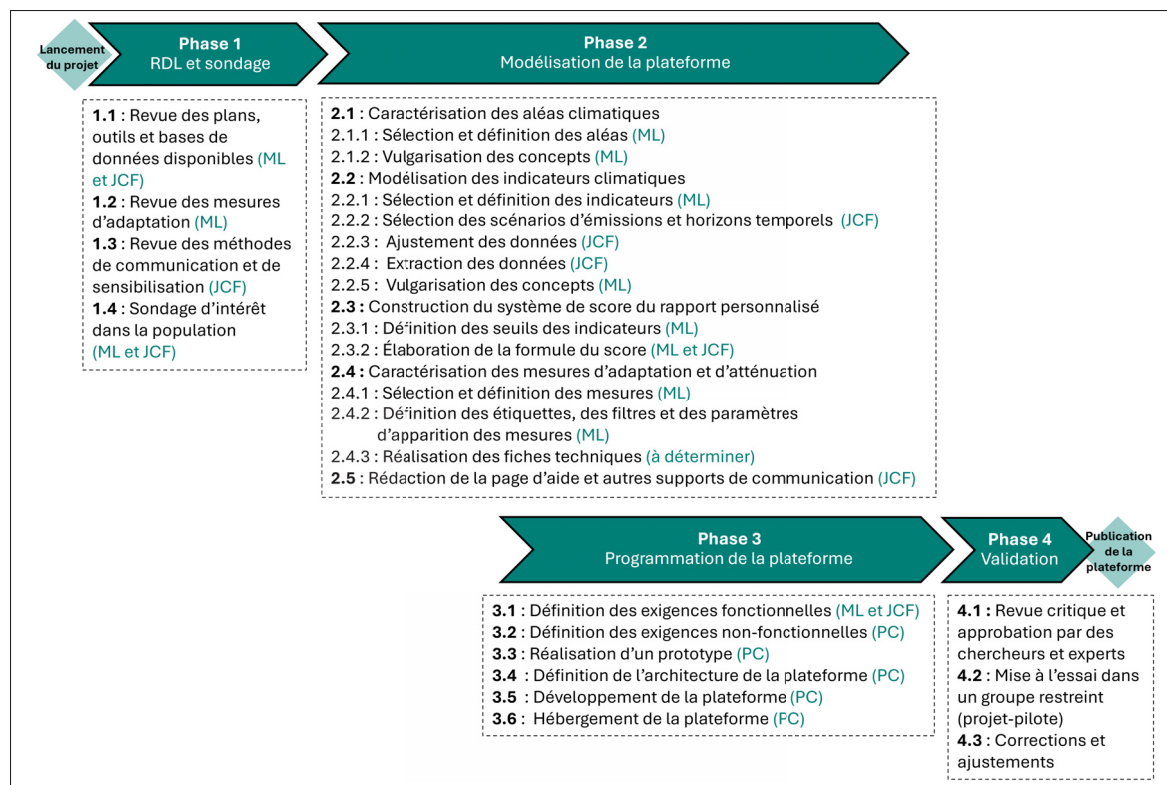


Figure 3.1 Phases du projet, étapes principales et jalons

La première phase, **Revue de littérature et sondage**, comprend une revue des plans d'adaptation existants, des outils, des bases de données climatiques et des mesures d'adaptation disponibles et une revue des méthodes de communication et de sensibilisation présentées à la section 2. De plus, un sondage a été effectué auprès de la population et est présenté à la section 3.2.

La deuxième phase, **Modélisation de la plateforme**, englobe tout ce qui a trait à la sélection, la collecte et la modification des données climatiques. Elle inclut la caractérisation et la définition des aléas (section 3.3), la modélisation des indicateurs, soit la sélection et la définition de ceux-ci (section 3.4), la définition des scénarios d'émissions (section 3.5.1) et des horizons temporels (section 3.5.2) ainsi que l'ajustement et l'extraction des données de projections climatiques (section 3.6) et des données de vulnérabilité (section 3.7).

La troisième phase, **Programmation de la plateforme**, inclut tous les aspects entourant le développement de la plateforme web. Elle comprend les définitions des exigences fonctionnelles (section 4.3.1) et non-fonctionnelles (section 4.3.2 ainsi que toute la programmation de l'outil réalisé par Paul Caillier.

La quatrième et dernière phase, la **Validation**, comprend la vérification et la mise à l'essai de la plateforme auprès de chercheurs, de ministères et d'institutions pour finalement mener à la publication de la première version en ligne. Elle inclut aussi les corrections et les ajustements, dont certains sont présentés à la section 4.4.2 pour les modélisations et à la section 4.4.3 pour la plateforme web.

3.2 Sondage

Afin de guider les décisions de conception et de nous assister dans la communication efficace de l'information sur la plateforme, un sondage a été publié sur diverses plateformes de communication de l'ÉTS, notamment le Bulletin d'information de la vie étudiante, les plateformes de l'Institut AdapT, ainsi que sur les réseaux sociaux. Le sondage comprend 24 questions portant autant sur la perception que les connaissances de la population sur les notions d'adaptation et de résilience (pour mieux orienter les efforts de sensibilisation) et sur leur capacité à s'adapter aux changements climatiques.

Les questions ont été élaborées selon trois différents volets. Tout d'abord, elles visent à mieux comprendre le niveau de connaissance de la population sur les changements climatiques et la résilience. Le deuxième volet porte sur la perception des enjeux climatiques et des aléas jugés les plus préoccupants, dans le but d'orienter la sélection et la priorisation des indicateurs climatiques présentés sur la carte interactive. Enfin, le troisième volet porte sur la résilience climatique, plus précisément sur les mesures d'adaptation à inclure dans l'outil et le type d'information recherché sur ces mesures afin d'orienter les choix au niveau de la conception du rapport personnalisé de la plateforme.

L'analyse du sondage sera présentée à la section 4.1 et sera comparée au sondage réalisé dans le cadre du *Baromètre de l'action climatique 2024* pour aider à orienter la conception de la plateforme. Le sondage est aussi présenté dans son entièreté à l'annexe I.

Il est à noter que le sondage a été approuvé par le comité d'éthique de la recherche de l'ÉTS.

3.3 Sélection des aléas climatiques

La première étape de la méthodologie pour créer la base de données est de déterminer quels seront les aléas climatiques utilisés lors de la recherche de données. En effet, il convient de choisir des aléas pertinents pour le Québec, d'utiliser des données publiques et disponibles et d'orienter les décisions en fonction des priorités de la population issues du baromètre de l'action climatique et du sondage réalisé dans le cadre du projet, présenté à la section 3.2. Le mémoire de Marianne Lipp présente en détail la méthodologie employée pour choisir les aléas prioritaires pour l'outil en cours de développement.

Le tableau 3.1 présente les sept aléas sélectionnés pour la première version de l'outil avec leur définition. L'objectif ultime consiste à disposer d'un outil exhaustif englobant l'ensemble des diverses dimensions des changements climatiques ; ainsi, d'autres aléas pourront être intégrés dans les versions ultérieures de la plateforme.

Tableau 3.1 Choix des aléas et des définitions.
Tiré du mémoire de Marianne Lipp (2025)

Aléas	Définition
Augmentation de la température	L'aléa <i>Augmentation de la Température</i> (ADT) fait référence aux tendances d'évolution des températures et aux effets saisonniers découlant de l'augmentation progressive des températures sur le territoire. Les projections climatiques pour cet aléa permettent de visualiser l'évolution des températures maximales sur le territoire. Des projections concernant les épisodes de gel-dégel et les espèces ravageuses sont également intégrés dans l'aléa ADT.
Pluies abondantes	L'aléa <i>Pluie Abondante</i> (PA) fait référence aux événements de pluie apportant une quantité d'eau importante sur le territoire. Ces précipitations peuvent entraîner des inondations pluviales et des refoulements d'égouts.
Crues	L'aléa <i>Crues</i> (C) fait référence à l'augmentation des débits des cours d'eau ou à la hausse des niveaux des cours d'eau, pouvant entraîner des inondations fluviales.
Froid extrême	L'aléa <i>Froid Extrême</i> (FE) fait référence aux événements de températures très basses.
Chaleur extrême	L'aléa <i>Chaleur extrême</i> (CE) fait référence aux événements de températures très élevées (vagues de chaleur, chaleur accablante, canicule).
Sécheresses	L'aléa <i>Sécheresse</i> (S) fait référence à un déficit prononcé et prolongé de précipitations (sécheresse météorologique) ou à une baisse des eaux des cours d'eaux et de la nappe phréatique (sécheresse hydrologique)
Tempêtes destructrices	L'aléa <i>Tempêtes Destructrices</i> regroupe plusieurs types de tempêtes : tempêtes de vent, de grêle, de neige abondante et de pluie verglaçante. Note : Les projections pour la V1 seront seulement pour les évènements de pluie verglaçante

3.4 Sélection des indicateurs climatiques

Une fois les aléas climatiques choisis, il faut déterminer quels seront les indicateurs climatiques utilisés lors de la recherche de données. Les indicateurs serviront ensuite à modéliser les cartes montrant le climat futur au Québec. La méthodologie pour le choix de ces indicateurs est détaillée dans le mémoire de Marianne. La section présente brièvement les indicateurs choisis pour l'outil.

Sept critères de sélection ont été utilisés pour sélectionner les indicateurs, formant ainsi une matrice de décision permettant de décider quels indicateurs seront inclus dans l'outil. Les critères sont :

1. Illustration des impacts croissants des changements climatiques sur la santé publique, les infrastructures ou les écosystèmes ;
2. Qualité des indicateurs plutôt que quantité ;
3. Diversité des indicateurs ;
4. Les indicateurs qui présentent des variations significatives sur le territoire sont privilégiés afin de pouvoir identifier des observations ou des priorités spécifiques à chaque lieu ;
5. Les indicateurs qui présentent des variations notables à différents horizons de temps sont privilégiés dans le but de mettre en évidence les conséquences des changements climatiques au fil du temps ;
6. Disponibilité des données en fonction des différentes plateformes accessibles ;
7. Présence de seuils critiques.

Les critères précédents ont servi de base pour la sélection d'indicateurs pertinents pour la création de la base de données de projections climatiques de l'outil. Concernant les cartes de vulnérabilité mentionnées à la section 2.3.3, les indicateurs sont repris tels quels sans modification.

À la suite de l'analyse réalisée par Marianne Lipp, 39 indicateurs ont été sélectionnés au total, soit **19 indicateurs climatiques** en plus des **20 indicateurs de vulnérabilité**. Les indicateurs climatiques présents dans l'outil sont montrés dans le tableau 3.2 pour chaque aléa.

Tableau 3.2 Indicateurs climatiques par aléa.
Tiré du mémoire de Marianne Lipp (2025)

Aléas	Indicateurs sélectionnés
Augmentation de la température	• Augmentation des températures moyennes • Nombre de degrés-jours 0 °C • Température moyenne estivale • Évènements de gel-dégel
Pluies abondantes	• Précipitations maximales durant 1 jour l'été
Crues	• Débit journalier maximal sur la période hiver-printemps de récurrence 20 ans (Q1MAX20HP) • Débit journalier maximal sur la période hiver-printemps de récurrence 100 ans (Q1MAX100HP) • Débit journalier maximal sur la période été-automne de récurrence 20 ans (Q1MAX20EA) • Débit journalier maximal sur la période été-automne de récurrence 100 ans (Q1MAX100EA)
Froid extrême	• Moyenne des températures minimales hivernales • Nuit la plus froide
Chaleur extrême	• Moyenne des températures maximales l'été • Nombre d'évènements de vague de chaleur de classe 1 • Nombre de nuits tropicales $\geq 20^{\circ}\text{C}$ • Jour le plus chaud
Sécheresses	• Fréquence des séquences sèches (sécheresse météorologique) • Débit moyen sur 7 jours minimal sur la période été-automne de récurrence de 10 ans (Q7MIN10EA, sécheresse hydrologique)
Tempêtes destructrices	• Précipitations accumulées solides l'hiver • Pluie verglaçante de longue durée

3.5 Sélection des scénarios d'émissions et horizons temporels

Cette section présente la sélection des scénarios d'émissions pour la présentation des données climatiques dans l'outil ainsi que les horizons temporels retenus.

3.5.1 Scénarios d'émissions

Tel que discuté au chapitre 2.1.3.3 de la revue de littérature, il existe plusieurs scénarios climatiques possibles. Parmi les multiples choix, quatre scénarios sont le plus souvent utilisés comme référence, soit le SSP1-2.6, le SSP2-4.5, le SSP3-7.0 et le SSP5-8.5. Toujours dans la lignée de vouloir fournir un outil de sensibilisation simple et facile d'utilisation, seulement deux des quatre scénarios sont retenus pour être utilisés dans la plateforme.

Selon le *Guide de recommandations scientifiques visant à faciliter l'utilisation de projections climatiques* d'Ouranos (2024), il est recommandé d'utiliser le scénario modéré (SSP2-4.5) et le scénario élevé (SSP3-7.0) pour parler de changements climatiques et d'adaptation. Pour la conception de la plateforme, le scénario SSP5-8.5 avait initialement été sélectionné comme « élevé ». Cependant, selon le groupe de travail III du GIEC, « les trajectoires qui dépassent un réchauffement $> 4^{\circ}\text{C}$ [...] (SSP5-8.5) impliqueraient un renversement des tendances technologiques actuelles et/ou des politiques d'atténuation (degré de confiance moyen) » (Priyadarshi R. Shukla *et al.*, 2022), ce qui rend le scénario de moins en moins probable. C'est pourquoi le SSP5-8.5 a été écarté et les deux scénarios sélectionnés pour la plateforme sont les deux recommandés par Ouranos.

3.5.2 Horizons temporels

Les horizons temporels ont été sélectionnés en fonction du *Guide de recommandations scientifiques visant à faciliter l'utilisation de projections climatiques* d'Ouranos (2024), recommandant d'utiliser des horizons temporels avec un intervalle de 30 ans. Les horizons sont donc :

- **1991 à 2020** : Représente la période de référence
- **2021 à 2050** : Représente l’horizon court terme ou 30 ans
- **2041 à 2070** : Représente l’horizon moyen terme ou 50 ans
- **2071 à 2100** : Représente l’horizon long terme ou 80 ans

Ces intervalles d’horizons permettent d’avoir une période assez longue pour tenir compte des variations d’une année à l’autre, tout en évitant que des années comportant des événements extrêmes, comme ceux causés par des tempêtes tropicales, perturbent les statistiques climatiques.

3.6 Extraction et manipulations des données de projections climatiques

Après avoir choisi les aléas et leurs indicateurs, la prochaine étape consiste à extraire les données climatiques pour procéder à la création de la base de données pour l’outil en conception. Les données de projections et de vulnérabilité provenant de plusieurs plateformes différentes, il est nécessaire de présenter la méthodologie d’extraction pour chacune de celles-ci. Pour les données de projections climatiques, toutes les cartes de la base de données seront au format GeoTIFF. Les cartes de vulnérabilité seront quant à elles au format Shapefile (SHP). Cette différence est due simplement au format de fichier disponible sur les différentes plateformes.

3.6.1 Portraits climatiques

La plateforme Portraits climatiques est la principale source de données de projections climatiques pour l’extraction des cartes vers l’outil en développement. En effet, la plateforme de *Données climatiques* a été écartée comme choix en raison de l’impossibilité d’extraire les cartes pour l’ensemble du Québec, permettant seulement d’exporter une très petite partie de la province simultanément, rendant le processus trop long et fastidieux. L’*Atlas climatique* a aussi été écarté puisqu’il est très limité au niveau du téléchargement de données climatiques avec seulement deux horizons temporels (versus trois comme mentionné à la section 3.5.2 en plus de la période de référence). La plateforme est aussi basée sur l’ancienne version de scénarios climatiques, le

CMIP5 (revue de littérature, section 2.1.3.3), alors que l'outil en développement incorpore la nouvelle version, le CMIP6.

Enfin, l'outil *PAVICS* a également été mis de côté en raison de sa grande complexité en terme d'utilisation et de manipulation de données. Cet outil reste le plus complet et approprié pour la carte interactive et fait l'objet de perspectives futures à la section 4.4.2 afin d'améliorer la précision de la plateforme dans les prochaines versions. Plus de détails sont fournis à la section 3.6.3 concernant les raisons pour lesquelles l'outil a été écarté.

Portraits climatiques sert donc d'outil d'extraction pour les aléas choisis, soit : augmentation de la température, pluies abondantes, froid extrême, chaleur extrême, tempêtes destructrices et l'indicateur de fréquence des séquences sèches pour les sécheresses. Les indicateurs pour les crues et le débit moyen sur sept jours de l'aléa sécheresse proviennent de l'AHQM et la méthodologie d'extraction des cartes est présentée à la section 3.6.2.

L'application permet d'extraire des données provenant d'un Ensemble de Simulations Post-traitées d'Ouranos (ESPO) qui forment une base de données sur les serveurs d'Ouranos permettant d'utiliser les cartes de projections climatiques et de supporter la plateforme Portraits climatiques (Lavoie *et al.*, 2024). Cet ensemble utilise les données de la sixième version du modèle CMIP du GIEC, appelé G6, et le *Regional Deterministic Reforecast System (RDRS) v2.1* qui sert de modèle de référence pour la correction de biais, nommé R2. Le nom de l'ensemble de données utilisées par la plateforme est donc ESPO-G6-R2. L'ensemble de données est composé de séries temporelles quotidiennes de trois variables, soit la température maximale quotidienne, la température minimale quotidienne et les précipitations quotidiennes.

Le site web de Portraits climatiques offre la possibilité de télécharger les données des indicateurs climatiques individuellement. On peut donc sélectionner un indicateur, un scénario climatique et une période de temps pour télécharger la carte directement au format *PNG* (image simple) ou *GeoTIFF* (image avec référence géographique). Il offre aussi l'option de télécharger les fichiers directement depuis un serveur sous forme de dossiers compressés pour tous les indicateurs, avec chaque dossier comprenant toutes les cartes selon les différentes périodes de temps, horizons

temporels et centiles. Cela fait en sorte que certains dossiers peuvent contenir jusqu'à 1200 fichiers GeoTIFF pour un seul indicateur.

En raison du grand nombre de cartes à extraire et du processus fastidieux du site web de Portraits climatiques, les cartes ont été extraites à l'aide d'un code Python. Tout d'abord, sur les 19 indicateurs climatiques présentés au tableau 3.2, 14 d'entre eux se retrouvent dans Portraits climatiques et les cinq autres sont issus de l'AHQM. Un premier script de code (disponible sur GitHub. Voir l'annexe II) a pour fonction de faciliter le téléchargement de tous les dossiers compressés pour ensuite les déposer dans un dossier local afin d'effectuer les manipulations nécessaires.

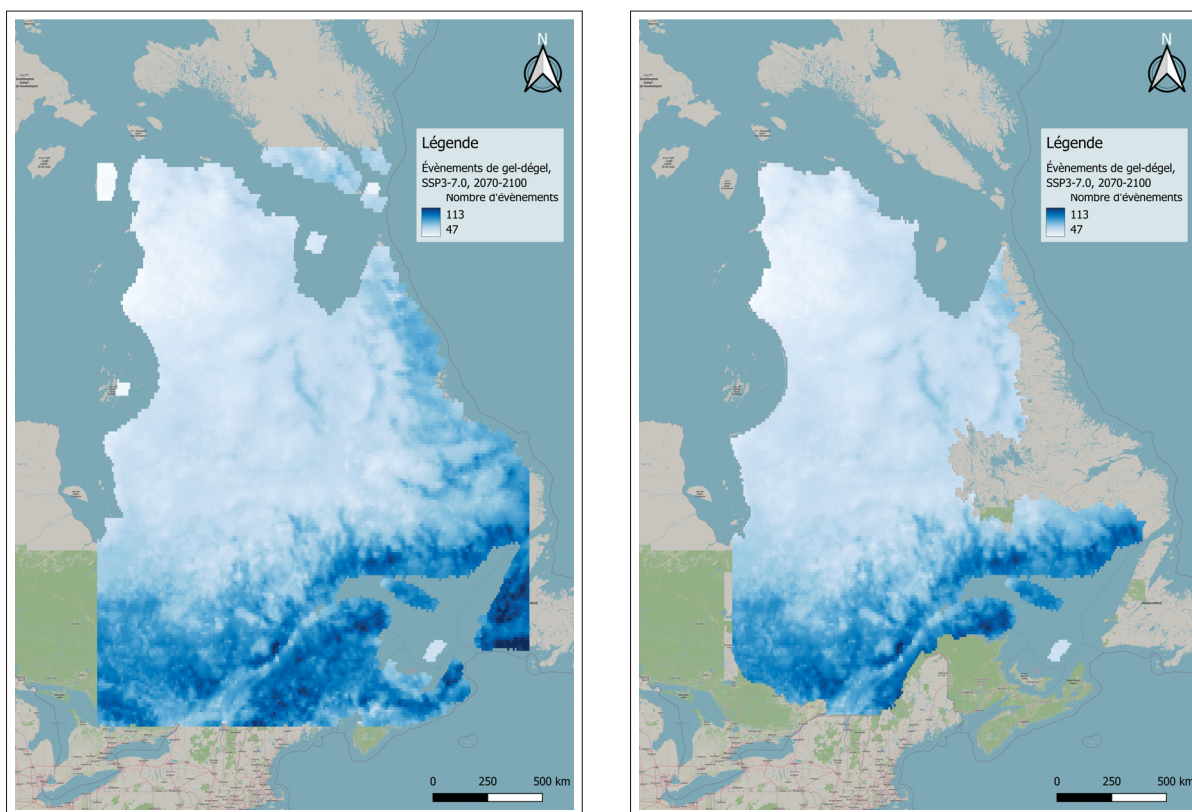
Une fois le tout téléchargé, un second script Python (disponible également sur GitHub) permet de sélectionner les fichiers en fonction de plusieurs critères relevant de la sélection des aléas, indicateurs, scénarios d'émission et horizons temporels, tous détaillés dans les sections 3.3 à 3.5. Ces critères sont :

- La **récurrence ou période** : annuelle ou par saison. Les saisons sont exprimées en fonction des mois qui y sont inclus, soit :
 - **DJF** : Décembre, janvier et février
 - **MAM** : Mars, avril et mai
 - **JJA** : Juin, juillet et août
 - **SON** : Septembre, octobre et novembre
- Le **scénario climatique** : SSP2-4.5 ou SSP3-7.0 pour les données du CMIP6 et RCP4.5 ou RCP8.5 pour les données du CMIP5
- Le **centile** : soit le 50^e centile ¹ ou le 90^e selon l'indicateur
- L'**Horizon temporel** : 1991-2020, 2021-2050, 2041-2070, 2071-2100

¹Le GIEC propose d'utiliser le 50^e centile pour montrer les projections climatiques, suivi des 5^e et 95^e centiles entre crochets afin de montrer les deux extrêmes (le scénario le plus froid et le plus chaud respectivement) (Priyadarshi R. Shukla *et al.*, 2022). Par simplicité et pour éviter d'alourdir l'information présentée à la population québécoise, nous avons choisi de simplement montrer le 50^e. Voir le mémoire de Marianne Lipp pour plus d'explications.

Un tableau figurant à l'annexe III présente les critères sélectionnés pour les 14 indicateurs climatiques de la plateforme.

Les fichiers au format GeoTIFF sont donc ensuite classés dans des dossiers portant le nom de chaque indicateur et leurs critères afin qu'on les retrouve plus facilement. En plus d'extraire les fichiers, le script permet aussi de manipuler les cartes afin de les rendre plus lisibles dans l'outil. En effet, comme on peut le voir à la figure 3.2a, lorsque les cartes sont extraites du serveur, elles ne sont pas découpées sur le territoire du Québec.



a) Carte extraite de *Portraits climatiques* sans modification.

b) Carte avec découpage pour la province du Québec.

Figure 3.2 Exemple de découpage de la carte de projections climatiques extraite de *Portraits climatiques*. La carte montre les évènements de gel-dégel annuels, selon le scénario climatique SSP3-7.0 et un horizon temporel de 2070 à 2100

Les données se trouvant sur un polygone plus grand que la province, il faut donc découper les cartes de façon à ce qu'il reste uniquement le Québec. À l'aide du logiciel de traitement de données géospatiales QGIS (Quantum Geographic Information System), le script utilise le découpage administratif de la province provenant de Données Québec pour découper chaque carte afin d'obtenir le résultat final, soit une carte avec des projections climatiques pour l'ensemble du Québec. La figure 3.2b illustre le résultat obtenu pour la carte après avoir procédé au découpage à l'aide du logiciel QGIS.

3.6.2 Atlas hydroclimatique du Québec méridional

Parmi les indicateurs présentés au tableau 3.2, cinq d'entre eux se retrouvent dans l'AHQM. Ces indicateurs ont été choisis pour représenter les crues, ou la montée brusque des eaux de rivières et fleuves, et les étiages au Québec. Tel que mentionné à la section 2.3.2.4 de la revue de littérature, il existe trois types de descripteurs pour montrer le signal de changement, c'est-à-dire la façon d'exprimer les résultats sur la carte. Parmi les différentes variables telles que la direction, l'ampleur et la dispersion, nous avons opté pour l'ampleur comme variable afin de présenter des résultats quantitatifs plutôt que qualitatifs. Comme le souligne le guide *Parler efficacement des changements climatiques* de l'INSPQ (2024b), il est nécessaire de présenter des résultats concrets pour sensibiliser la population.

Les indicateurs sélectionnés sont présentés au tableau 3.3 en précisant le nom de l'indicateur dans l'outil, son nom donné dans l'AHQM puis le nom de la variable nécessaire pour extraire les cartes voulues.

Tableau 3.3 Indicateurs climatiques pour les aléas crues et sécheresses.
Tiré du mémoire de Marianne Lipp (2025)

Nom de l'indicateur dans l'outil	Nom de l'indicateur dans l'AHQM	Nom de la variable dans l'AHQM
Hausse modérée du niveau de l'eau au printemps (crue printanière)	Débit journalier maximal sur la période hiver-printemps de récurrence de 20 ans	Q1MAX20HP
Hausse exceptionnelle du niveau de l'eau au printemps (crue printanière)	Débit journalier maximal sur la période hiver-printemps de récurrence de 100 ans	Q1MAX100HP
Hausse modérée du niveau de l'eau en été (crue estivale)	Débit journalier maximal sur la période été-automne de récurrence de 20 ans	Q1MAX20EA
Hausse exceptionnelle du niveau de l'eau en été (crue estivale)	Débit journalier maximal sur la période été-automne de récurrence de 100 ans	Q1MAX100EA
Baisse des cours d'eau (Étiage estival)	Débit moyen sur 7 jours minimal sur la période été-automne de récurrence de 10 ans	Q7MIN10EA

3.6.2.1 Utilisation de l'Atlas hydroclimatique pour le territoire du Québec

Pour commencer, comme la figure 3.3 le démontre, l'AHQM est composé de plusieurs segments, appelés tronçons, qui forment le réseau de rivières et cours d'eau du Québec. Pour rappel, le principe de cet atlas est de montrer les effets futurs des changements climatiques sur les cours d'eau au Québec entre 2011 et 2100. Les données sont réparties sur trois horizons de temps, soit l'horizon 30 ans (2011 à 2040), l'horizon 50 ans (2041 à 2070) et l'horizon 70 ans (2071 à 2100).

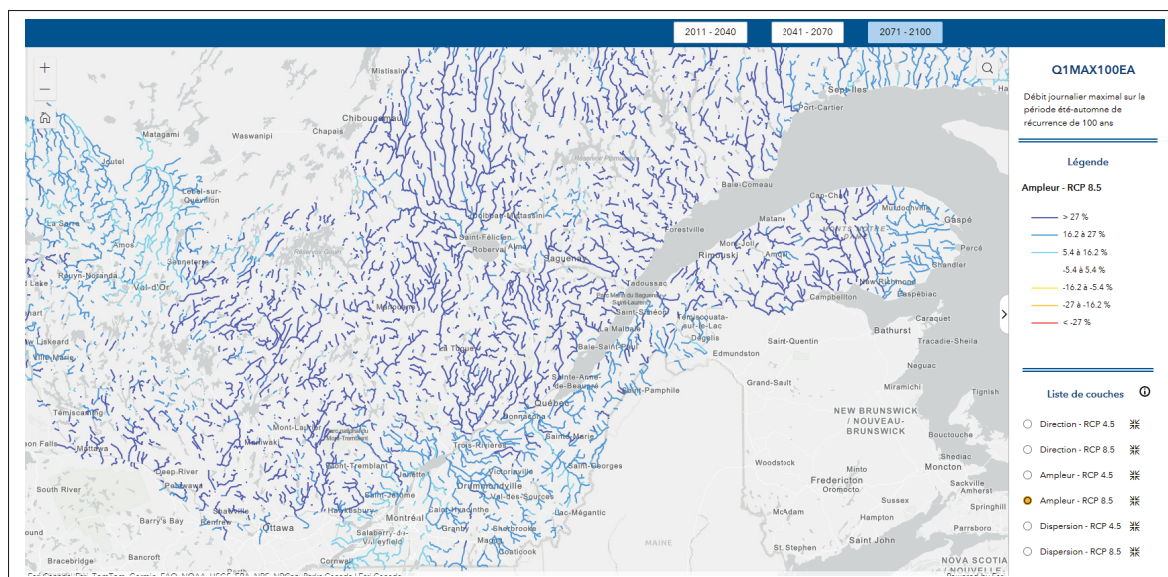


Figure 3.3 Exemple de visualisation des tronçons de l'atlas hydroclimatique.
Tiré de l'*Atlas hydroclimatique du Québec méridional* (MELCCFP, 2025)

Comme les données sont présentées sur les tronçons directement, il est difficile pour la population de se projeter sur les impacts liés aux inondations et sécheresses à leur emplacement. Comme le projet vise principalement la population à grande échelle, il est essentiel de communiquer l'information de manière à ce qu'elle soit accessible et compréhensible par tous. Pour ce faire, deux méthodes ont été évaluées et testées afin de transformer les valeurs des cours d'eau et des rivières pour permettre à la population de visualiser ces indicateurs à leur adresse. La première consiste à utiliser une carte des bassins versants au Québec pour faire une moyenne régionale de tous les tronçons qui se retrouvent dans un bassin. L'autre consiste à appliquer une méthode similaire mais en fonction des régions administratives plutôt que des bassins versants.

Les deux méthodes décrites ci-dessous ont été testées afin de déterminer laquelle d'entre elles serait la plus appropriée pour son utilisation dans ce projet.

3.6.2.2 Méthode par bassin versant

La première méthode consiste à utiliser la carte de Bassins hydrographiques multiéchelles du Québec provenant de www.donneesquebec.ca. Comme la figure 3.4 le présente, la carte des bassins hydrographiques, ou bassins versants, permet de visualiser tous les bassins sur huit niveaux d'échelle différents, soit des bassins de quelques kilomètres carrés allant jusqu'à 175 000 kilomètres carrés. La figure montre aussi les tronçons de l'AHQM pour voir leur interaction.

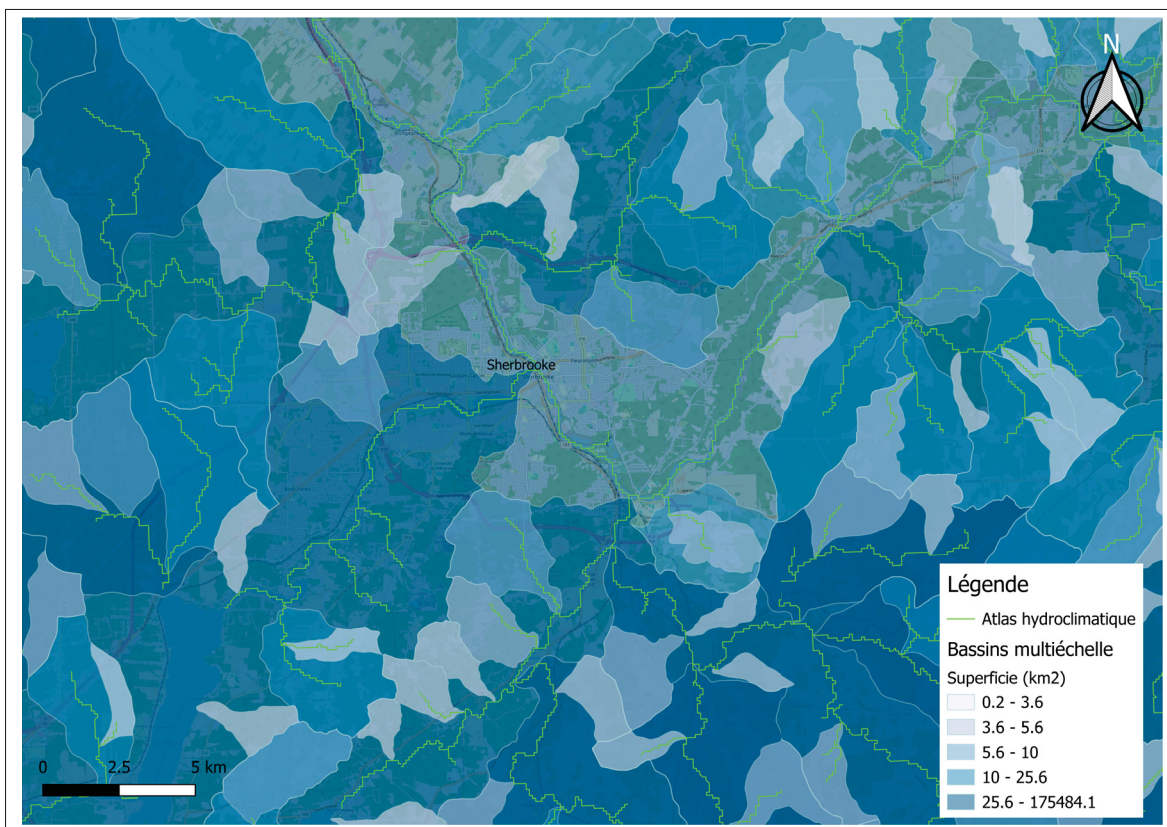
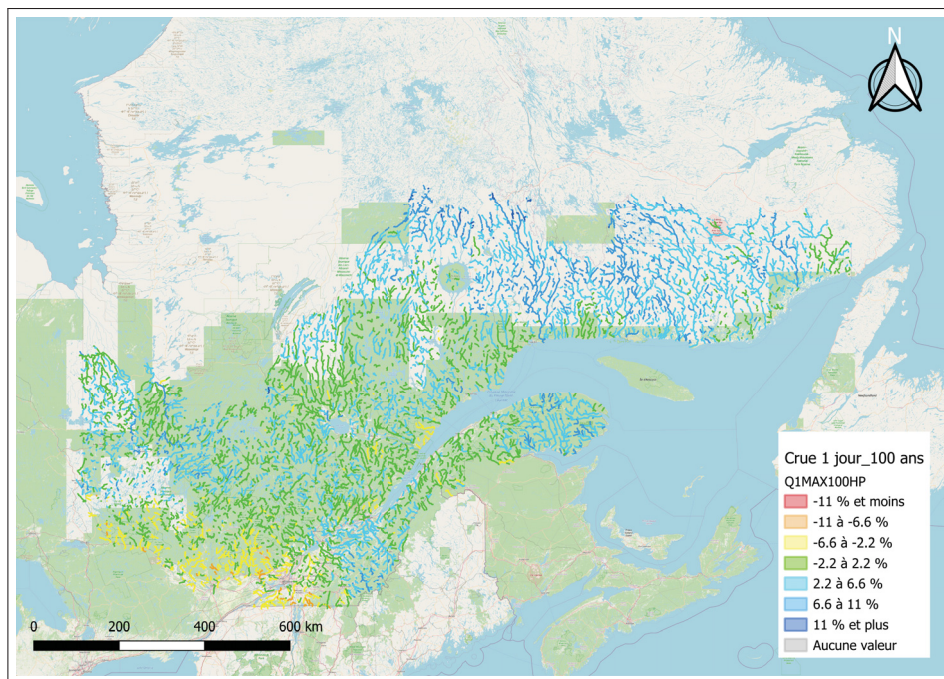


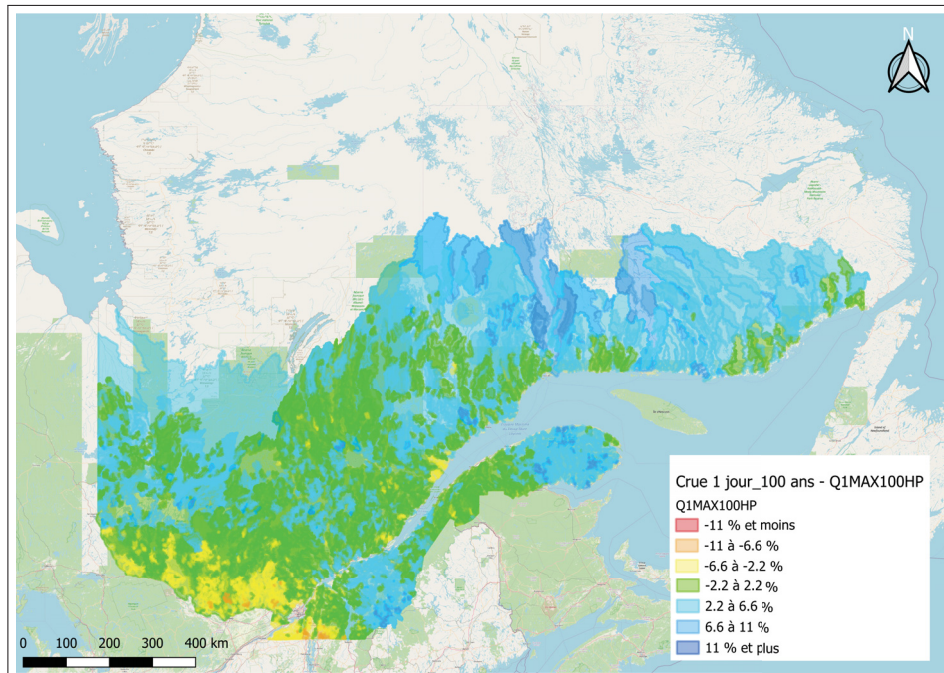
Figure 3.4 Visualisation des **Bassins hydrographiques multiéchelles du Québec** avec les tronçons de l'AHQM pour la ville de Sherbrooke et les environs

La méthode par bassin versant superpose les tronçons de l'AHQM pour une variable donnée et effectue une moyenne par bassin versant, en prenant la valeur de chaque tronçon qui se trouve à l'intérieur de la géométrie. L'utilisation de cette méthode est effectuée à l'aide de l'application QGIS avec la fonction *Join attributes by location (summary)*. Cette fonction permet de joindre

les attributs de deux couches de données différentes, soit la carte des bassins versants et une variable sélectionnée de l'AHQM, puis de choisir de quelle façon les couches seront fusionnées. Dans ce cas-ci, nous avons choisi de fusionner les valeurs des tronçons de l'atlas hydroclimatique à l'intérieur de chaque bassin versant sur la carte du Québec. Cette opération a donc permis d'obtenir une valeur facilement utilisable par l'outil lorsqu'on sélectionne un emplacement de la carte qui ne se retrouve pas sur les cours d'eau ou rivières. La figure 3.5 montre l'avant-après de la manipulation, avec en 3.6a les tronçons issus de l'AHQM pour la variable de **crue printanière** avec une récurrence de 100 ans, un horizon temporel de 30 ans (ou 2011 à 2040) et un scénario climatique RCP8.5. La figure 3.6b montre la carte une fois fusionnée avec les bassins versants du Québec.



a) Carte extraite de l'AHQM sans modification.

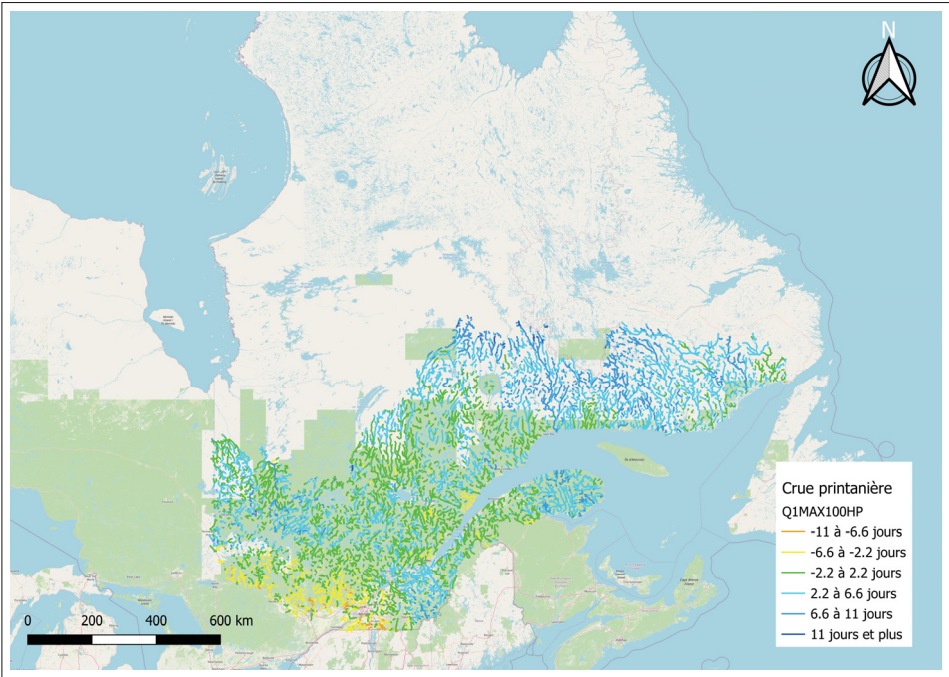


b) Carte avec la méthode par bassins versants.

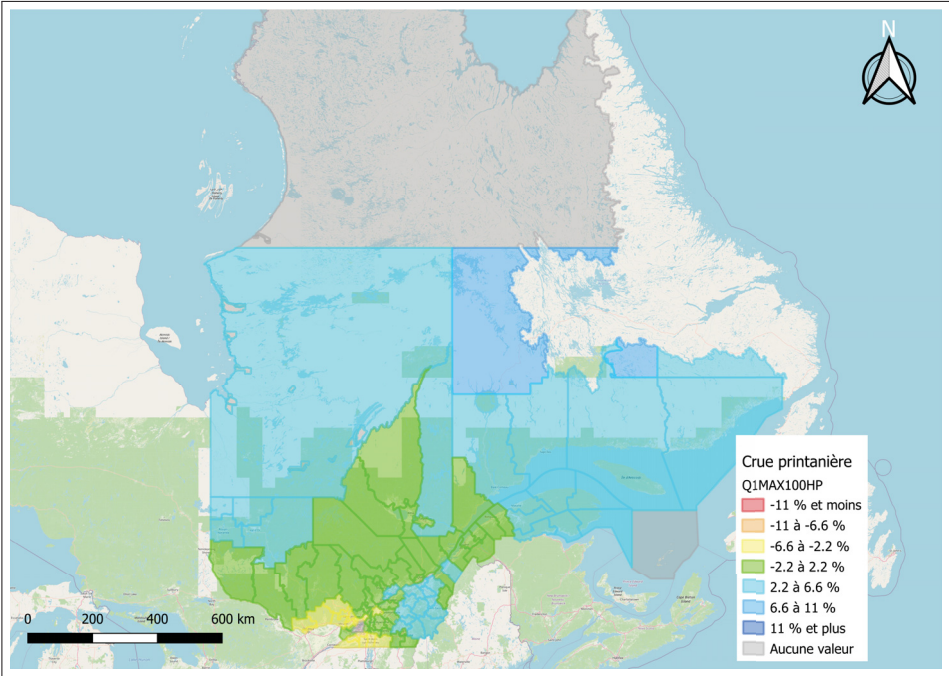
Figure 3.5 Exemple de fusion entre la carte des bassins versants et l'AHQM pour la variable Q1MAX100HP

3.6.2.3 Méthode par séparation des régions administratives

La deuxième méthode testée est comparable à la première en terme de fonctionnement mais utilise la carte du découpage administratif du Québec. L'idée de cette approche est d'avoir une vision différente de l'écoulement des eaux au Québec, puisqu'un problème peut survenir avec la méthode précédente, soit le fait que les débits en amont et en aval des grands bassins versants peuvent grandement varier, causant ainsi une moyenne non représentative sur la géométrie. En effet, plus un bassin versant est grand, plus le débit en aval sera grand et très différent de celui en amont (Annie Poulin, 2025). Cette méthode propose donc de faire des moyennes par découpages administratifs afin d'avoir des valeurs par régions au Québec. La figure 3.6 montre la méthode appliquée à la variable de crue printanière avec une récurrence de 100 ans, un horizon temporel de 30 ans (de 2011 à 2040) et un scénario climatique RCP4.5.



a) Carte extraite de l’AHQM sans modification.



b) Carte avec la méthode par régions administratives.

Figure 3.6 Exemple de fusion entre la carte du découpage administratif et l’AHQM pour la variable Q1MAX100HP

3.6.2.4 Méthode choisie

À la suite d'une nouvelle rencontre avec les experts, la méthode par bassins versants a été sélectionnée. En effet, en évaluant les deux méthodes proposées, celle qui comporte le plus d'avantages et de précision est la méthode utilisant les bassins versants comme outil d'analyse. Elle permet d'utiliser de plus petites géométries et d'éviter d'avoir de trop grandes surfaces comportant trop de cours d'eau. Malgré le fait que certains bassins versants peuvent avoir une grande superficie, les régions administratives restent trop grandes pour faire des moyennes de débits avec les tronçons qui les regroupent. Comme on peut le voir à la figure 3.6, lorsqu'on observe les tronçons de la variable de crue printanière en 3.6a, on voit explicitement une grande différence entre le sud du Québec et la partie plus au nord, avec des variables passant d'une augmentation du nombre de crues de 11 jours et plus à une diminution de 11 jours. La figure 3.5, quant à elle, montre beaucoup plus précisément la tendance de l'AHQM par les bassins versants au Québec. De plus, comme l'AHQM n'est représentée que pour la partie sud de la province, un problème survient lors de l'application de la méthode par régions. Certaines régions ont très peu de données dans leur géométrie mais vont tout de même afficher une valeur moyenne pour toute la région.

Il convient tout de même de mentionner une limite de cette méthode. En effet, la carte de bassins versants multiéchelle est constituée de huit couches superposées les unes sur les autres, ce qui pose un problème pour le rapport personnalisé. Le rapport, comme décrit à la section 4.2.6, prend la valeur de l'indicateur dans la carte pour construire son système de score sur cinq. Malgré le fait que la méthode réussit très bien à représenter visuellement les crues au Québec, cela pose un problème puisque plusieurs couches sont superposées et le code recevra donc plus d'une valeur dans certains cas. Plus de détails seront mentionnés dans les perspectives futures (section 4.4.2).

La figure 3.7 montre un exemple de l'indicateur Q7MIN10EA où on peut apercevoir la superposition des bassins versants de différentes échelles.

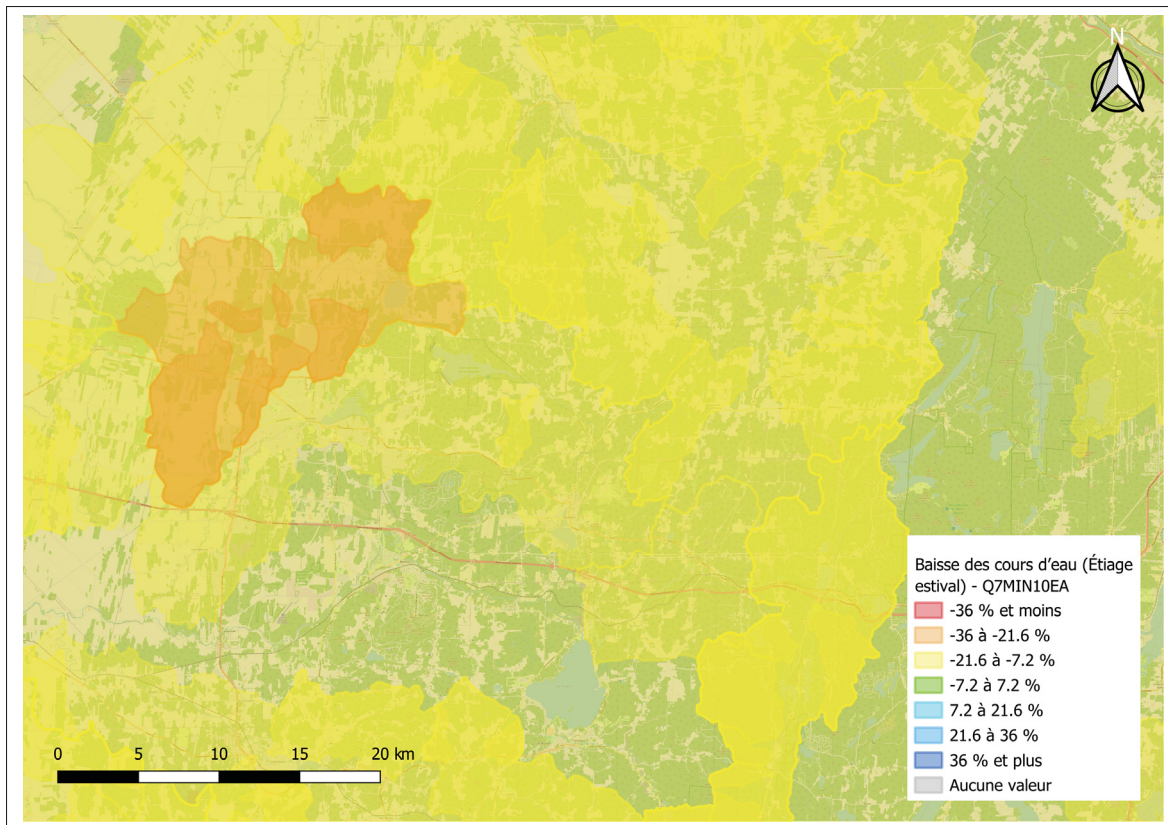


Figure 3.7 Visualisation de la carte interactive pour l'indicateur de baisse des cours d'eau (étiage estival) - Q7MIN10EA

3.6.3 PAVICS

L'outil PAVICS, tel qu'il a été décrit à la section 2.3.1.4, permet d'analyser, de manipuler et d'extraire une grande quantité de données de projections climatiques pour le Québec et même le Canada. Malgré le grand nombre de possibilités de la plateforme, PAVICS reste un outil très complexe dans son utilisation et nécessite de très bonnes compétences en Python pour l'utiliser à son plein potentiel. Comme l'indique Marianne Lipp dans son mémoire, plusieurs indicateurs ont initialement été sélectionnés sur PAVICS puisqu'ils offrent plus de précision et de flexibilité que les autres plateformes existantes.

Une méthodologie a été élaborée en début de projet, utilisant le code pour modéliser des indicateurs climatiques sur le portail de l'application. Cela a permis de tester plusieurs variables

et de comprendre le fonctionnement de PAVICS. L'outil a toutefois été écarté pour l'instant puisque le processus d'analyse et d'extraction de données est trop complexe pour le présent mémoire. De plus, à la suite d'une rencontre avec Travis Logan, le responsable des plateformes de données climatiques d'Ouranos, il nous a été recommandé d'utiliser l'outil Portraits climatiques en fonction des besoins de l'outil en développement. Selon le responsable, une mise à jour importante de l'application est en cours de développement et permettra à un plus grand nombre d'utilisateurs de manipuler les données et de les extraire plus facilement. Plusieurs fonctionnalités étant très difficiles à utiliser pour la plupart des utilisateurs, la mise à jour vise à faciliter le travail des analystes et à rendre l'outil plus accessible pour tous.

3.7 Extraction des données de vulnérabilité

Tel que mentionné à la section 3.4, l'outil comporte **20 indicateurs de vulnérabilité**. Les prochaines sections présentent la méthodologie derrière l'extraction et la manipulation des cartes de vulnérabilité. Le tableau à l'annexe IV présente tous les indicateurs en fonction de leur aléa, du nom identifié sur le portail de données, du nom donné à la variable dans l'outil en développement et de la source de données.

3.7.1 Cartes de vulnérabilité de la ville de Montréal

Les cartes provenant de l'analyse de vulnérabilité de la VDM (voir section 2.3.3) sont toutes extraites du portail de Données Montréal. Sauf pour la carte de vulnérabilité aux crues, la carte des dépôts meubles, des îlots de chaleur et des cuvettes de rétention, les cartes sont téléchargées telles quelles du portail et sont mises dans la base de données pour leur utilisation. Elles comportent toutes une échelle, établie par l'étude de vulnérabilité de la VDM, de un à cinq. Une valeur de un représente une vulnérabilité « non significative » alors qu'une valeur de cinq représente une vulnérabilité « majeure ».

La seule carte provenant de l'analyse de vulnérabilité de la VDM nécessitant une modification est la carte de vulnérabilité aux crues. En effet, contrairement aux autres cartes, elle contient

un sixième type de valeur au lieu du 1 à 5 comme utilisé par les autres cartes par le BTER. Comme la carte montre la vulnérabilité aux crues de l'agglomération de Montréal, les valeurs sont surtout représentées près de la rivière des Prairies et du lac des Deux Montagnes sur la rive nord de l'île. C'est pourquoi le reste de l'île de Montréal, qui n'est pas à proximité de ces cours d'eau, n'est pas touché par la vulnérabilité.

Le BTER a donc décidé de créer une sixième variable appelée « NoData » ou "sans donnée". Cependant, cette variable fait en sorte que l'outil est incapable de lire la carte et crée une erreur lors de l'affichage de cette carte puisque les valeurs sont maintenant identifiées comme un mot et non un nombre. De plus, comme nous ne souhaitons avoir que des valeurs entre un et cinq dans l'outil (voir le mémoire de Marianne Lipp pour les détails), il est impossible d'ajouter une valeur de zéro pour les emplacements sans chiffre. Nous avons donc fait le choix de convertir toutes les mailles contenant l'information « NoData » pour leur donner une valeur de 1, ce qui correspond à la catégorie de *non significatif* selon le BTER et permet donc au reste de l'île d'avoir une vulnérabilité aux crues non significative. Cette manipulation a été réalisée à l'aide de QGIS.

3.7.2 Autres bases de données utilisées pour la vulnérabilité

Certaines cartes présentant des indicateurs intéressants pour l'outil ne se retrouvent pas dans l'analyse de vulnérabilité de la VDM. En effet, pour trois cartes parmi les vingt indicateurs de vulnérabilité, nous les avons extraites de différentes plateformes.

3.7.2.1 Carte des dépôts meubles

La carte des dépôts meubles montre les zones sensibles au phénomène de retrait qui sont utilisées comme seuils de la sensibilité physique territoriale aux sécheresses pour la plateforme. Les zones soumises à exposition se réfèrent aux secteurs constitués d'argile, tels qu'ils ont été stipulés dans la carte des dépôts meubles de 1975 établie par la VDM. Cette carte présente les différents types de sols ainsi qu'un code leur étant assigné (de 1 à 9, avec des sous-codes tels que a, b, c).

Les zones classées sous les codes 8 ou 9 sont principalement composées d'argile et sont par conséquent considérées comme sensibles.

La plateforme en développement se voulant un outil de sensibilisation simple pour la population, la carte des dépôts meubles a été simplifiée pour ne comporter que cinq seuils de vulnérabilité, allant de *non significatif* à *Majeur*. Le tableau 3.4 présente les différentes zones de la carte de dépôts meubles et leur classe.

Tableau 3.4 Seuils de l'indicateur Contraction des sols ; géologie des dépôts meubles (code).
Tiré du mémoire de Marianne Lipp (2025)

Non significatif	Mineur	Modéré	Élevé	Majeur
1, R, Rm	7, 7a, 6, 1-3, 1-2, 1-2-3, 2, 2a, 2b, 2bc	3	4	2c, 5, 5a, 9, 9a, 9b, 8, 8a, 8/7

Pour effectuer la modification de la carte et classer les différentes zones dans les seuils, l'outil QGIS a été utilisé. Une simple manipulation a permis de transformer les 24 valeurs de zone sensible en cinq classes distinctes. Un script de code a été fait directement dans QGIS pour faire la manipulation, présenté comme suit :

Algorithme 3.1 Expression QGIS pour l'attribution d'une valeur numérique selon la classe de dépôts meubles

```

1 CASE
2   WHEN "Name" IN ('1', '1?', 'R', 'R?', 'Rm') THEN 1
3   WHEN "Name" IN ('7', '7a', '6', '6?', '1-3', '1-2-3', '2',
4     '2b', '2b_c', '2a', '1-2') THEN 2
5   WHEN "Name" IN ('3', '3?') THEN 3
6   WHEN "Name" = '4' THEN 4
7   WHEN "Name" IN ('9', '9a', '9b', '8', '8/7', '8a', '5',
8     '5-5a?', '5a', '2c') THEN 5
9   ELSE NULL
10  END

```

Cet algorithme permet donc de classer chaque valeur dans un des cinq seuils établis par Marianne Lipp dans son mémoire.

3.7.2.2 Carte des îlots de chaleur

La cartographie des îlots de chaleur urbains du Géoportail de santé publique du Québec permet de visualiser les îlots de fraîcheur et de chaleur au Québec. Cette carte couvre les zones urbaines du Québec, soit toutes les localités de plus de 1000 habitants présentant une densité supérieure à 400 habitants/km² (INSPQ, 2024a).

La carte est présentée sous cinq classes, soit :

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

Comme la carte est déjà dans le format voulu pour l'outil en développement, aucune manipulation n'est nécessaire. Elle est donc directement téléchargée du portail de Données Québec (INSPQ, 2023) et ajoutée à la base de données.

3.7.2.3 Carte des cuvettes de rétention d'eau de ruissellement à Montréal

La carte des cuvettes de rétention d'eau permet de visualiser les endroits à Montréal où l'eau de pluie s'accumule et n'est pas absorbée par la végétation ou envoyée dans le système d'égout. La carte est tirée des Données ouvertes, disponibles sur le portail de la Ville de Montréal (2025a).

Une fois la carte extraite du portail, deux problèmes ont été identifiés avant de pouvoir l'ajouter à la base de données. Le premier problème est qu'aucune valeur n'existe pour tous les endroits

qui ne disposent pas de cuvette dans la ville, alors que, tel que mentionné dans le mémoire de Marianne Lipp, il doit y avoir une valeur de un à cinq partout dans Montréal.

Le deuxième problème provient du fait que les valeurs de cuvettes sont données sous forme de classes comme suit :

- 0 à 50 mm
- 50 à 100 mm
- 100 à 300 mm
- > 300 mm

Ces classes sont données sous forme de texte, ce qui pose un problème pour la lecture de la carte puisque la carte interactive en développement doit lire des données sous forme de chiffre. On doit donc transformer ces classes en chiffres. Les classes varieront de deux à cinq pour la carte des cuvettes puis une valeur de un sera donnée aux endroits qui n'ont tout simplement pas de cuvette de rétention (voir le mémoire de Marianne Lipp pour plus d'information concernant la catégorisation de un à cinq pour les données). La carte de *limites administratives de l'agglomération de Montréal* (Ville de Montréal, 2025b) servira pour donner une valeur de un aux endroits sans cuvette.

Tout d'abord, les cartes fournies par la VDM ne sont pas valides. En effet, les géométries présentées dans les fichiers comportent des erreurs et ne permettent pas le traitement de données. Avant de pouvoir les manipuler, on doit utiliser la fonction *fix geometry* dans l'outil QGIS afin de régler le problème et pouvoir faire des manipulations sur les cartes. Cela permet de réparer toutes les géométries des deux cartes.

Pour que la carte de cuvettes fonctionne avec l'outil en développement, on doit ajouter une colonne dans la table d'attribut avec une formule permettant de convertir les classes en chiffres de deux à cinq, présentés dans l'algorithme 3.2.

Algorithme 3.2 Expression QGIS pour l'attribution de valeur numérique selon la classe de
cuvette

```

1 CASE
2   WHEN "classe" = '0 à 50 mm' THEN 2
3   WHEN "classe" = '50 à 100 mm' THEN 3
4   WHEN "classe" = '100 à 300 mm' THEN 4
5   WHEN "classe" = '> 300 mm' THEN 5
6   ELSE 1
7 END

```

La formule permet de prendre chaque classe sous format texte et de la classer entre deux et cinq, tel que présenté dans le tableau suivant :

Tableau 3.5 Correspondance entre les classes de
cuvettes et les valeurs numériques

Classe de cuvette	Valeur numérique
Zone sans cuvette (valeur par défaut)	1
0 à 50 mm	2
50 à 100 mm	3
100 à 300 mm	4
> 300 mm	5

On fait ensuite une fonction *différence* entre les deux cartes, qui permet d'obtenir une carte avec toutes les zones dans lesquelles aucune cuvette n'existe. Cette fonction prend les polygones qui forment les cuvettes de rétention et découpe les zones vides (ou sans cuvette) dans la carte de limites administratives pour créer une nouvelle carte comprenant tous les espaces sur lesquels aucune cuvette n'existe.

Une fois les deux cartes ajustées et mises en forme, on peut simplement les fusionner ensemble à l'aide de la fonction *merge vector layer* pour avoir une carte complète de la VDM montrant les cuvettes et permettant d'avoir un score de un à cinq selon la classe de cuvette.

CHAPITRE 4

RÉSULTATS

Le présent chapitre est divisé en trois parties présentant les divers aspects traités dans le mémoire. La première partie consiste en la présentation et l'analyse d'un sondage effectué auprès de la population ainsi que l'aspect communication du projet. La deuxième partie présente les résultats de modélisation en montrant le parcours d'un utilisateur pour le fonctionnement de l'outil et les choix de conception et la troisième en un sommaire des choix faits pour la programmation de l'outil. Finalement, la quatrième section présente les perspectives futures du projet.

4.1 Communication et sondage

Tel que mentionné à la section 2.5.1.2, l'INSPQ propose cinq stratégies pour la sensibilisation et la communication sur les changements climatiques. La première de ces stratégies, adapter le contenu au public cible, a mené à l'idée de faire un sondage auprès de la population afin d'aider à orienter les choix de conception de l'outil et de comprendre l'opinion et les connaissances des personnes sur les changements climatiques et la résilience climatique. Le sondage a été réalisé auprès de 113 personnes, dont 57 % font partie de la tranche d'âge des 20 à 29 ans.

Selon le *Baromètre de l'action climatique* (Champagne St-Arnaud *et al.*, 2024), 25 % de la population possèdent un niveau de connaissance sur les enjeux climatiques faible, 46 % un niveau modéré et seulement 29 % un niveau élevé. Cela démontre un manque d'information pour une grande partie de la population. La figure 4.1 montre les résultats du sondage sur des questions comparables à celles du baromètre, soit sur le niveau de connaissance de la population sur les changements climatiques et la résilience, sur une échelle d'autoévaluation de un à dix.

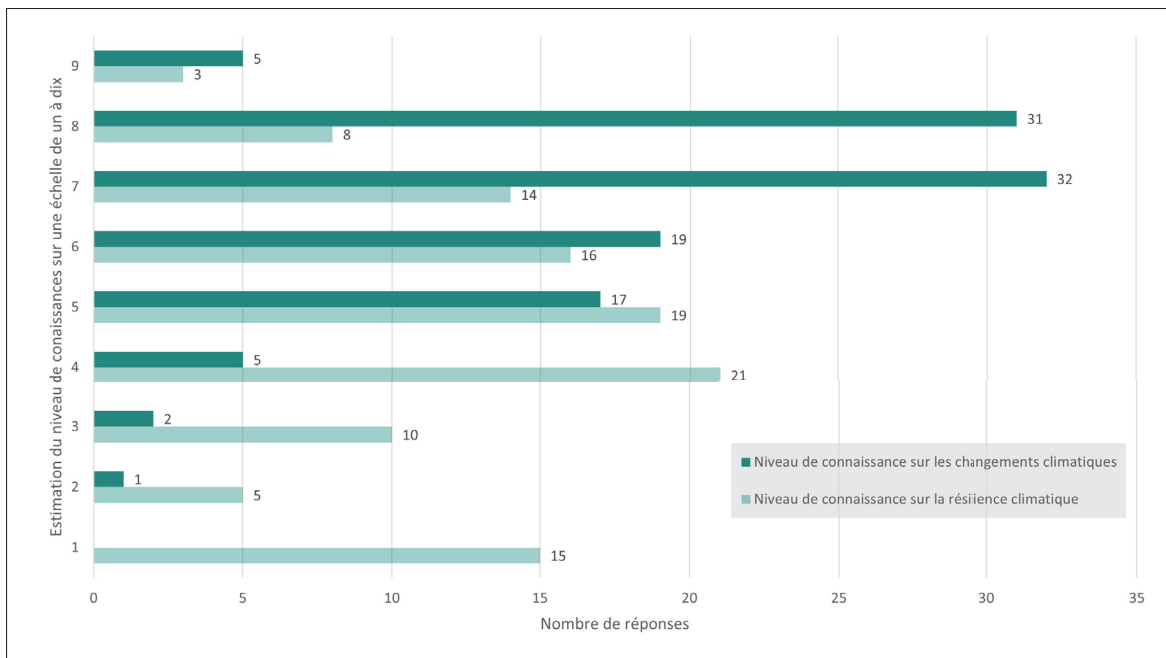


Figure 4.1 Graphique présentant l'estimation du niveau de connaissance de la population sur les changements climatiques et la résilience

En observant les résultats de la figure 4.1, on peut voir que les répondants estiment qu'ils ont un niveau de connaissance sur les changements climatiques et la résilience de sept et moins pour 68 % et 90 % respectivement. De plus, près de la moitié des personnes estiment avoir un niveau de connaissance sur la résilience climatique inférieur à cinq sur dix. Cela souligne l'importance de sensibiliser la population et met en évidence l'utilité d'un outil comme la carte interactive.

4.1.1 Changements climatiques

La première partie du sondage porte sur des questions visant à connaître les connaissances et inquiétudes de la population face aux changements climatiques. La figure 4.2 illustre les événements climatiques les plus préoccupants pour la population, ainsi que ceux qui ont été vécus. En observant les résultats, on peut voir que les aléas qui inquiètent le plus la population sont aussi ceux qui sont le plus vécus, démontrant ainsi l'effet que peuvent avoir ces événements extrêmes sur les personnes. Ces chiffres viennent rejoindre les conclusions issues du *Baromètre*

de l'action climatique (Champagne St-Arnaud *et al.*, 2024), qui démontre que « 67 % des Québécoises et des Québécois rapportent avoir subi des effets négatifs liés à la crise climatique au cours des dernières années ».

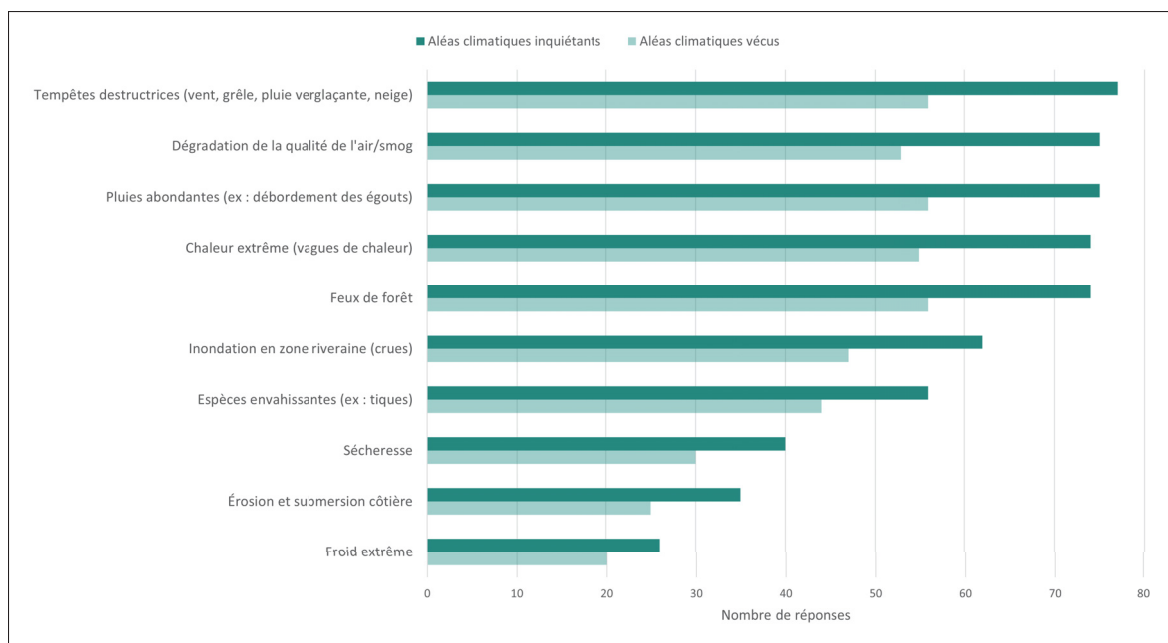


Figure 4.2 Graphique présentant quels aléas climatiques ont été vécus par la population et lesquels sont les plus inquiétants

La figure 4.3 montre que 70 % des répondants considèrent que leur région est particulièrement vulnérable aux changements climatiques. Cela va à l'encontre des données du baromètre, qui indiquent que seuls 39 % des citoyens pensent que le Québec est confronté à une menace élevée en raison des changements climatiques.

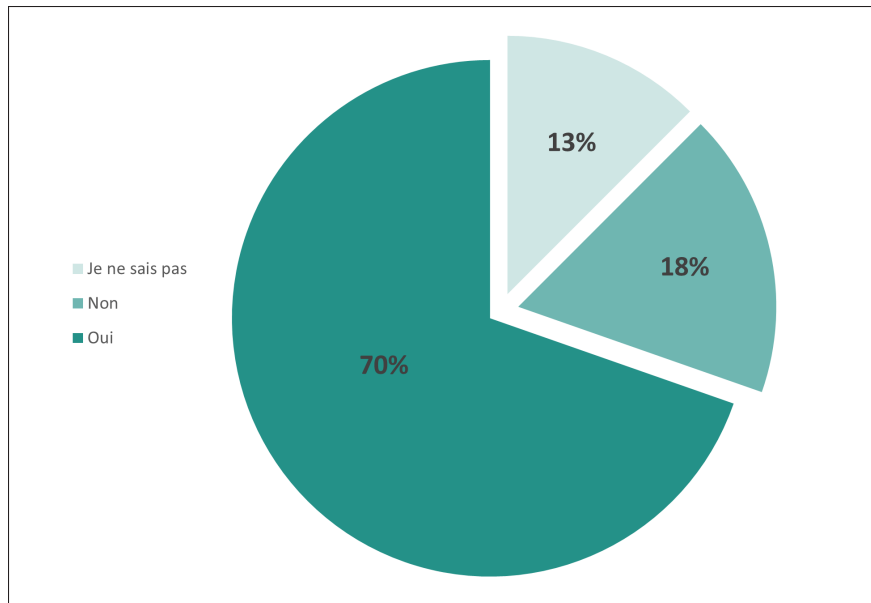


Figure 4.3 Graphique présentant la réponse face à la question :
Pensez-vous que votre région est particulièrement vulnérable aux
changements climatiques ?

En effet, en observant la figure 4.4, on observe que la population québécoise se sent très peu menacée individuellement par les changements climatiques à court terme, mais que plutôt leur région et province le sont.

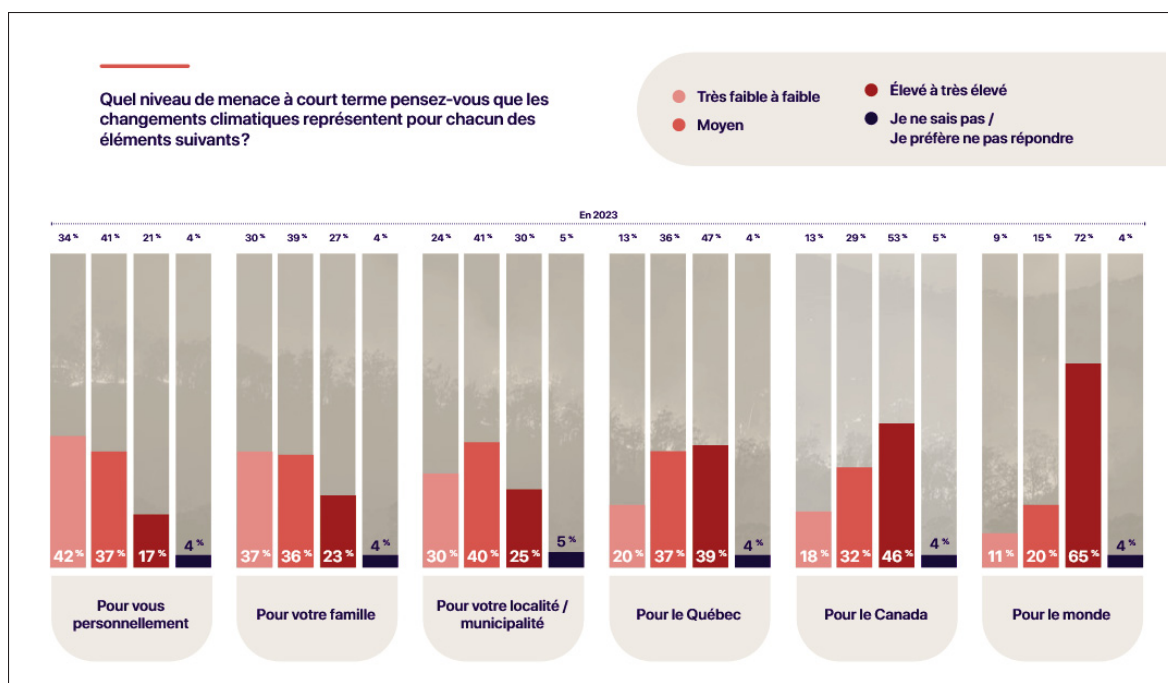


Figure 4.4 Niveau de menace climatique à court terme perçu par les Québécoises et les Québécois.

Tiré de Champagne St-Arnaud *et al.* (2024)

Dans le but d'interroger la population sur l'influence des changements climatiques sur leurs habitudes de vie, 92 % ont déclaré avoir apporté des modifications pour diminuer leur impact sur l'environnement. La figure 4.5 présente les différentes catégories proposées dans le sondage pour déterminer quels ont été ces changements. Parmi les actions entreprises, le covoiturage et les transports en commun, le compostage, l'achat de biens usagés et la diminution ou suppression de la consommation de viande sont les plus sélectionnées, avec 82, 75, 69 et 64 réponses respectivement.

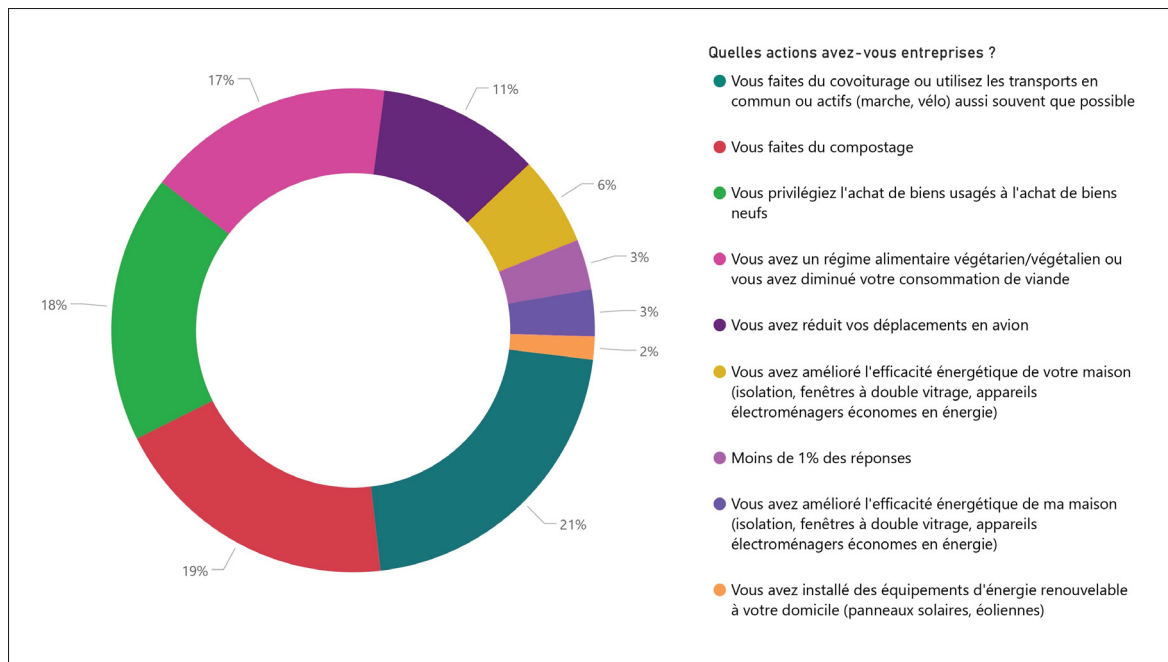


Figure 4.5 Graphique présentant quelles actions individuelles ont été entreprises pour réduire l'impact environnemental de la population

Pour terminer le volet changements climatiques, seulement 26 des 113 répondants ont déjà utilisé un outil canadien permettant de visualiser les impacts des changements climatiques, et la plupart ont mentionné les outils utilisant les données d'Ouranos.

4.1.2 Résilience climatique

La deuxième partie du sondage porte sur la résilience climatique. Le but de ce volet est de voir quels sont les intérêts de la population sur les mesures d'adaptation possibles et quel genre d'informations il serait pertinent de mettre dans l'outil en conception. Selon le questionnaire, près de la moitié des répondants n'a jamais entendu parler de ce concept.

En sondant la population sur la capacité d'adaptation des infrastructures actuelles, la plupart des réponses obtenues mentionnent qu'elle est insuffisante pour faire face à la crise climatique. Un bon nombre de réponses évoquent le manque de ressources offertes par les villes et les infrastructures vieillissantes en mauvais état. En termes de mesures d'adaptation qui devraient être mises en

place dans leur communauté, près de la moitié des personnes mentionnent l'implémentation de plus d'espaces verts comme des parcs éponges et des toitures végétalisées, et l'augmentation de l'efficacité énergétique des bâtiments et des habitations. Certains mentionnent aussi de mettre de l'avant la mobilité durable avec le transport en commun et le transport actif, d'autres de sensibiliser la population à la crise environnementale et de l'intégrer dans le système scolaire.

Lorsqu'interrogés sur le type de mesures qu'ils seraient prêts à mettre en place sur leur propriété, la figure 4.6 montre que les répondants priorisent d'abord les mesures d'efficacité énergétique et la réduction de la chaleur ressentie et se sentent moins affectés par la prévention des inondations.

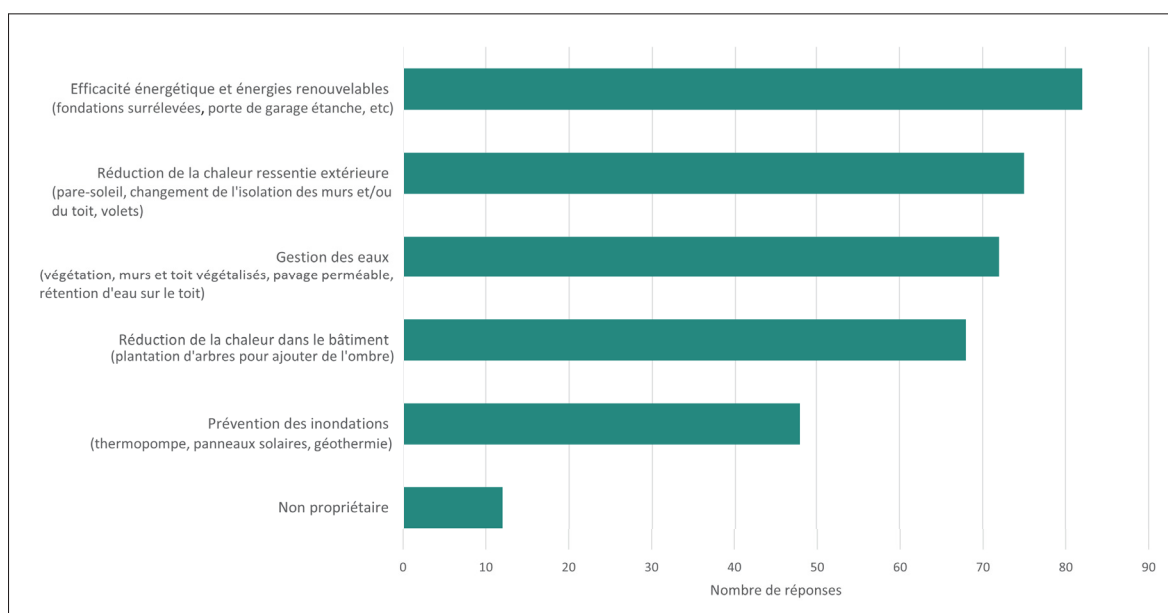


Figure 4.6 Graphique présentant le type de mesure que la population serait prête à mettre en place sur sa propriété

La question « *Quels types d'informations souhaiteriez-vous avoir sur les mesures d'adaptation ?* » a pour but de mieux comprendre les intérêts de la population en matière d'information sur les mesures qui pourraient être proposées par l'outil. Les résultats sont présentés à la figure 4.7.

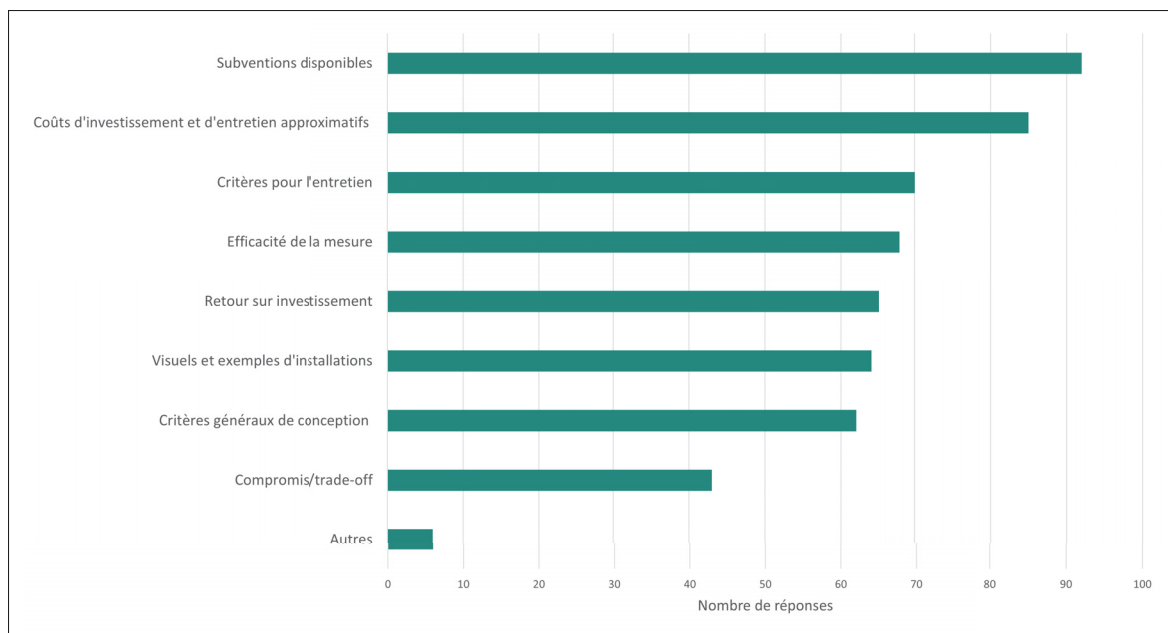


Figure 4.7 Graphique présentant les informations souhaitées sur les fiches de mesures d'adaptation

Les informations les plus demandées par la population concernent les subventions disponibles pour la mise en œuvre des mesures, ainsi que les coûts d'investissement et d'entretien, avec 82 % et 75 % des répondants respectivement. La tendance semble démontrer que les mesures liées à l'entretien et l'investissement sont plus valorisées que les critères de conception. Parmi les autres réponses suggérées, on y retrouve entre autres le gain environnemental et le coût en émissions de CO₂, qui pourrait être une très bonne approche de sensibilisation également.

Enfin, le sondage a permis d'influencer les choix de conception de la plateforme au niveau des aléas climatiques et des mesures d'adaptation proposées. Avec un peu plus d'une centaine de réponses au sondage, il a été conclu que :

- Les aléas climatiques qui inquiètent le plus la population sont la chaleur extrême, les pluies abondantes, les tempêtes destructrices, les feux de forêt et la dégradation de la qualité de l'air ;
- Près de la moitié des personnes n'ont jamais entendu parler de la résilience climatique ;

- L'opinion est assez généralisée sur le fait que les infrastructures actuelles ne sont pas adaptées face aux changements climatiques ;
- 92 % des répondants disent avoir des inquiétudes sociétales face aux changements climatiques. Ces inquiétudes incluent : les effets sur la santé, le vivant et les écosystèmes, l'accès à l'eau et les ressources alimentaires en plus de l'effet sur les démocraties (conflits et tensions géopolitiques, libertés individuelles) ;
- Seulement 23 % disent avoir déjà utilisé un outil de visualisation des changements climatiques ;
- La grande majorité des répondants serait prête à utiliser la carte interactive en développement afin de les aider dans leur choix de conception, de rénovation, de construction ou d'achat.

4.2 Modélisation

La figure 4.8 présente la synthèse des modélisations pour l'outil en développement. Elle permet d'observer les sept aléas climatiques choisis et de voir lesquels sont représentés sous les projections climatiques et lesquels sont sous les analyses de vulnérabilité de la VDM. Elle montre ensuite les différents horizons temporels liés aux projections et à la vulnérabilité, puis les scénarios d'émissions possibles pour les données climatiques.

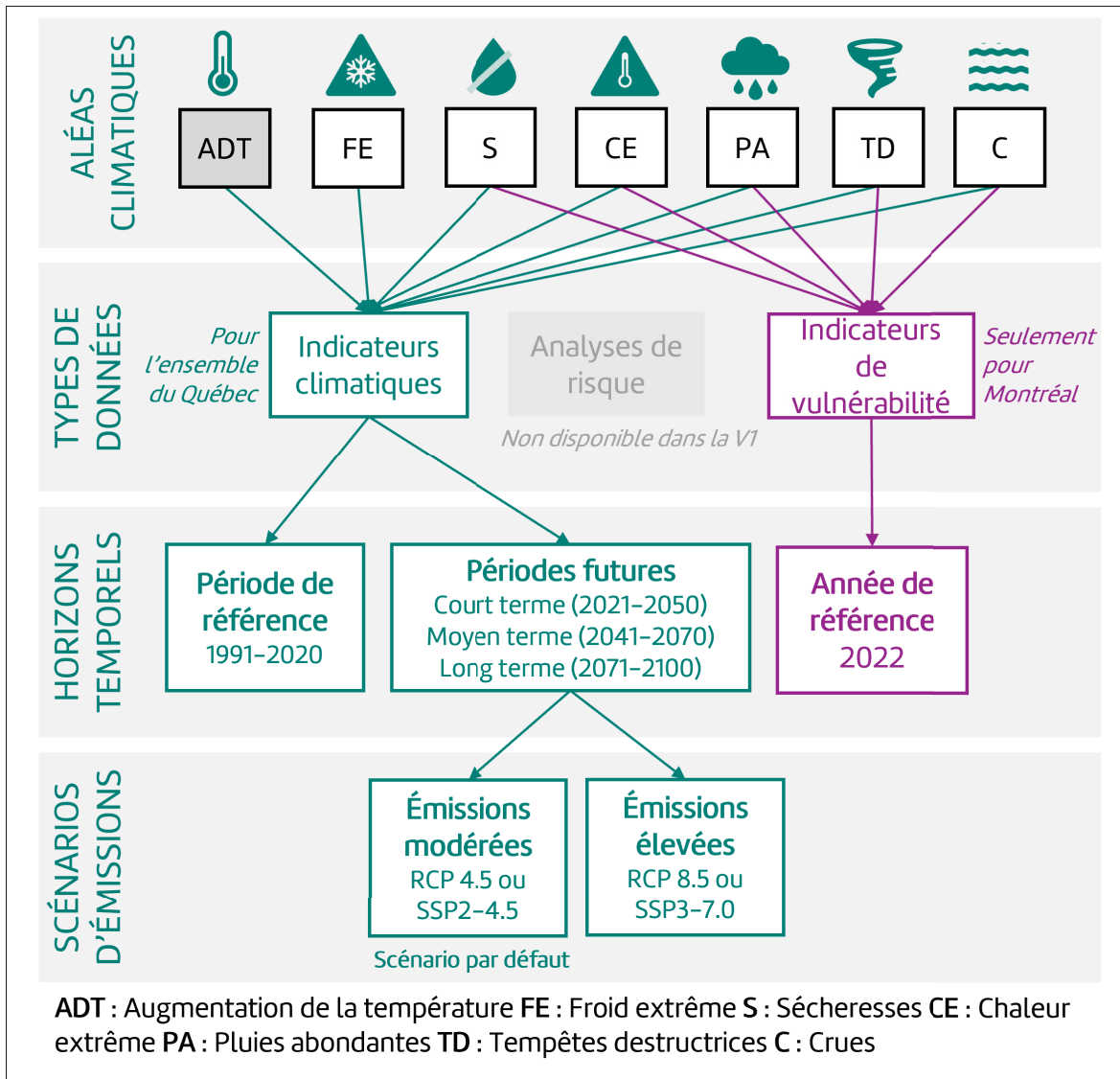


Figure 4.8 Synthèse des modélisations de l'outil

Les sections suivantes présentent le parcours d'un utilisateur typique dans l'outil. Il s'agit du choix de l'aléa climatique, du type d'analyse voulu et de l'indicateur à afficher. Il est également possible de choisir de modifier des paramètres supplémentaires, soit l'horizon temporel et le scénario d'émissions.

4.2.1 Aléas climatiques

La première option pour afficher des données sur la carte interactive est le choix parmi les aléas climatiques, détaillés à la section 3.3 au tableau 3.1. Le choix se fait en appuyant sur l'une des pastilles comme présenté à la figure 4.9. Il est également possible d'observer quatre autres aléas en gris qui ne peuvent pas être sélectionnés, représentant des aléas retenus en vue d'être intégrés dans une future version de l'outil.

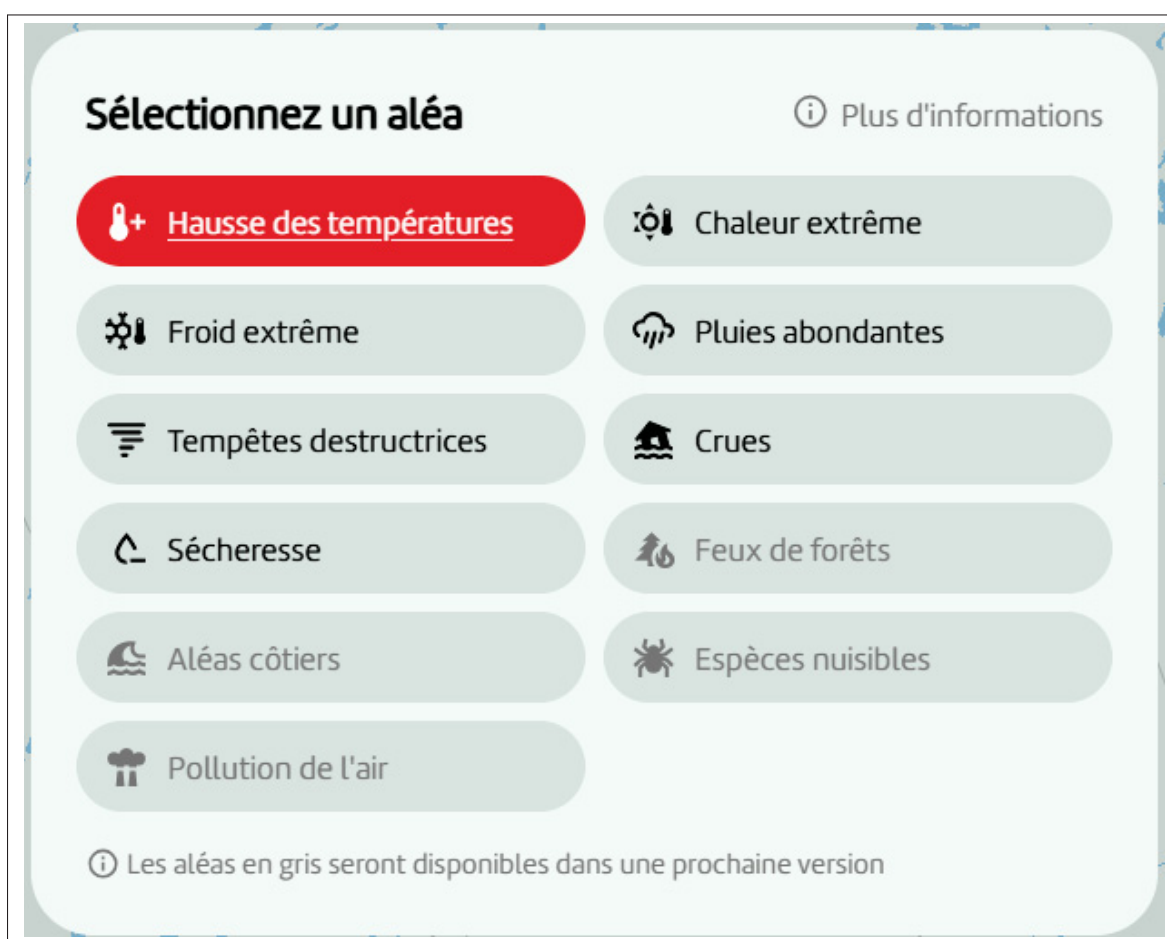


Figure 4.9 Sélection de l'aléa climatique dans l'outil

Il est aussi possible d'appuyer sur l'option *plus d'informations* afin d'avoir une description générale des aléas climatiques, écrite par Marianne Lipp.

4.2.2 Type de données

Une fois l'aléa choisi, l'outil nous mène vers la prochaine option : le choix du type de données. En effet, comme la figure 4.10 le montre, l'utilisateur a le choix entre les projections climatiques et les analyses de vulnérabilité de la VDM. Comme décrit au chapitre 3, en choisissant l'option de projections, l'outil nous permet de visualiser des données climatiques projetant le Québec dans un climat futur, sur plusieurs horizons temporels différents. De l'autre côté, la plateforme permet d'observer les indicateurs de vulnérabilité à l'échelle de Montréal. Au même titre que pour le choix des aléas, l'outil permet aussi d'obtenir plus d'informations sur la sélection.

Sélectionnez un type de données [Moins d'informations](#)

La première version de la carte propose deux types de données. D'une part, des données climatiques qui donnent un aperçu des conditions climatiques passées et de celles possibles dans les décennies à venir. D'autre part, des indicateurs de vulnérabilité (seulement disponibles pour l'agglomération de Montréal), qui montrent dans quelle mesure une communauté, un écosystème ou des infrastructures sont sensibles aux aléas climatiques ou incapables d'y faire face. Pour plus d'informations sur ces aspects, consulter la page d'aide.

Indicateurs climatiques Indicateurs de vulnérabilité

Sélectionnez un indicateur

Nombre de vagues de chaleur ▼

Figure 4.10 Sélection du type de données et de l'indicateur dans l'outil

4.2.3 Indicateurs

Toujours dans la figure 4.10, on aperçoit le troisième et dernier choix de base à faire pour accéder à la carte. Il s'agit des indicateurs. L'outil permet de sélectionner un indicateur selon l'aléa choisi et le type de données. Par exemple, on peut vouloir visualiser les projections de *températures minimales l'hiver* ou de la *nuit la plus froide* pour l'aléa *froid extrême*, ou voir la *vulnérabilité aux chaleurs extrêmes* de l'île de Montréal pour l'aléa *chaleur extrême*.

La figure 4.11 ci-dessous montre un exemple de visualisation de la carte une fois les trois choix sélectionnés. L'outil affiche les *précipitations maximales en une journée l'été* pour l'aléa *pluies abondantes* pour le type de données *indicateurs climatiques*. On peut aussi apercevoir, comme à chaque étape de sélection, une description en haut à gauche de l'écran pour bien définir ce que représente cet indicateur.

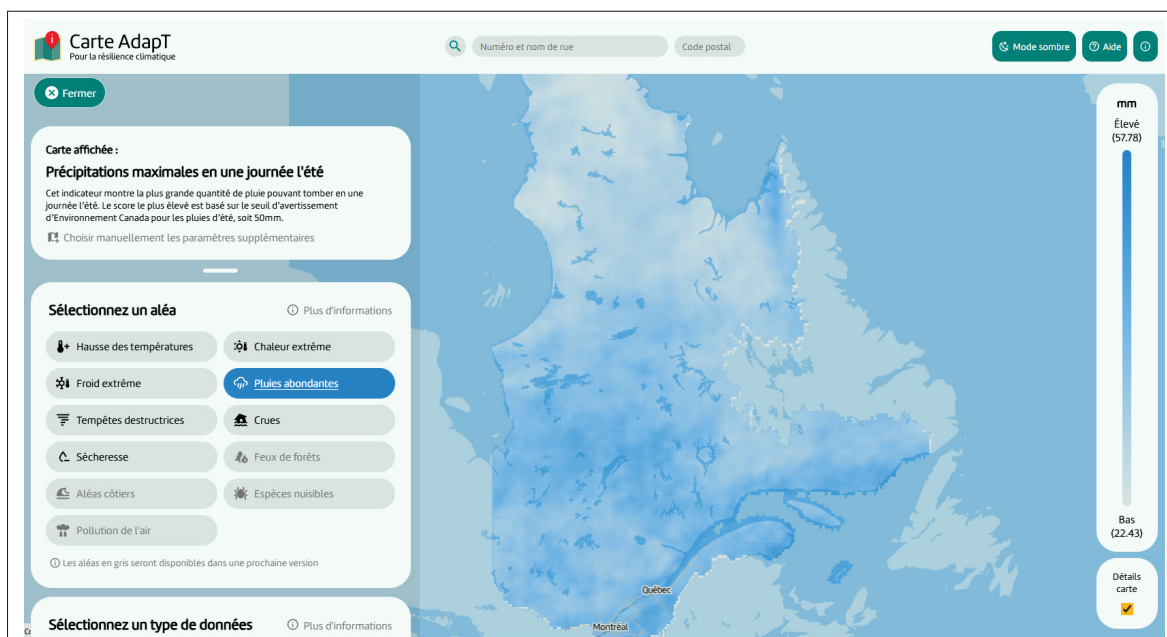


Figure 4.11 Visualisation de l'indicateur de *précipitations maximales en une journée l'été* pour l'aléa *pluies abondantes*

4.2.4 Paramètres supplémentaires

Si l'utilisateur le désire, il est possible de modifier davantage de paramètres dans l'outil en choisissant soi-même le scénario d'émission et l'horizon temporel des données climatiques. La figure 4.12 présente l'interface permettant de sélectionner ces options avec une explication de cette fonctionnalité et une définition des niveaux de changements climatiques (ou scénarios climatiques). Cette fonctionnalité permet de montrer à l'utilisateur l'évolution d'une certaine variable climatique dans le temps.

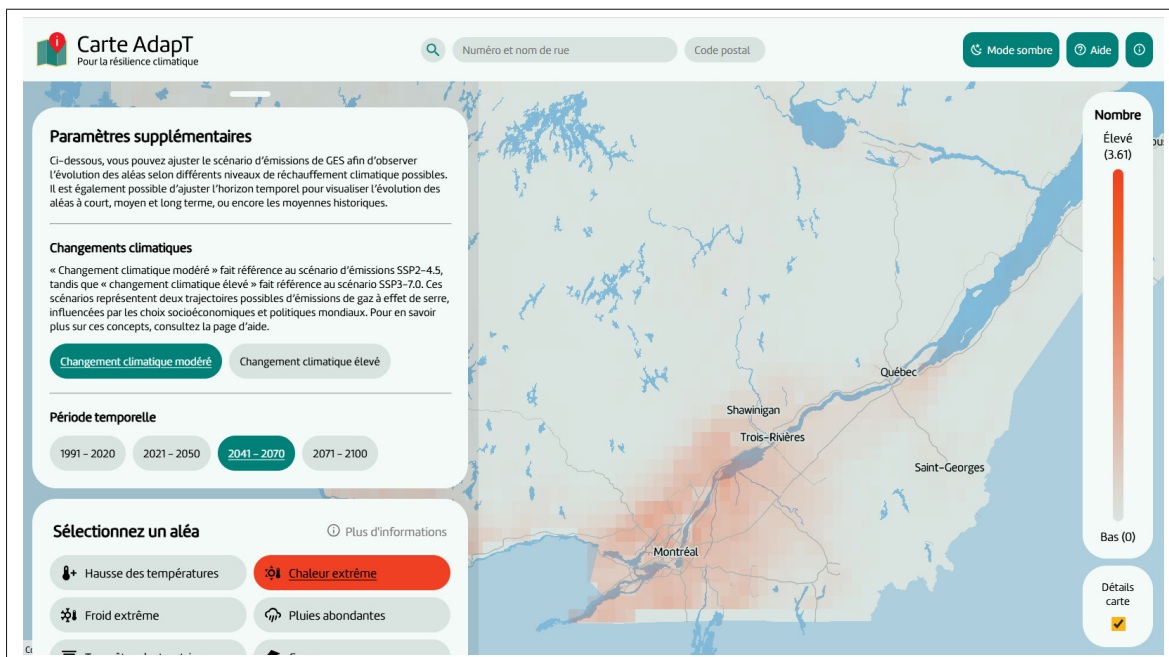


Figure 4.12 Sélection des paramètres supplémentaires dans l'outil

Le scénario modéré, soit le SSP2-4.5, ainsi que l'horizon moyen terme, soit de 2041 à 2070, sont choisis comme étant les paramètres de base s'affichant dans l'outil lorsqu'un utilisateur sélectionne un indicateur.

4.2.5 Carte de vulnérabilité

Tel que mentionné à la section 4.2.2, l'utilisateur peut choisir d'afficher les indicateurs climatiques ou de vulnérabilité. Lorsqu'on sélectionne la seconde option, on peut choisir parmi 20 indicateurs de vulnérabilité en lien avec l'aléa indiqué, présentés au tableau IV en annexe.

Les cartes permettent de visualiser les données seulement pour l'île de Montréal et s'affichent uniquement lorsque l'on zoom sur la ville. La figure 4.13 présente un exemple de la plateforme montrant l'indicateur des *cuvettes de rétention* pour l'aléa *pluies abondantes*. On peut y apercevoir un encadré en haut à gauche avec l'indicateur et une description (pas encore disponible au moment de l'écriture de ce mémoire).

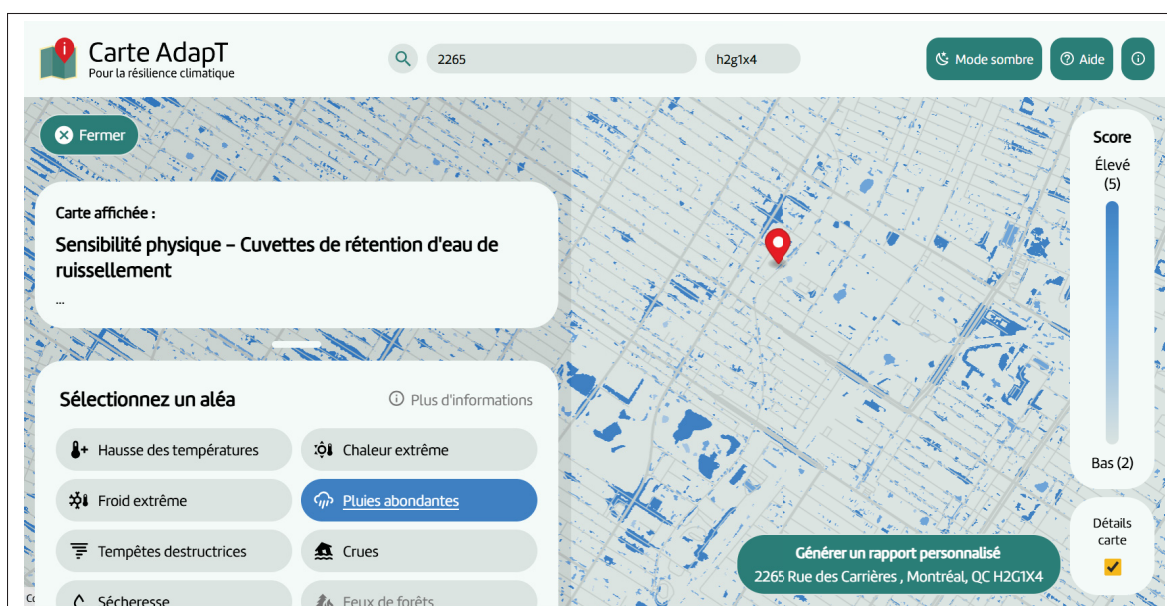


Figure 4.13 Visualisation des *cuvettes de rétention* pour l'aléa *pluies abondantes* dans l'outil

4.2.6 Rapport personnalisé

Tel que mentionné au début du mémoire, le projet comporte deux volets de modélisation. Un premier sur la modélisation des cartes de projections et de vulnérabilité et un deuxième sur la

création d'une base de données de solutions de résilience climatique sous la forme d'un rapport personnalisé. La section présente les résultats de cette modélisation et un aperçu du rapport et de ses fonctionnalités. Pour plus de détails sur la méthodologie derrière ce volet, consultez le mémoire de Marianne Lipp.

Pour accéder au rapport personnalisé, il suffit d'entrer un code postal avec un numéro civique dans la plateforme. Une fois cette étape réalisée, comme on le voit dans le bas de la figure 4.13, un bouton apparaît pour *générer un rapport personnalisé*. La figure 4.14 montre le premier aperçu du rapport lorsqu'on l'ouvre, nous présentant tous les aléas notés sur une échelle de un à cinq. Cette échelle permet de voir à quel point un certain aléa est critique ou non à notre emplacement.

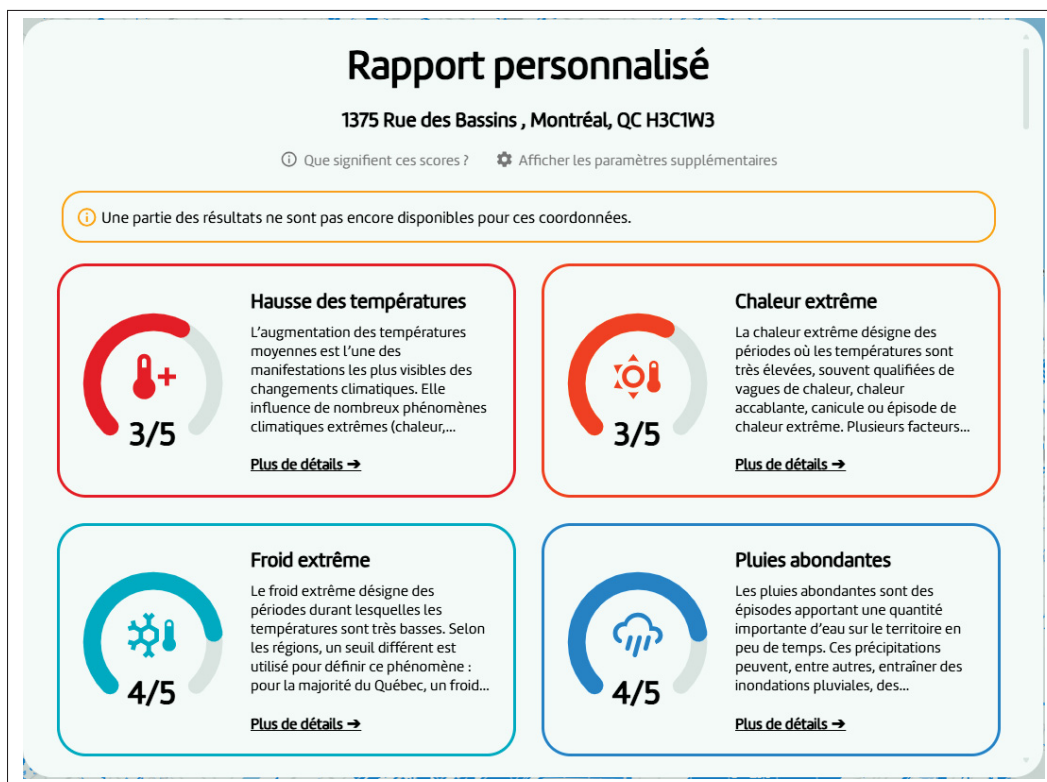


Figure 4.14 Affichage du rapport personnalisé montrant les différents aléas

Le score des aléas, donné sur cinq, correspond à la moyenne arithmétique des scores des indicateurs. Les scores des indicateurs, quant à eux, sont fixés selon trois options méthodologiques

et permettent de traduire les valeurs brutes issues des modèles climatiques en une note sur cinq. Les options sont, dans l'ordre de priorité :

- **Option 1** : fixer l'échelle selon les seuils d'alerte établis par le gouvernement du Canada
- **Option 2** : fixer l'échelle selon les seuils trouvés dans la littérature
- **Option 3** : fixer l'échelle selon les moyennes historiques de l'indicateur

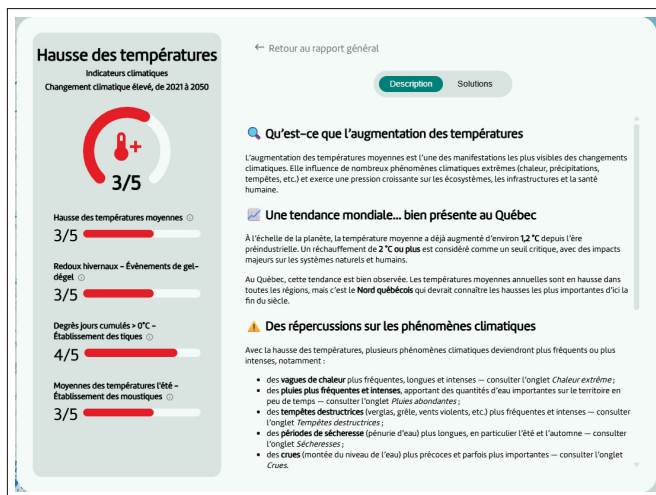
Une fois l'échelle déterminée, la plateforme peut donc prendre la valeur de l'indicateur à l'emplacement choisi, puis donner une valeur de un à cinq selon l'échelle préétablie.

Par exemple, on peut observer les seuils de l'indicateur *Précipitations maximales durant 1 jour en été* dans le tableau 4.1 ci-dessous. Ils sont définis en fonction des critères d'alertes météorologiques (option 1). On peut donc voir que si l'emplacement choisi avait une valeur de 27 mm de pluie, le score de cet indicateur serait de quatre sur cinq pour un niveau élevé.

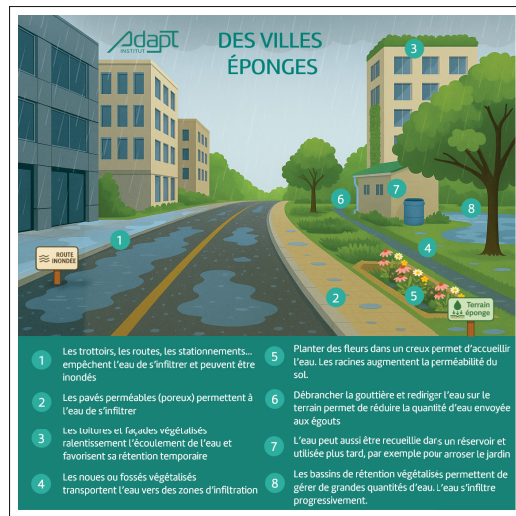
Tableau 4.1 Seuils de l'indicateur Précipitations maximales durant 1 jour l'été (mm)

Non significatif (1)	Mineur (2)	Modéré (3)	Élevé (4)	Majeur (5)
< 1	1 à 10	10 à 20	20 à 50	50 et +

Ensuite, l'utilisateur peut appuyer sur le bouton *plus de détails* pour chaque aléa afin d'ouvrir une nouvelle page, comme montré à la figure 4.15a. Cette page présente tous les indicateurs inclus dans l'aléa sélectionné à gauche, affichant eux aussi une cote de un à cinq. Elle donne aussi une description détaillée de l'aléa et des indicateurs, en plus d'informations complémentaires telles que l'impact des changements climatiques sur l'aléa, les conséquences possibles et des exemples de solutions d'adaptation. Le rapport affiche aussi des fiches d'information sur l'aléa en question sous forme d'infographie pour avoir un aperçu plus visuel des concepts et des solutions. Un exemple d'infographie pour l'aléa *pluies abondantes* est montré à la figure 4.15b.



a) Affichage de l'aléa *hausse des températures* dans le rapport personnalisé, avec le SSP2-4.5 et l'horizon 2021 à 2050



b) Infographie pour l'aléa *pluies abondantes* dans le rapport personnalisé

Figure 4.15 Rapport personnalisé montrant le détail de l'aléa *hausse des températures* et un exemple d'infographie

La dernière fonctionnalité de l'outil est l'affichage de solutions de résilience. La figure 4.16 montre un aperçu des solutions proposées par l'outil. Les mesures d'adaptation sont d'abord réparties sous cinq types différents, soit : l'environnement bâti, les mesures basées sur la nature, les bonnes pratiques et astuces, les technologies et innovations ainsi que les politiques et réglementations.

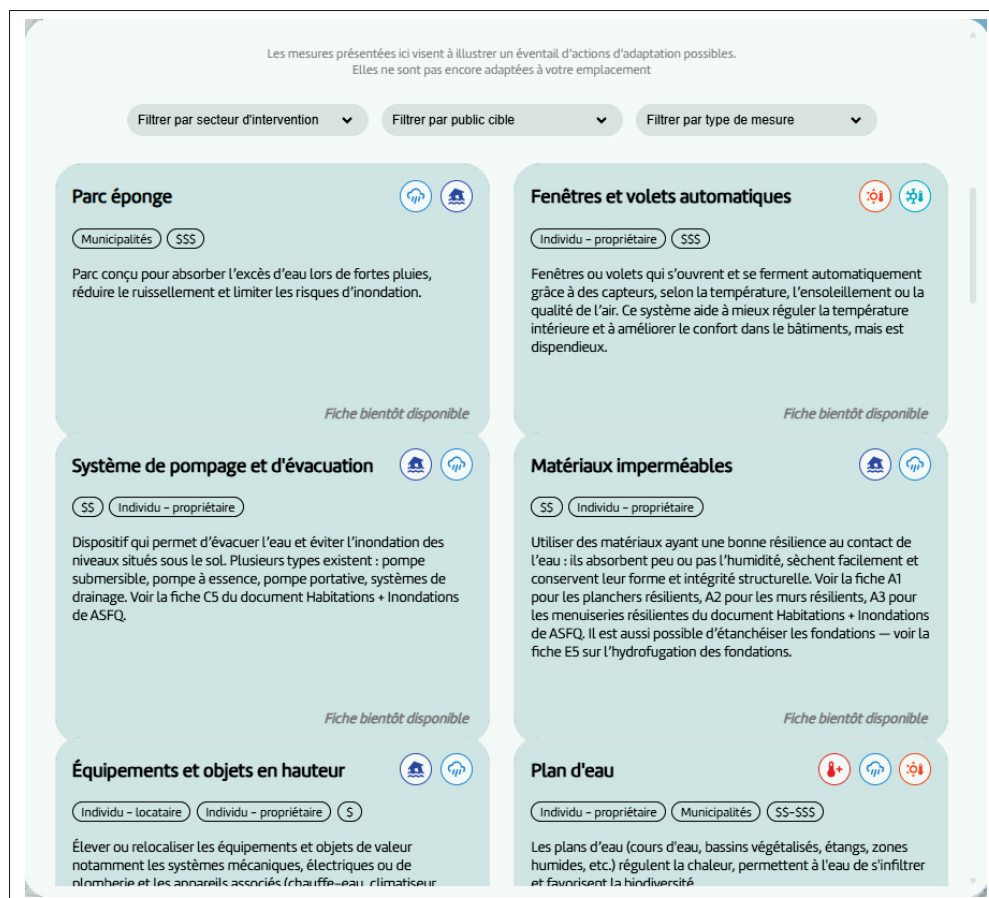


Figure 4.16 Affichage des solutions dans le rapport personnalisé

Ensuite, six secteurs d'intervention ont été retenus afin de classer les mesures et de pouvoir appliquer un filtre lors de la recherche de solutions. Ces secteurs sont :

1. Bâtiments
2. Aménagement, urbanisme et mobilité
3. Eau
4. Biodiversité et écosystèmes
5. Santé et bien-être
6. Sécurité alimentaire

Finalement, trois catégories de public cible sont identifiées pour faire un dernier filtre des mesures. Les différents publics cibles sont présentés au tableau 4.2 avec une description pour les mesures au niveau individuel comme propriétaire ou locataire ainsi qu'en tant que municipalité.

Tableau 4.2 Options possibles pour le public cible en lien avec la proposition de mesures dans l'outil.

Tiré du mémoire de Marianne Lipp (2025)

Public cible	Description
Individu – Propriétaire	Mesures qui peuvent être mises en place par les propriétaires, telles que l'amélioration de l'isolation du bâtiment, le remplacement des systèmes de chauffage par des systèmes plus efficaces, l'installation d'une thermopompe, l'installation de systèmes de drainage efficace, l'ajout de pare-soleil ou de volets, le renforcement de la toiture ou encore des aménagements extérieurs comme les pavés alvéolés.
Individu – Locataire	Actions que les locataires peuvent entreprendre, comme l'installation de rideaux, de ventilateurs, le calfeutrage des fenêtres, le verdissement des balcons ou terrasses, ou encore l'adoption de bonnes pratiques de consommation d'eau et d'énergie au quotidien.
Municipalité	Mesures à l'échelle collective, qui peuvent être mises en place par les municipalités, telles que la création d'îlots de fraîcheur (plantation d'arbres, plans d'eau), l'aménagement de corridors de biodiversité, l'adaptation des infrastructures aux fortes pluies (bassins de rétention, surfaces perméables), et la révision / création de politiques et règlements.

4.2.7 Incertitudes

Il est essentiel de souligner l'incertitude associée aux projections climatiques. En effet, comme Isabelle Charron le mentionne dans le *Guide sur les scénarios climatiques* (Isabelle Charron, 2016) d'Ouranos, plus on projette les scénarios climatiques loin dans le temps, plus le niveau

d'incertitude augmente. De plus, le guide mentionne que ces incertitudes proviennent de trois grandes sources, soit :

- la variabilité naturelle du climat : le climat subit des variations naturelles d'une année à l'autre sans tenir compte des activités humaines ;
- l'incertitude sur les concentrations futures de GES : l'emploi de divers modèles climatiques, chacun simulant des scénarios distincts concernant les interactions entre les comportements sociétaux et politiques, ainsi que les trajectoires socio-économiques sélectionnées ;
- les faiblesses des modèles climatiques : malgré leur niveau avancé, ces modèles restent des approximations de la réalité et ne sont pas en mesure de reproduire de manière exhaustive toutes les caractéristiques du système climatique et des processus physiques existants.

En plus de ces variables, l'incertitude peut grandement varier selon l'horizon temporel considéré. Pour l'horizon court terme (moins de 30 ans), il faut considérer la variabilité naturelle du climat comme source clé lors de l'évaluation des scénarios climatiques. Au niveau de l'horizon moyen terme (30 à 50 ans), il faut considérer les scénarios d'émissions et les modèles climatiques, alors que pour le long terme (plus de 50 ans), seulement les scénarios d'émissions (Isabelle Charron, 2016).

Pour ces raisons, il est donc recommandé d'utiliser un ensemble de données, qui rassemble les données de plusieurs modèles, telles que les données du CMIP6 (chapitre 2.1.3.2), pour obtenir des résultats les plus proches de la réalité possible (Prairie Climate Centre, s.d.; Liza Leclerc *et al.*, 2015). Il faut aussi présenter plusieurs scénarios climatiques afin de montrer la variabilité possible (Ouranos, 2024). De plus, sous la recommandation de plusieurs experts rencontrés (Brissette, F., Arsenault, R., Martel, J-L., 2024), il serait judicieux d'aborder le sujet des incertitudes sur la carte interactive afin de montrer aux utilisateurs la sensibilité des données climatiques.

4.3 Programmation de l'application

La programmation de l'outil est entièrement faite par Paul Caillier, étudiant en maîtrise projet en génie logiciel, faisant son projet sur la création d'un outil sur site web intégrant des concepts d'informatique durable. La présente section donne un aperçu global des choix de conception pour la plateforme et un rapport détaillé a été écrit par Paul Caillier pour plus de détails.

4.3.1 Exigences fonctionnelles de la plateforme

Les fonctionnalités de la plateforme pour la partie programmation ont été établies à l'aide de la méthode MSCW (prononcé Moscow). Cette méthode de priorisation est couramment employée dans le cadre du développement de logiciels afin de hiérarchiser les exigences en quatre catégories. L'objectif consiste à harmoniser les idées ainsi que les parties prenantes sur la signification des livrables afin d'optimiser la gestion du projet. Les catégories sont :

- **Must have** (incontournable) : les fonctionnalités indispensables. Le projet ne peut pas être livré sans elles ;
- **Should have** (devrait avoir) : les fonctionnalités importantes, mais qui ne sont pas critiques pour la version actuelle. Le projet pourrait fonctionner sans elles à court terme ;
- **Could have** (pourrait avoir) : les fonctionnalités considérées comme des ajouts intéressants si le temps et les ressources le permettent. Elles peuvent être réalisées plus tard ;
- **Won't have** (ne sera pas réalisé pour l'instant) : les fonctionnalités qui ne sont pas incluses dans le périmètre du projet actuel, mais qui pourront être considérées plus tard.

Cette méthode a permis de définir les exigences fonctionnelles à prioriser pour la première version de l'outil, et d'avoir une idée de fonctionnalités supplémentaires qui pourront être ajoutées dans la suite du projet. Les exigences ont été établies par Jean-Cédric et Marianne avec l'aide de Paul pour la partie utilisateur. Les fonctions indispensables, appelées les *Must*, ont été identifiées comme suit :

- Permettre à l'utilisateur de visualiser sept aléas climatiques et d'obtenir des données sur un climat actuel et futur ;
- Permettre à l'utilisateur de voir les résultats selon deux niveaux d'analyse : projections climatiques et vulnérabilité ;
- Permettre à l'utilisateur de modifier l'horizon temporel afin d'observer l'évolution des aléas à court, moyen et long terme ;
- Permettre à l'utilisateur d'ajuster le scénario d'émissions de GES afin d'explorer l'évolution des aléas selon différents niveaux de réchauffement climatique possibles ;
- Permettre à l'utilisateur d'entrer une adresse pour consulter les aléas les plus exposés à un emplacement choisi ;
- Permettre à l'utilisateur d'obtenir des indicateurs pour chaque aléa pour mieux comprendre quels sont les impacts d'un aléa ;
- Permettre à l'utilisateur d'obtenir des solutions pour pouvoir améliorer la résilience climatique de ses infrastructures ;
- Permettre à l'utilisateur de s'informer sur les différents concepts présentés pour mieux comprendre les informations qui sont fournies.

À la suite de cette classification des fonctions indispensables à l'application, Paul Cailler a pu commencer la conception de l'outil en disposant d'une liste claire de fonctions à mettre en œuvre. Parmi les autres éléments classés par la méthode MSCW, on y retrouve dans la catégorie *Should* les coûts associés aux dommages et réparations des événements climatiques, la possibilité de visualiser des événements historiques et dans la catégorie *Could* des aléas supplémentaires aux sept déjà dans l'application. Cette méthode a permis à Paul de créer un premier prototype de l'outil à l'aide de l'application Figma, qui a servi de rendu visuel afin d'établir les bases de l'outil en conception et de donner un premier aperçu de la plateforme. Les figures 4.17 et 4.18 montrent la première version de la carte et du rapport personnalisé sur l'outil Figma.

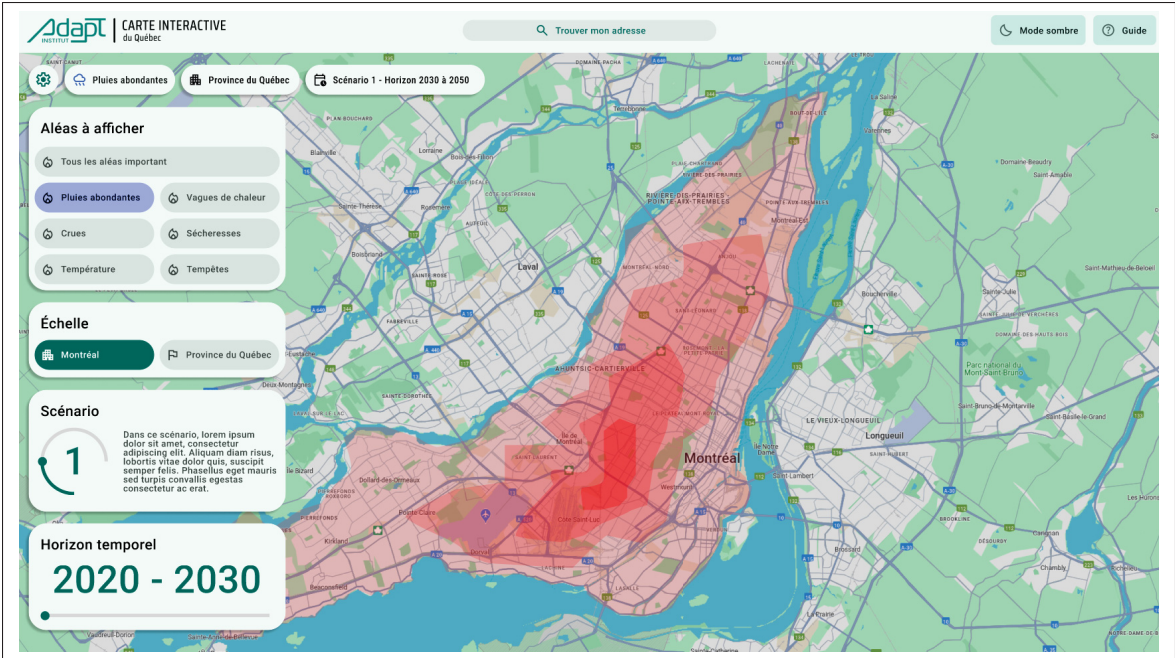


Figure 4.17 Présentation de la première version de l’outil réalisée dans Figma pour le volet visualisation des données climatiques

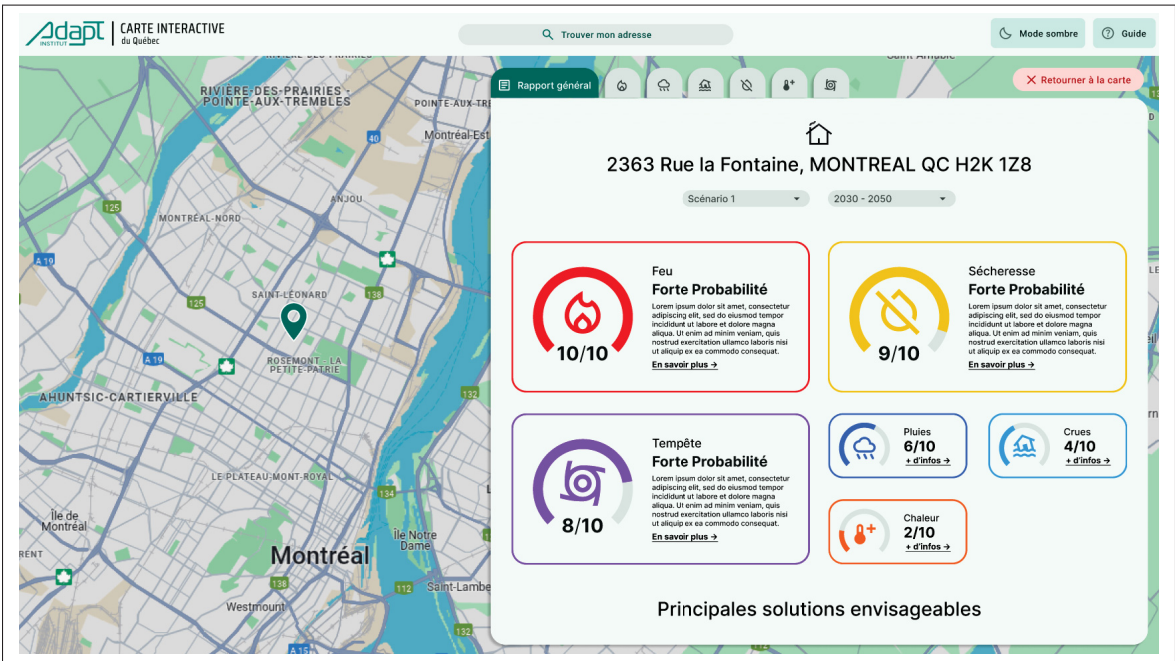


Figure 4.18 Présentation de la première version de l’outil dans Figma pour le volet rapport personnalisé

4.3.2 Exigences non-fonctionnelles

Les exigences non fonctionnelles ont été basées sur la norme ISO 25010, intitulée « Ingénierie des systèmes et du logiciel — Exigences de qualité et évaluation des systèmes et du logiciel (SQuaRE) — Modèles de qualité du produit », qui vise à créer un modèle de qualité pour la conception d'un logiciel de technologie et communication et pour les plateformes web. Elle est composée de neuf critères, qui sont ensuite divisés en plusieurs sous-critères. À l'aide de cette norme, Paul Caillier a pu identifier 11 critères de conception visant à améliorer la qualité et les fonctionnalités de l'outil. Un douzième critère a été ajouté par la suite, permettant de s'aligner sur les grandes lignes directrices du projet, soit de réduire l'empreinte environnementale de la population et de la conscientiser, qui traite de la durabilité de l'outil. Les exigences sont présentées dans le tableau 4.3.

Tableau 4.3 Exigences non-fonctionnelles

Catégorie	Contenu
Performance	Latence : L'application doit pouvoir s'afficher en moins de 3s. L'ensemble des opérations doivent répondre en moins de 300ms
Performance	Capacité : L'application doit pouvoir répondre à 260 000 fois par jour (1 requêtes toutes les 0.3s)
Interraction	Facilité d'apprentissage : Un utilisateur moyen doit pouvoir être familier avec l'application au bout de 5 min.
Fiabilité	Disponibilité : L'application doit être disponible 90% du temps
Fiabilité	Tolérance aux pannes : Le système doit pouvoir continuer à fonctionner en mode dégradé si un des composants est indisponible.
Fiabilité	Rétablissement : Le système doit pouvoir se relancer automatiquement en cas d'erreur au bout d'1 minute
Sécurité	Confidentialité : Le système doit révéler 0% donnée utilisée lors des calculs des valeurs proposées
Sécurité	Intégrité : 0% des données stockées et des traitements doivent être modifiés par des utilisateurs du site
Maintenabilité	Testabilité : Le système doit posséder une couverture de tests unitaires de 80%
Maintenabilité	Modificabilité : L'ajout d'un nouveau type de fichier à traiter doit pouvoir se faire en moins d'une semaine pour une personne familière avec le projet et un format de fichier d'une complexité moyenne
Maintenabilité	Interopérabilité : L'application doit pouvoir supporter au minimum 2 types de fichiers de données
Durabilité	Empreinte environnementale : Réduction de la consommation énergétique et mesure de celle-ci. Diminution des échanges entre le client et le serveur

4.3.3 Plateforme d'administration

Afin de permettre à Jean-Cédric et Marianne d'entrer et de modifier l'information contenue dans la carte, une plateforme d'administration a été mise en place. Cette plateforme permet d'y mettre toute l'information nécessaire à la construction de la base de données de l'outil, y compris les cartes de vulnérabilité et de projections climatiques, les informations sur les aléas, les indicateurs, les différentes périodes temporelles et autres. Elle permet aussi d'y entrer toutes les solutions proposées par l'outil pour le volet résilience climatique et qui seront suggérées dans le rapport personnalisé. Cette plateforme permettra ainsi aux prochaines équipes de conception d'y ajouter de nouveaux aléas et toute autre information supplémentaire facilement. Elle est protégée par mot de passe afin d'éviter que n'importe qui puisse y accéder et modifier son contenu.

La figure 4.19 présente un aperçu de la plateforme. On peut voir à droite l'interface pour y entrer les différents aléas climatiques de l'outil, qui sont ensuite mis à jour dans la carte. Les boutons à gauche permettent de sélectionner le type d'information qu'on souhaite entrer dans la plateforme, soit les données textuelles, les solutions de résilience ou les cartes de vulnérabilité et de projection, classées par type de fichier. Finalement, on peut actualiser la carte tout en bas à gauche pour envoyer les nouvelles données sur la carte.

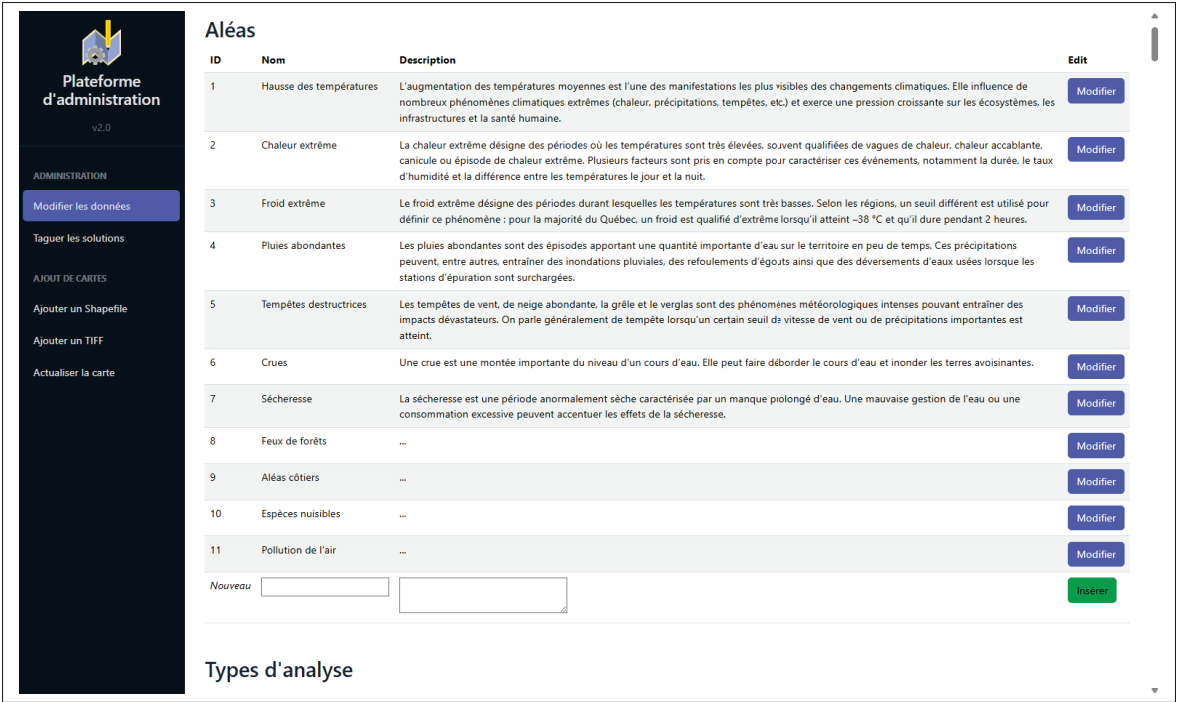


Figure 4.19 Plateforme administrative de l'outil

4.4 Retour sur les objectifs et perspectives futures

Cette section présente un retour sur les objectifs du projet définis en début de mémoire et présente un bref aperçu des différentes perspectives futures et des recommandations pour la prochaine version de la carte interactive.

4.4.1 Retour sur les objectifs

L'objectif spécifique au mémoire (section 1.2.2), qui vise à *créer la base de données des cartes qui serviront à visualiser les indicateurs de projections climatiques et de vulnérabilité*, a été atteint. En effet, une base de données de cartes a été élaborée afin de répondre à l'objectif et qui servira pour l'affichage des cartes dans l'outil. Certaines cartes ont dû être modifiées et ajustées en fonction des différents besoins de l'outil pour arriver au résultat final présenté à la section 4.2.

L'objectif principal du projet présenté à la section 1.2.1, quant à lui, vise à *illustrer les impacts des changements climatiques à l'aide de différents indicateurs, tout en proposant des stratégies d'adaptation pour une localisation spécifique*. L'objectif global a été en partie atteint. Le projet permet effectivement de visualiser les impacts des changements climatiques à l'aide de plusieurs indicateurs et propose des solutions de résilience pour les utilisateurs. Cependant, il n'y a présentement pas de lien direct entre l'emplacement choisi et les mesures d'adaptation présentées. Pour l'instant, l'outil fournit des mesures en fonction des aléas les plus impactés à l'emplacement, sans considérer les informations spécifiques à l'emplacement comme la canopée ou le type d'infrastructure présente. Toutefois, l'utilisateur peut tout de même prioriser le choix de ses solutions en fonction des aléas auxquels il est le plus exposé.

Plusieurs perspectives ont été identifiées pour améliorer et bonifier la carte interactive dans les prochaines versions. Ces perspectives sont présentées pour la modélisation et les données climatiques à la section 4.4.2 et pour la plateforme web à la section 4.4.3.

4.4.2 Perspectives futures de modélisation et données climatiques

Les perspectives futures présentées dans cette section proposent des améliorations au niveau de la modélisation et des données climatiques pour la carte interactive.

Pour l'atlas hydroclimatique, comme mentionné à la section 3.6.2, la méthode par bassin versant est limitée par le fait qu'elle surestime ou sousstime les valeurs dans les bassins. En effet, lorsqu'on utilise la méthode, on fait une moyenne de tous les tronçons à l'intérieur d'un bassin versant donné. Cette méthode permet d'avoir une bonne estimation des cours d'eau compris dans un bassin, mais peut toutefois avoir une certaine marge d'erreur pour le débit dans la zone. Pour résoudre ce problème, il serait plus intéressant de pouvoir prendre le tronçon le plus près de l'emplacement sélectionné pour connaître sa valeur et avoir une idée plus précise des conditions climatiques futures. Cela permet d'éviter une moyenne influencée par des cours d'eau qui ne sont pas réellement près de l'emplacement choisi.

De plus, une autre limite a été soulevée à la section 3.6.2.4, soit le problème d’avoir plusieurs couches superposées. Ceci fait en sorte que le rapport personnalisé ne peut pas afficher de score sur cinq à certains endroits puisqu’il peut y avoir plus d’une valeur dans la carte interactive. Afin de résoudre cette problématique, il sera nécessaire de trouver une solution pour simplifier les couches de la carte des bassins versants, pour qu’il n’y ait aucune superposition des bassins versants et qu’il n’y ait qu’une seule valeur pour un point spécifique.

Le projet d’*Infrastructure informatique unifiée pour la Production de l’Atlas hydroClimaTique* (INPACT), développé par Ouranos en collaboration avec Hydro-Québec et l’École de technologie supérieure, vise à actualiser l’AHQM avec l’addition des données climatiques provenant du CMIP6 et les données climatiques SSP pour remplacer le CMIP5 et les RCP. Il sera donc pertinent de faire la mise à jour des données dans l’outil lors de la sortie de la cinquième version de l’AHQM, prévue pour 2027.

Tel que mentionné à la section 3.6.3, l’outil PAVICS permet d’extraire et d’analyser un plus grand nombre de données climatiques que les sources de données utilisées présentement. De plus, l’outil permet d’analyser des indicateurs n’existant pas ailleurs, ce qui permettrait d’ajouter plus de détails et plus de possibilités dans la carte interactive. Il serait donc judicieux de développer une méthodologie pour y extraire les cartes nécessaires au fonctionnement de la carte interactive. Il pourrait être intéressant de faire un partenariat avec le consortium Ouranos pour y accéder plus facilement.

L’intégration de la fiabilité des données serait un ajout majeur dans la communication de l’information, comme y fait référence le chapitre 4.2.7 sur les incertitudes. Plusieurs chercheurs consultés ont souligné l’importance de spécifier le niveau de fiabilité des modèles climatiques, en indiquant à quel point les modèles climatiques tendent vers une certaine valeur (Brisette, F., Arsenault, R., Martel, J-L., 2024). Cette approche vise à faciliter la compréhension des projections climatiques par les utilisateurs de la plateforme. Comme décrit à la section 2.1.3.2, les projections climatiques sont déterminées à l’aide de plusieurs modèles qui simulent le climat futur. Chacun de ces modèles obtient des résultats différents des autres, et la combinaison de

ces modèles fait en sorte qu'on peut obtenir une valeur de tendance des modèles pour créer la base de données utilisée dans le projet. Avec l'utilisation d'un outil comme PAVICS, il serait possible de déterminer une moyenne et un écart-type des modèles utilisés pour pouvoir afficher l'incertitude des données climatiques sur la carte interactive, soit sous forme d'information complémentaire ou directement à côté de la valeur présentée.

Pour l'instant, l'outil offre de l'information sur les aléas climatiques et les indicateurs sélectionnés. Une section d'aide est aussi présentée sur la plateforme afin d'expliquer les grands concepts de projections climatiques et de résilience. Il serait judicieux d'ajouter une section éducative sur l'information présentée afin de sensibiliser davantage les utilisateurs de la plateforme à la crise climatique actuelle et à comment s'y adapter.

Tout récemment, la plateforme de Portraits climatiques a ajouté trois indicateurs de précipitations neigeuses sur son portail. Lors de la conception de la plateforme, ces indicateurs ne s'y retrouvaient pas. Le seul indicateur sélectionné pour indiquer la quantité de neige l'hiver, qui était aussi le seul disponible, est les *précipitations accumulées solides l'hiver* (section 3.4). Pour la prochaine version, il serait plus judicieux d'utiliser les nouveaux indicateurs puisqu'ils ont été conçus pour mieux représenter les conditions de neige futures.

Plusieurs chercheurs consultés ont souligné l'importance de spécifier le niveau de fiabilité des modèles climatiques, en indiquant leur degré de convergence vers une valeur particulière. Cette démarche vise à faciliter la compréhension des projections climatiques par les utilisateurs de la plateforme (Brissette, F., Arsenault, R., Martel, J-L., 2024).

4.4.3 Perspective future de la plateforme web

La première amélioration à faire pour l'aspect programmation de la plateforme est la lecture des valeurs sur les cartes de projections. Plus précisément, le code permet de lire les fichiers fournis, d'afficher les cartes et de créer une échelle de valeur allant du plus petit chiffre au plus grand. Cette méthode pose un problème pour les cartes de l'aléa Froid extrême puisque les cartes vont en général d'une valeur plus chaude à une valeur plus froide. Ceci fait en sorte que la légende

qui s’affiche est inversée, et que l’échelle est affichée de la plus petite valeur à la plus grande alors qu’en réalité il faut afficher du plus grand au plus petit. Il faut donc modifier le code pour ajuster la légende des indicateurs qui affichent des valeurs négatives.

Une fonctionnalité supplémentaire qui serait bénéfique pour l’expérience utilisateur sur la plateforme consisterait à offrir la possibilité de choisir un emplacement en cliquant directement sur la carte, évitant ainsi la saisie d’une adresse ou d’un code postal. Cela permettrait de naviguer plus facilement sur la carte et de comparer différents endroits au Québec sans avoir à utiliser le processus de chercher un emplacement précis à chaque fois.

Afin de permettre à l’utilisateur de mieux comprendre les données présentées, il faudrait être capable de voir la valeur de l’indicateur directement sur l’outil. Comme la figure 4.20 le montre, il n’y a aucune façon de voir la valeur réelle des indicateurs, on peut seulement avoir une échelle de couleurs qui indique la variation entre la valeur la plus basse et la plus haute. La valeur réelle peut être ajoutée en dessous des indicateurs, comme indiqué en rouge sur la gauche de la figure.

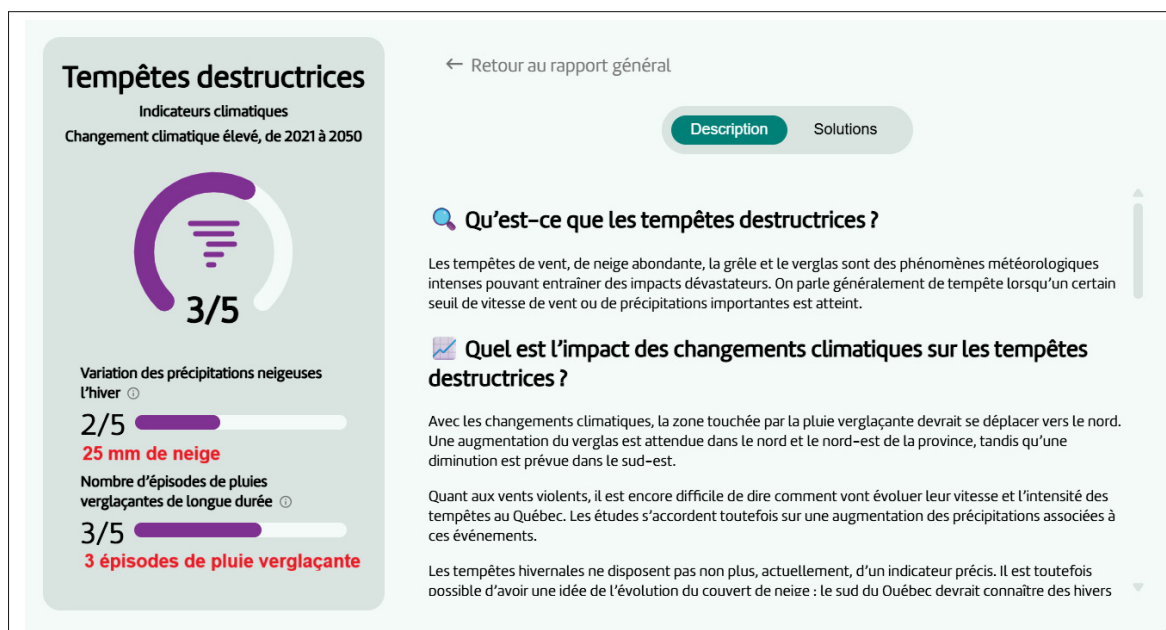


Figure 4.20 Exemple de rapport personnalisé avec les valeurs des indicateurs en rouge

Lorsqu'on observe les cartes de sensibilités sociales, territoriales et environnementales de l'analyse de vulnérabilité de Montréal, elles s'affichent présentement sous forme de plusieurs centaines de mailles de 25 m x 25 m. Tel que mentionné à la section 3.7, chaque maille comporte une valeur de un à cinq pour montrer la sensibilité à un aléa. Le chargement de la carte est extrêmement lent en raison du trop grand nombre de mailles. Contrairement aux cartes de sensibilité, les mailles dont la valeur est identique à celles adjacentes dans les cartes de vulnérabilité ont été fusionnées, comme la figure 4.21 le montre. Ainsi, il est nécessaire d'effectuer la même opération manuellement pour chaque carte de sensibilité.

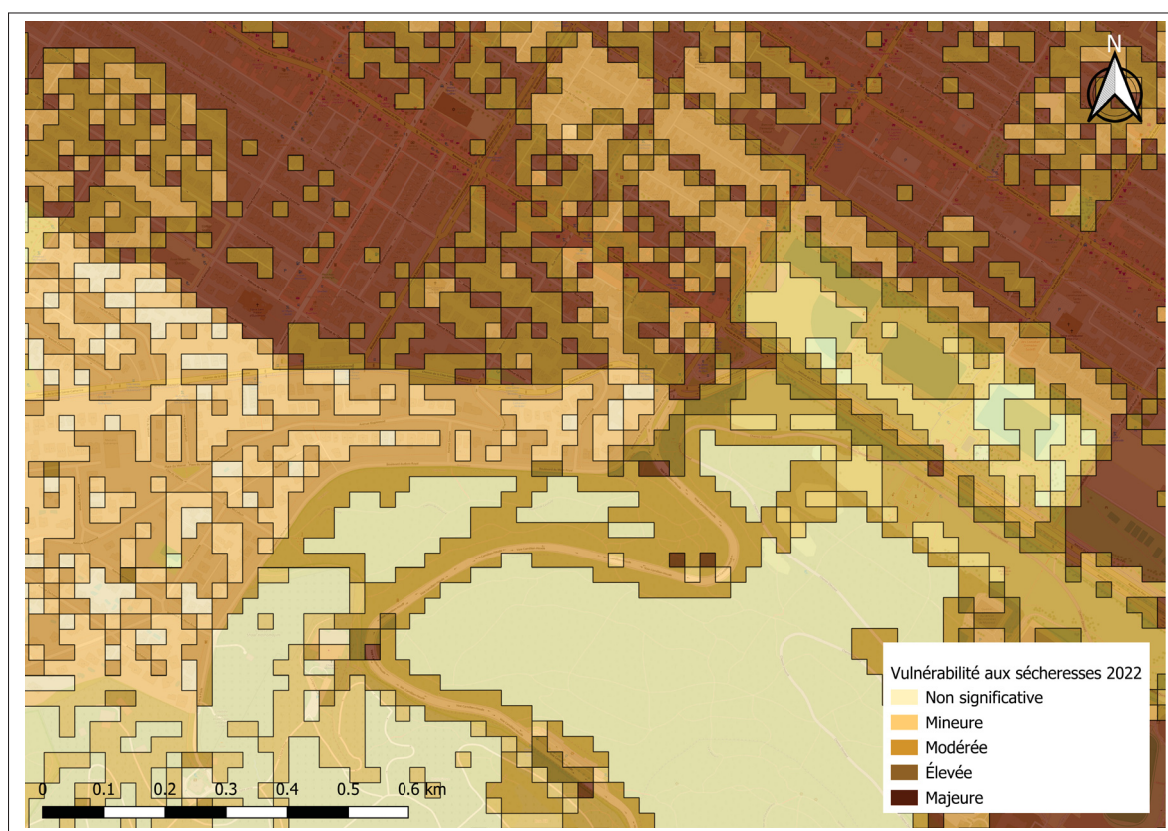
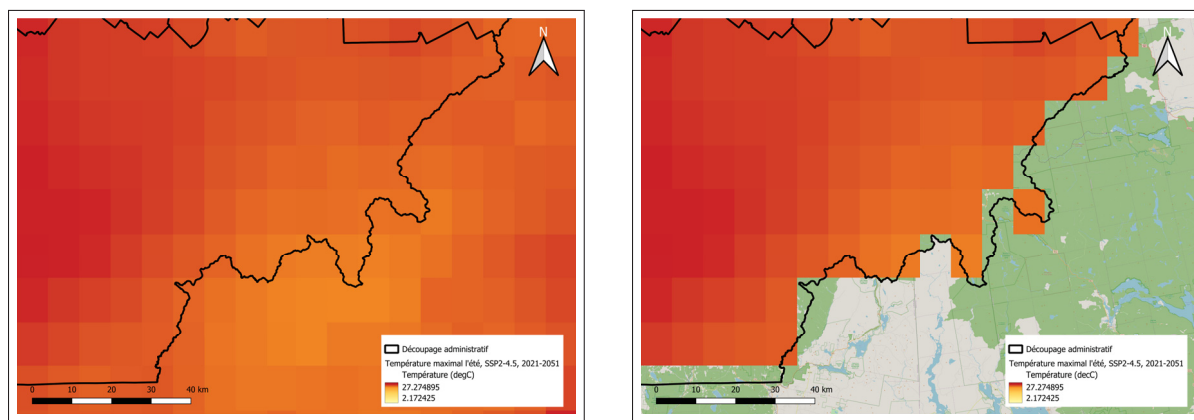


Figure 4.21 Exemple de mailles fusionnées pour la carte de vulnérabilités aux sécheresses

Au niveau des cartes de projections climatiques extraites, la méthodologie à la section 3.6.1 montre que les cartes sont découpées avec les limites de la province. Cette méthode permet de supprimer les valeurs qui sont à l'extérieur de la limite, mais n'est pas très efficace lorsqu'une

maille se situe *sur* la limite. En effet, lorsqu'une maille se trouve à moins de 50 % à l'intérieur de la limite, la fonction utilisée supprime tout simplement celle-ci. À l'inverse, si elle se trouve à plus de 50 % à l'intérieur, la fonction garde la maille entière. La figure 4.22a montre la carte avec l'indicateur de moyenne de température maximale l'été, avec le scénario SSP2-4.5 et l'horizon temporel de 2021 à 2050. La figure 4.22b montre la même carte une fois découpée, où on peut apercevoir les mailles restées entières et celles supprimées.



a) Carte extraite de *Portraits climatiques* sans modification.

b) Carte avec découpage pour la province du Québec.

Figure 4.22 Exemple de découpage de la carte de projections climatiques extraite de *Portraits climatiques*. La carte montre les événements de gel-dégel annuels, selon le scénario climatique SSP3-7.0 et un horizon temporel de 2070 à 2100

La solution à ce problème serait du côté programmation, où on pourrait simplement ajouter un masque de données avec le découpage des limites de la province, ce qui ferait en sorte que seulement la partie à l'intérieur des limites serait affichée. Ainsi, il serait inutile de procéder à un découpage préalable des données, car celles situées en dehors des frontières seraient masquées.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

La démarche présentée dans ce mémoire a permis de développer un outil interactif permettant de rendre accessibles des informations complexes portant sur l'exposition et la vulnérabilité face aux changements climatiques pour la population québécoise. En intégrant et en traitant des données provenant de diverses sources, notamment de Portraits climatiques, de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional, ainsi que de l'analyse de vulnérabilité de la ville de Montréal, le projet a permis de développer une plateforme conviviale, constituant ainsi un outil de sensibilisation pour le Québec. Cette démarche répond à un besoin observé dans la revue de littérature : améliorer l'accès aux citoyens à l'information sur les changements climatiques afin de soutenir la résilience climatique de la communauté québécoise grâce à des mesures concrètes pouvant être exécutées à l'échelle individuelle et collective.

Ce mémoire a permis de créer une première version de l'outil proposé, en établissant une méthode pour l'extraction et la manipulation de cartes de données climatiques au Québec. Les cartes ont été classées selon le scénario climatique, le centile et l'horizon temporel pour créer une base de données facilement utilisable et malléable par les prochains chercheurs et chercheuses qui travailleront à améliorer la plateforme. Le projet a permis d'établir une base pour les versions futures en proposant une méthodologie reproductible pour l'amélioration de la carte interactive et est appelé à évoluer au fil du temps.

Enfin, ce rapport confirme que la communication sur le climat est un défi majeur pour les années à venir. Comme le souligne Ursule Boyer-Villemare dans le *Climatoscope 5e édition* (Annie Chaloux, 2023), il y a « un besoin d'outils accessibles et d'accompagnement pour généraliser et accélérer la prise de décision basée sur les risques climatiques, autant dans les organisations publiques que privées ». L'outil développé contribue à l'effort collectif d'adaptation en rendant concrets des concepts parfois abstraits, en facilitant l'accès aux données scientifiques et en favorisant la compréhension sur la vulnérabilité aux changements climatiques. Il s'inscrit

dans une vision de durabilité au Québec, où la résilience climatique n'est plus une notion théorique, mais une démarche concrète et nécessaire au service de la sécurité, du bien-être et du développement durable des communautés et des générations à venir.

ANNEXE I

SONDAGE SUR L'ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET LA RÉSILIENCE DES INFRASTRUCTURES

Cette annexe présente toutes les questions et réponses du sondage effectué auprès de la population. Le sondage a été effectué à l'aide de Microsoft Forms et les réponses sont directement extraites de l'outil afin d'avoir une uniformité dans les réponses.

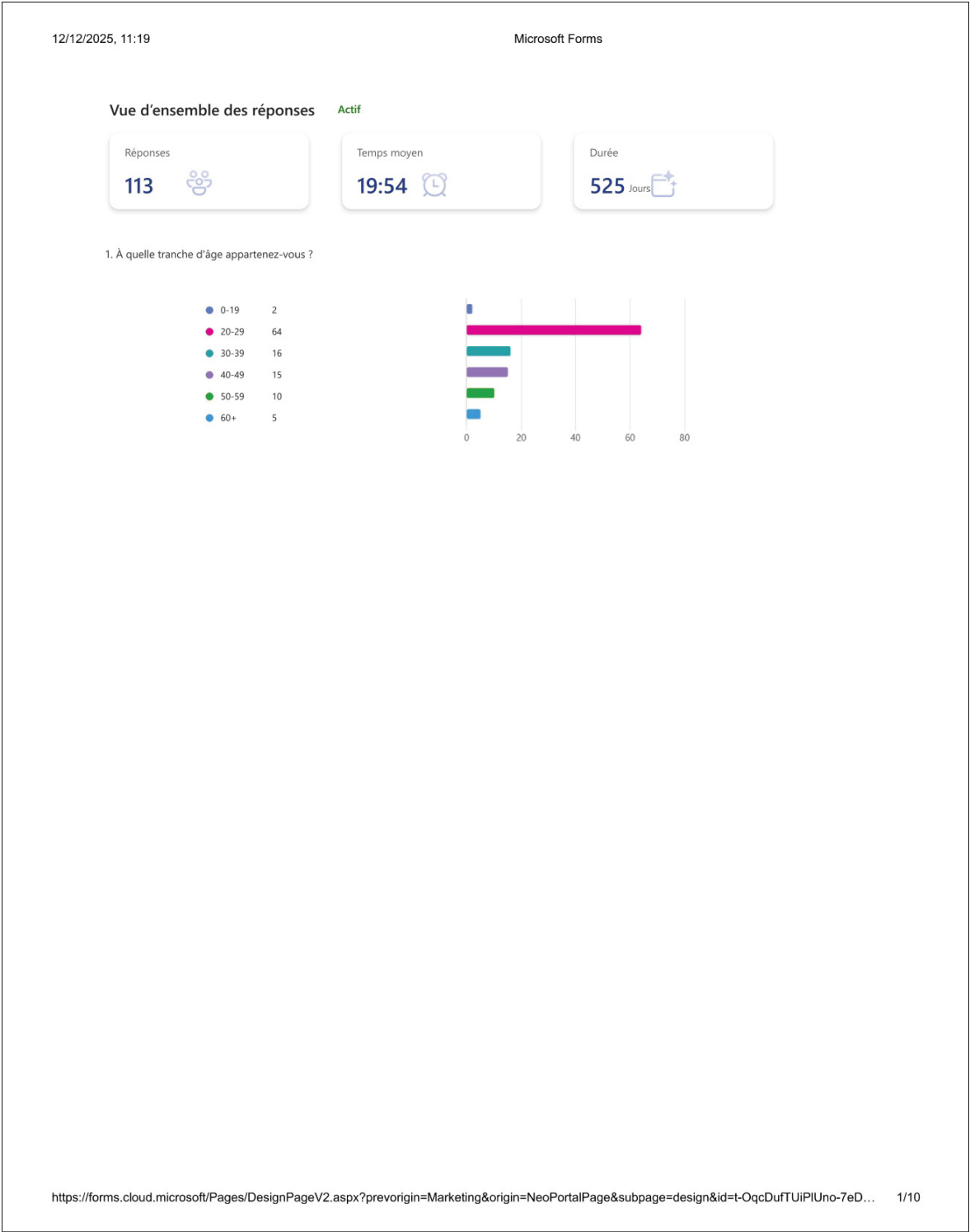


Figure-A I-1 Sondage sur l’adaptation aux changements climatiques et la résilience des infrastructures

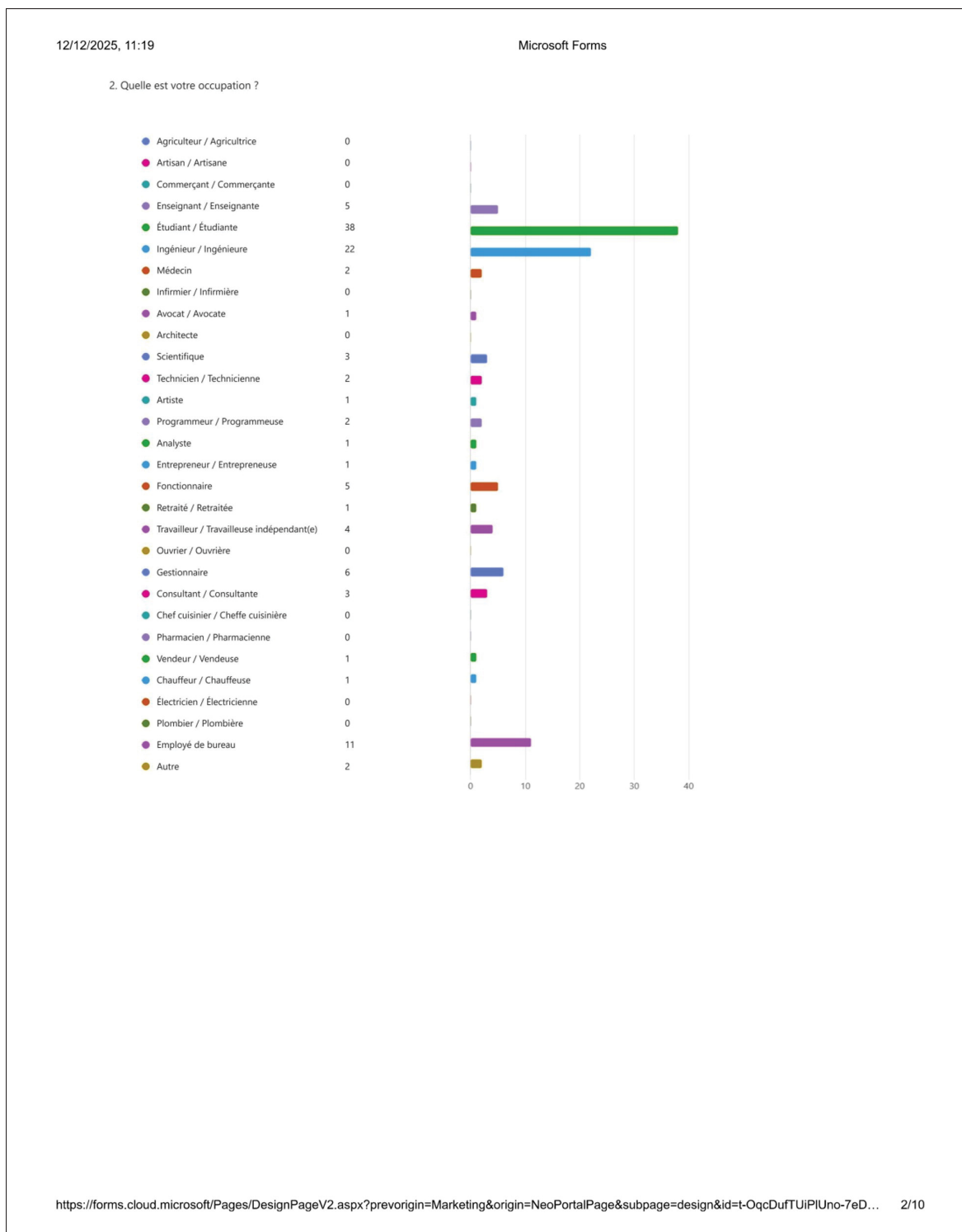


Figure-A I-2 Sondage sur l'adaptation aux changements climatiques et la résilience des infrastructures

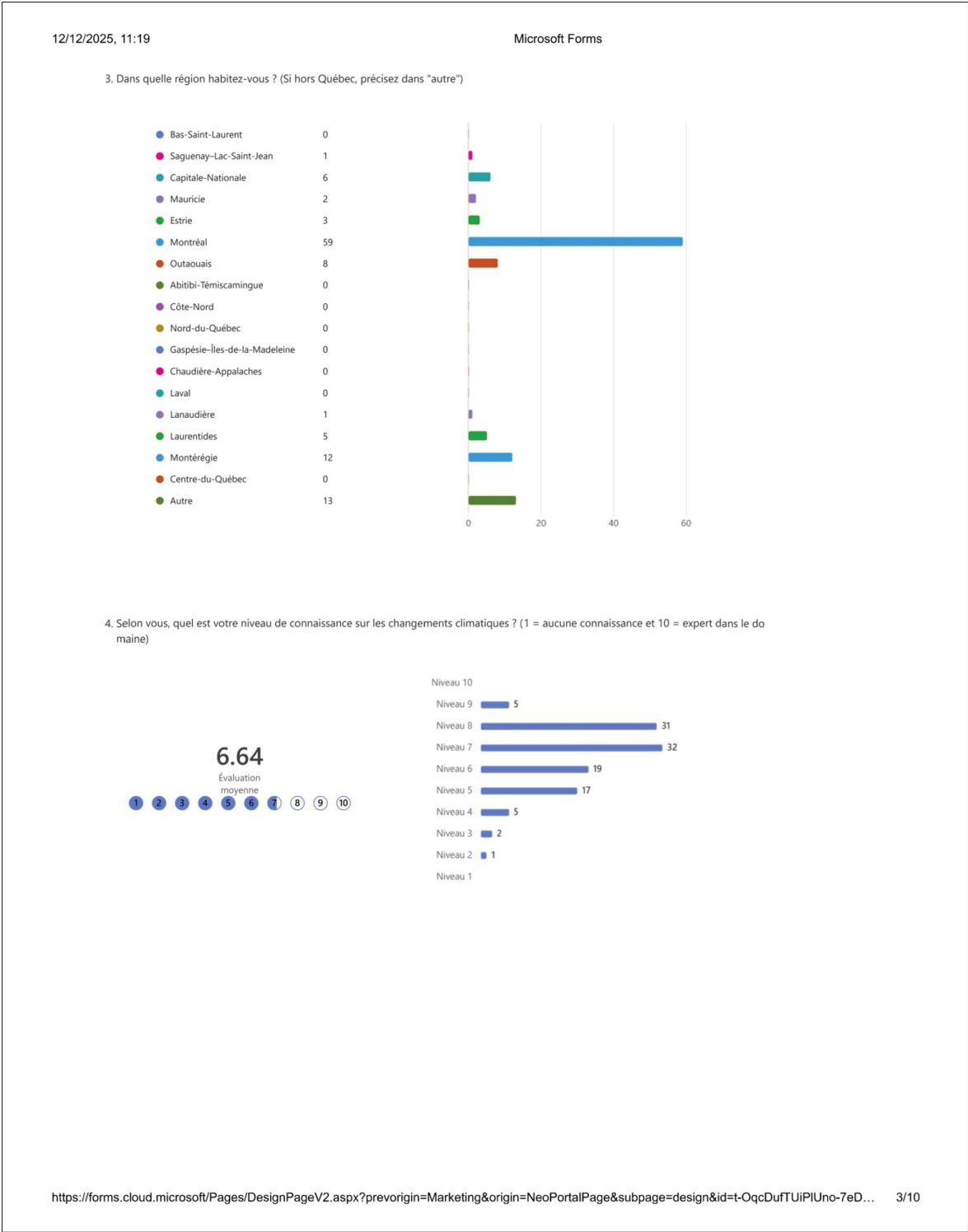


Figure-A I-3 Sondage sur l’adaptation aux changements climatiques et la résilience des infrastructures

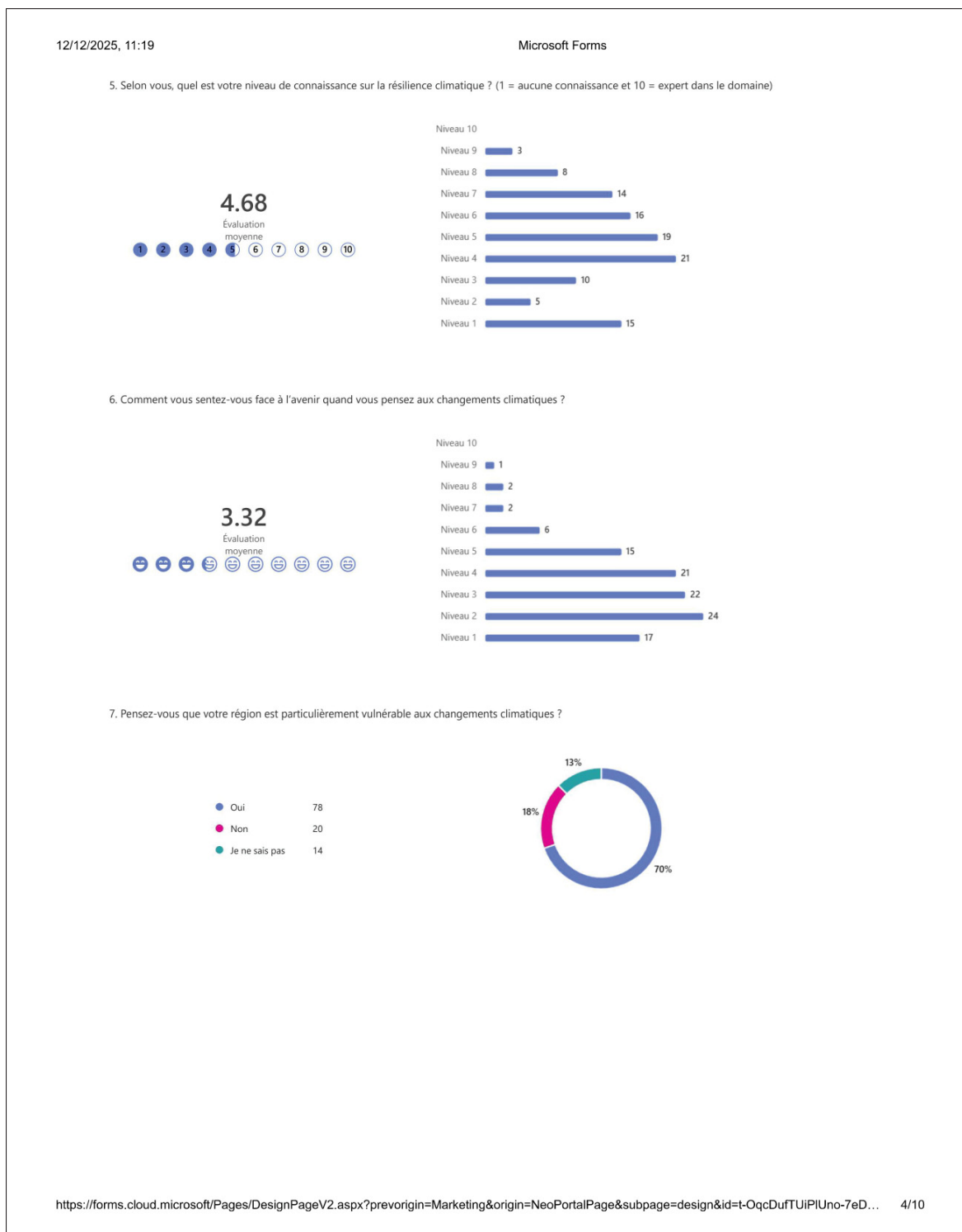


Figure-A I-4 Sondage sur l'adaptation aux changements climatiques et la résilience des infrastructures

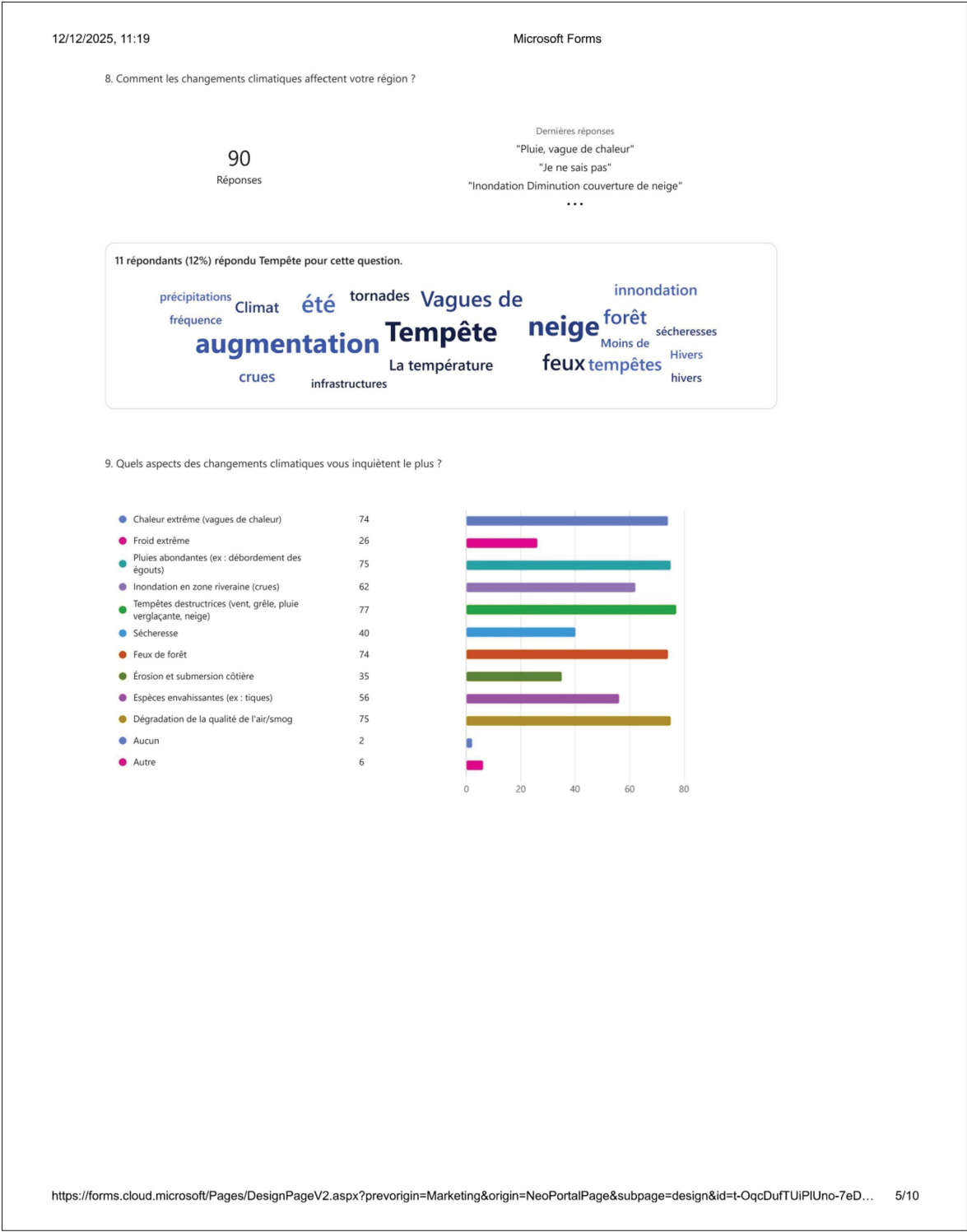


Figure-A I-5 Sondage sur l’adaptation aux changements climatiques et la résilience des infrastructures

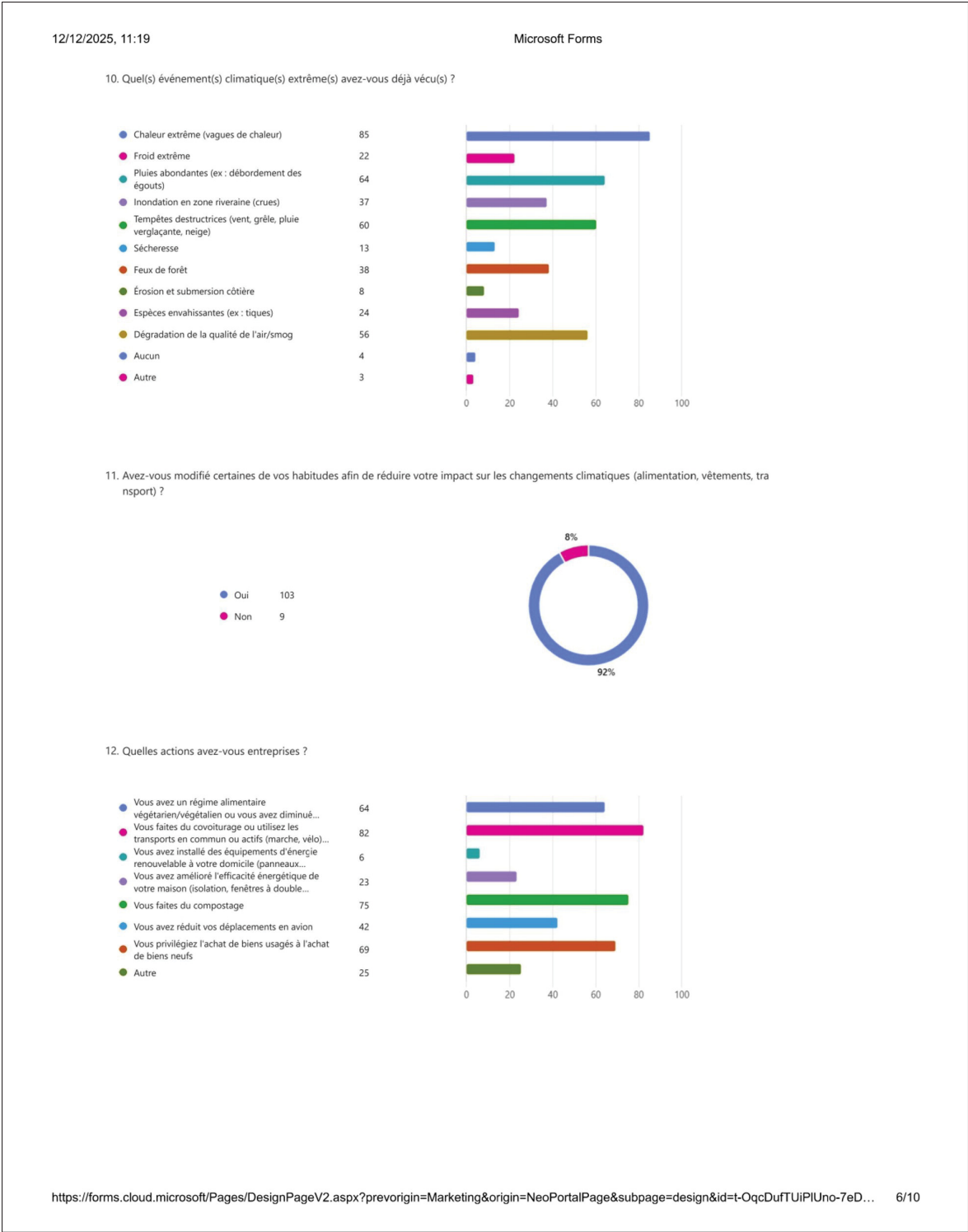


Figure-A I-6 Sondage sur l'adaptation aux changements climatiques et la résilience des infrastructures

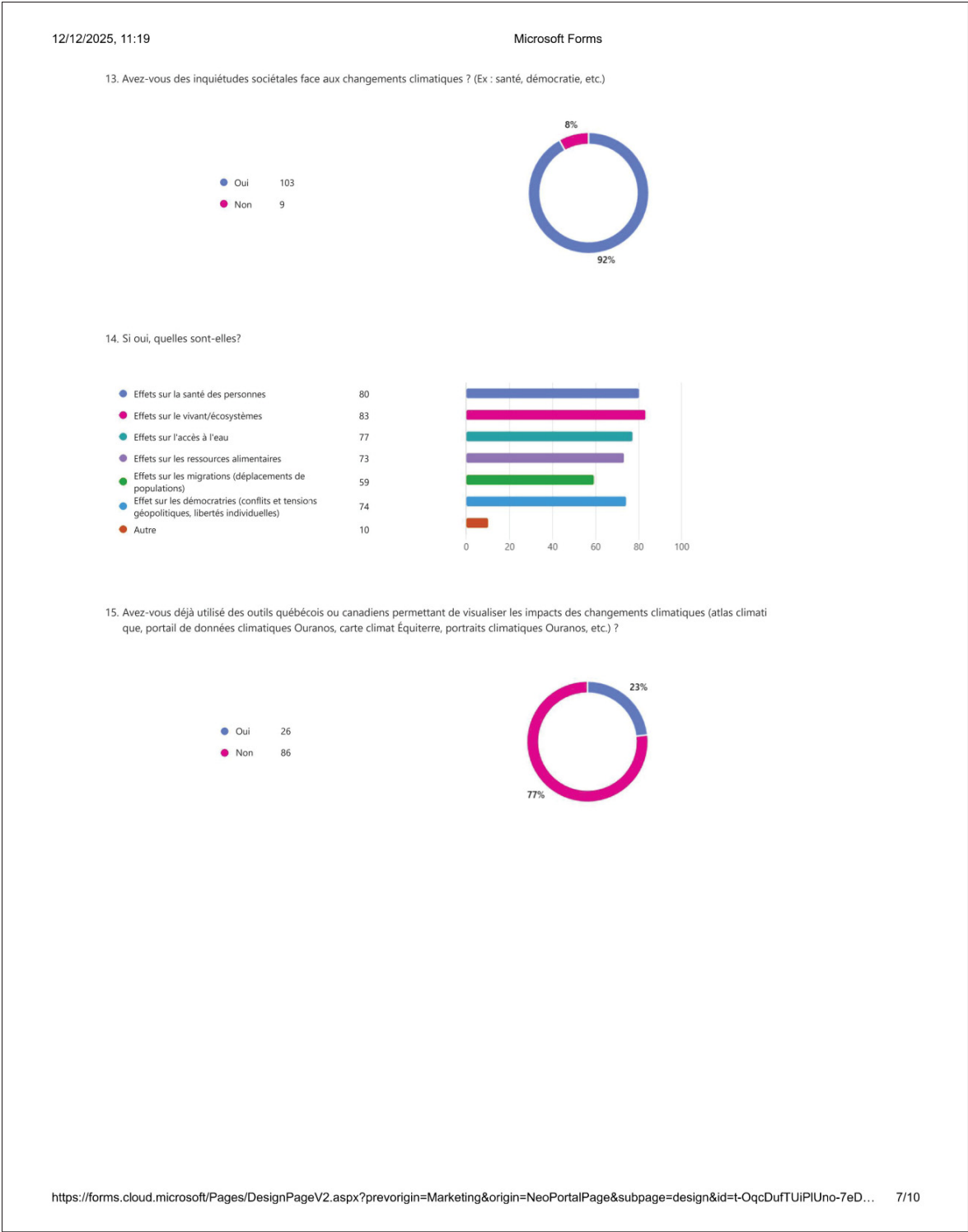


Figure-A I-7 Sondage sur l’adaptation aux changements climatiques et la résilience des infrastructures

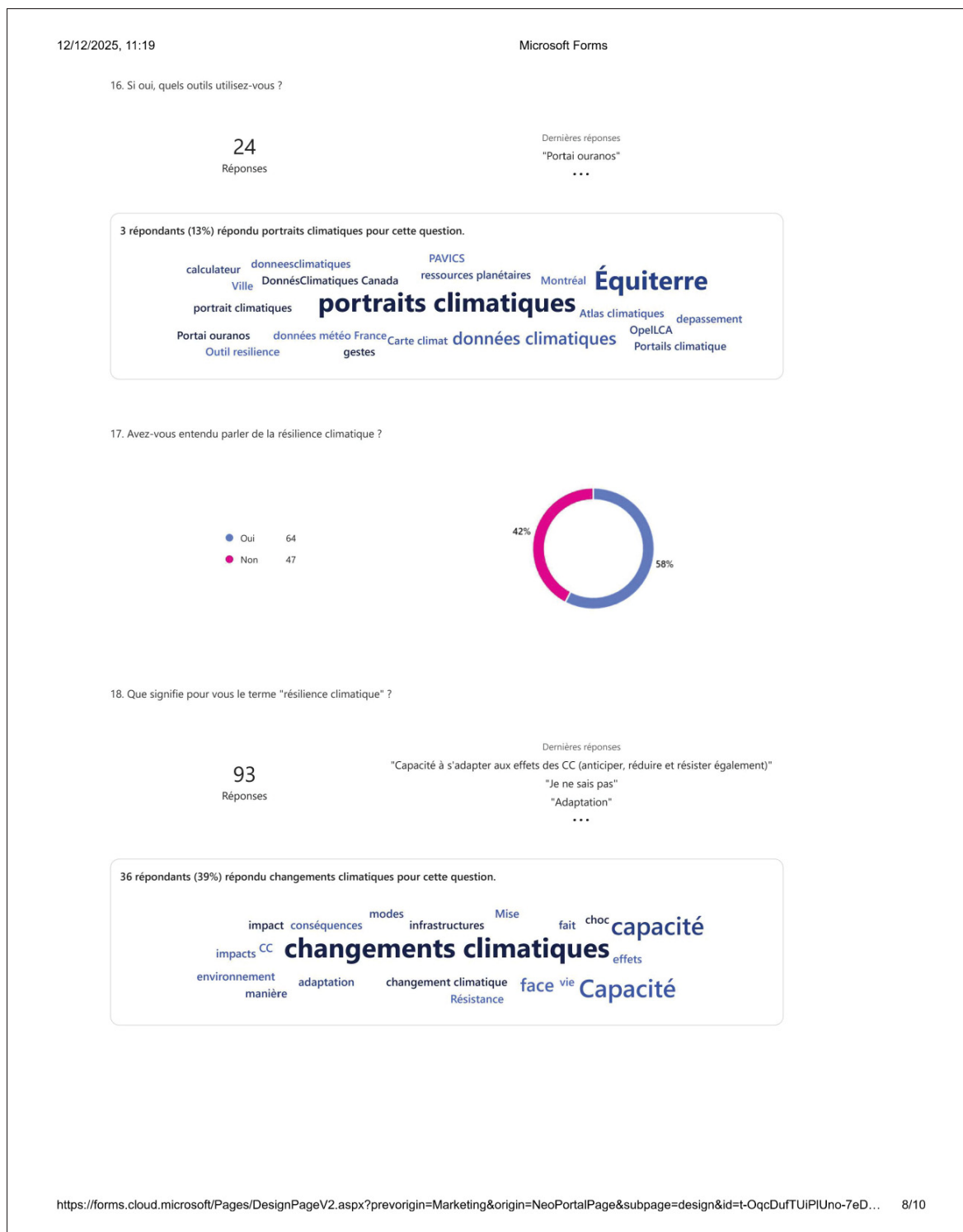


Figure-A I-8 Sondage sur l'adaptation aux changements climatiques et la résilience des infrastructures

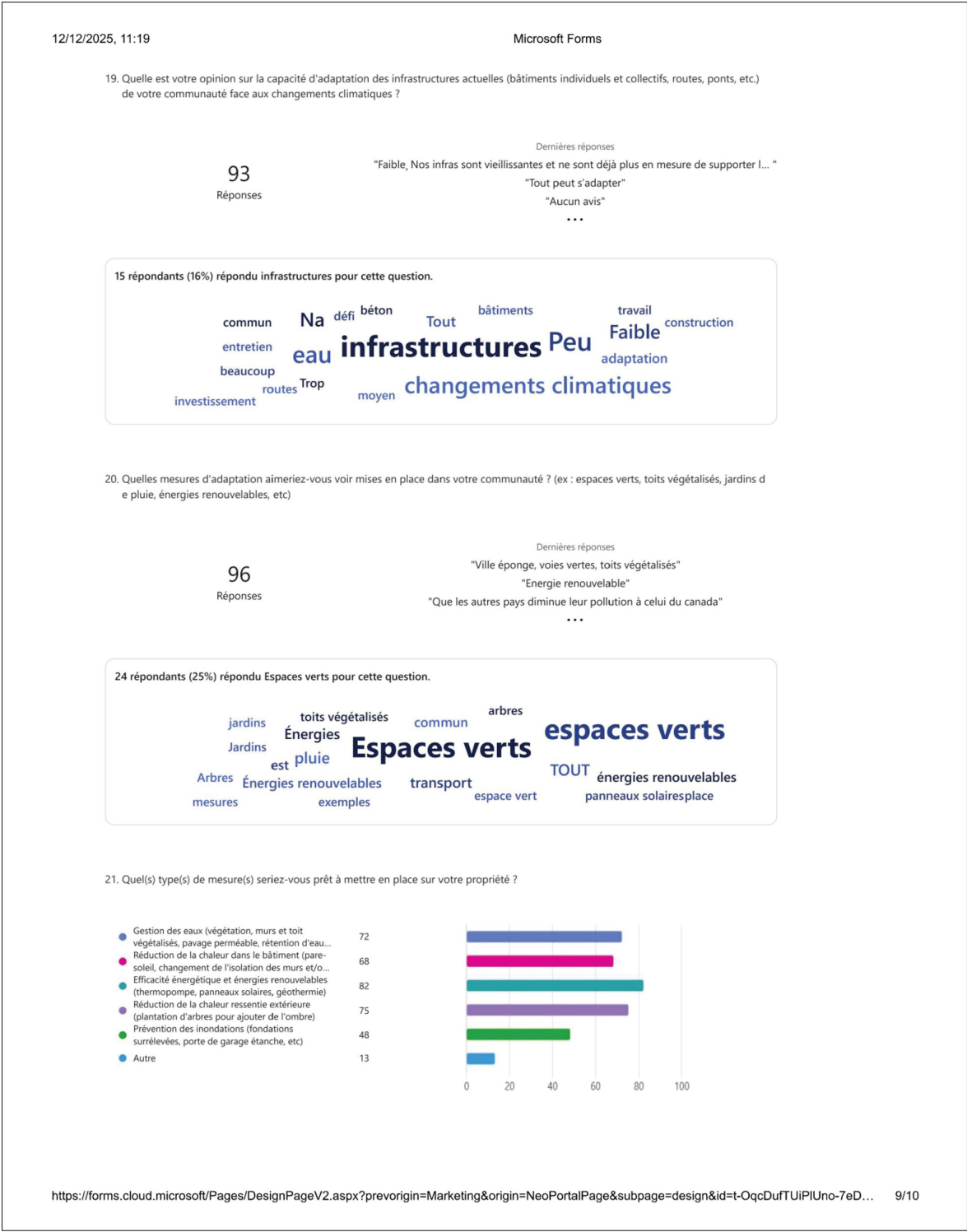


Figure-A I-9 Sondage sur l’adaptation aux changements climatiques et la résilience des infrastructures

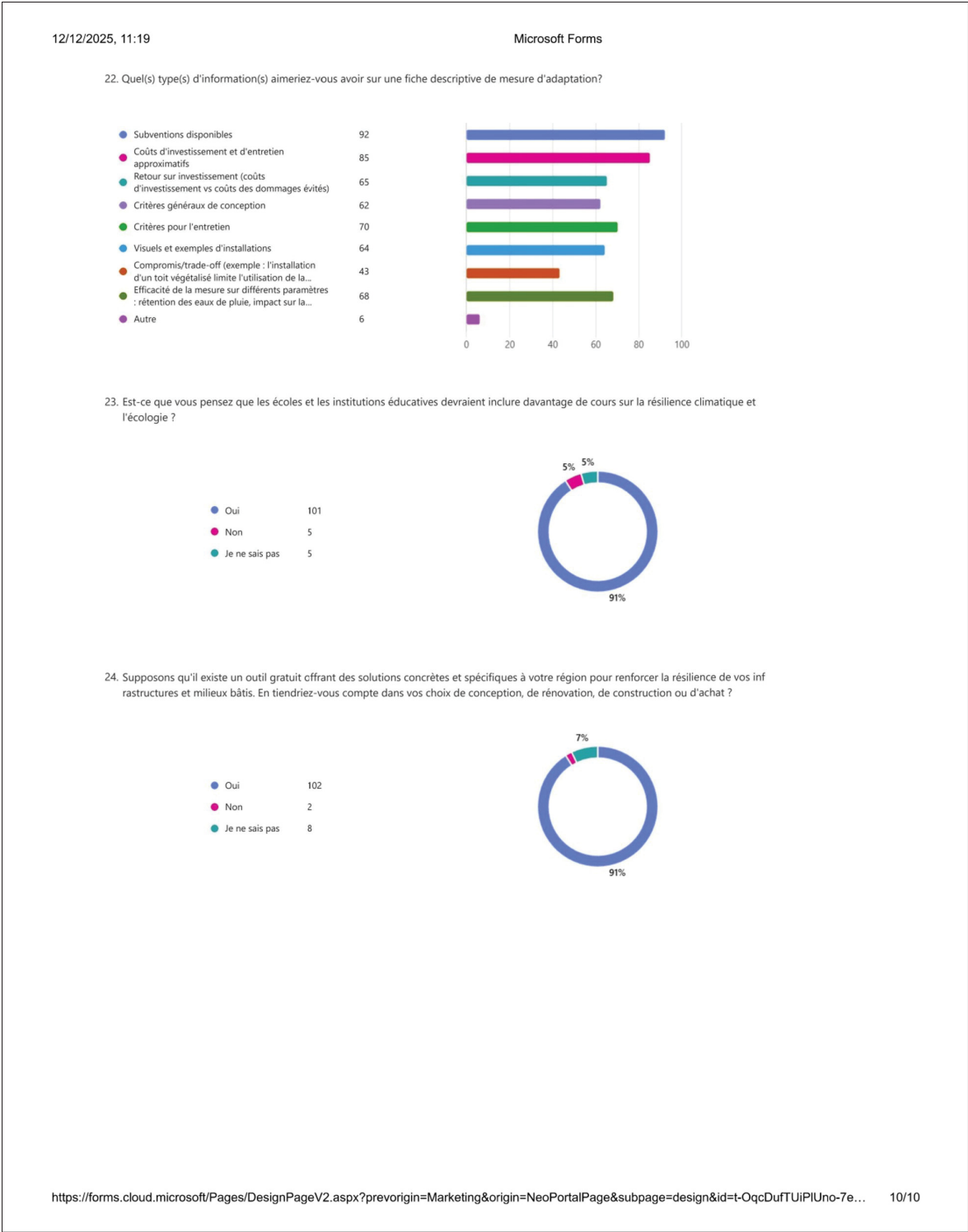


Figure-A I-10 Sondage sur l’adaptation aux changements climatiques et la résilience des infrastructures

ANNEXE II

SCRIPT PYTHON POUR L'EXTRACTION ET LA MANIPULATION DES FICHIERS

Le script Python utilisé pour automatiser le téléchargement et le découpage de fichiers GeoTIFF climatiques à l'aide de QGIS se trouve sur la plateforme GitHub à l'adresse suivante : <https://github.com/Jc-Faucher/decoupage-geotiff-qgis.git>.

Le code contient trois fichiers python détaillés comme suit :

- **Téléchargement_tiffs_portraits.py** : Script permettant de télécharger les dossiers ZIP contenant des fichiers .TIFF de projections climatiques provenant de Portraits Climatiques ;
- **Découpe_QGIS.py** : Script principal. Initialise QGIS, lit les fichiers ZIP contenant les rasters climatiques et effectue le découpage selon un shapefile ;
- **Criteres_indicateurs_portraits.py** : Dictionnaire des critères par fichier ZIP (scénarios, périodes, récurrences, etc.).

ANNEXE III

TABLEAU PRÉSENTANT LES CRITÈRES DE SÉLECTION DES INDICATEURS DE PORTRAITS CLIMATIQUES

Tableau-A III-1 Critères de sélection des indicateurs de Portraits climatiques

Indicateur	Nom dans l'outil	Nom du dossier zip	Lien du dossier	Valeur / delta	Réurrence	Scénario	Percentile	Période
Delta de la moyenne des températures	Hausse des températures moyennes	espog_tg_mean.zip	https://portraits.ouranos.ca/donnees/horiz_anom/espog_tg_mean.zip	delta	annual	ssp245, ssp370	p90	2021–2050, 2041–2070, 2071–2100
Cycles de gel-dégel	Redoux hivernaux — Événements de gel-dégel	espog_dlyfrzthw.zip	https://portraits.ouranos.ca/donnees/horiz_abs/espog_dlyfrzthw.zip	valeur	annual	ssp245, ssp370	p50	1991–2020, 2021–2050, 2041–2070, 2071–2100
Moyenne des températures estivales	Établissement des moustiques — Moyenne des températures l'été	espog_tg_mean.zip	https://portraits.ouranos.ca/donnees/horiz_abs/espog_tg_mean.zip	valeur	JJA	ssp245, ssp370	p50	1991–2020, 2021–2050, 2041–2070, 2071–2100
Degrés-jours cumulés au-dessus de 0 °C	Établissement des tiques — Degrés-jours au-dessus de 0 °C	espog_degree_days_above_0.zip	https://portraits.ouranos.ca/donnees/horiz_abs/espog_degree_days_above_0.zip	valeur	annual	ssp245, ssp370	p50	1991–2020, 2021–2050, 2041–2070, 2071–2100
Moyenne des températures maximales estivales	Températures maximales l'été	espog_tx_mean.zip	https://portraits.ouranos.ca/donnees/horiz_abs/espog_tx_mean.zip	valeur	JJA	ssp245, ssp370	p50	1991–2020, 2021–2050, 2041–2070, 2071–2100
Delta du nombre de nuits tropicales (Tmin > 20 °C)	Hausse des nuits très chaudes	espog_tn_days_above_20.zip	https://portraits.ouranos.ca/donnees/horiz_anom/espog_tn_days_above_20.zip	delta	annual	ssp245, ssp370	p90	2021–2050, 2041–2070, 2071–2100
Nbr de vagues de chaleur de classe 1	Nombre de vagues de chaleur	espog_heat_spell_frequency_class1.zip	https://portraits.ouranos.ca/donnees/horiz_abs/espog_heat_spell_frequency_class1.zip	valeur	annual	ssp245, ssp370	p50	1991–2020, 2021–2050, 2041–2070, 2071–2100
Jour le plus chaud	Jour le plus chaud	espog_tx_max.zip	https://portraits.ouranos.ca/donnees/horiz_abs/espog_tx_max.zip	valeur	annual	ssp245, ssp370	p50	1991–2020, 2021–2050, 2041–2070, 2071–2100

Suite à la page suivante

Tableau-A III-1 — suite

Indicateur	Nom dans l'outil	Nom du dossier zip	Lien du dossier	Valeur / delta	Réurrence	Scénario	Percentile	Période
Moyenne des températures minimales l'hiver	Températures minimales l'hiver	espog_tn_mean.zip	https://portraits.ouranos.ca/donnees/horiz_abs/espog_tn_mean.zip	valeur	DJF	ssp245, ssp370	p50	1991–2020, 2021–2050, 2041–2070, 2071–2100
Nuit la plus froide	Nuit la plus froide	espog_tn_min.zip	https://portraits.ouranos.ca/donnees/horiz_abs/espog_tn_min.zip	valeur	annual	ssp245, ssp370	p50	1991–2020, 2021–2050, 2041–2070, 2071–2100
Précipitations maximales durant 1 jour l'été	Pluies intenses	espog_rx1day.zip	https://portraits.ouranos.ca/donnees/horiz_abs/espog_rx1day.zip	valeur	JJA	ssp245, ssp370	p50	1991–2020, 2021–2050, 2041–2070, 2071–2100
Delta des précipitations accumulées solides l'hiver (mm)	Variation des précipitations neigeuses l'hiver	espog_preptot.zip	https://portraits.ouranos.ca/donnees/horiz_anom/espog_preptot.zip	delta	DJF	ssp245, ssp370	p90	2021–2050, 2041–2070, 2071–2100
Nombre annuel d'épisodes de pluie verglaçante (>=6h)	Nombre d'épisodes de pluies verglaçantes de longue durée	verglas_prfr_events_longer_6h.zip	https://portraits.ouranos.ca/donnees/wl_abs/verglas_prfr_events_longer_6h.zip	valeur	annual	rcp45, rcp85	p50	1991–2020, 2021–2050, 2041–2070, 2071–2100
Fréquence des séquences sèches	Périodes sèches — Indicateur de sécheresse météorologique	espog_dry_spell_frequency.zip	https://portraits.ouranos.ca/donnees/horiz_abs/espog_dry_spell_frequency.zip	valeur	annual	ssp245, ssp370	p50	1991–2020, 2021–2050, 2041–2070, 2071–2100

ANNEXE IV

TABLEAU DES INDICATEURS DE VULNÉRABILITÉ

Tableau-A IV-1: Cartographie des aléas et sources de données

Aléas	Nom de la carte sur le portail	Nom de la variable dans l'outil	Source de données
Chaleur extrême	Vulnérabilité aux vagues de chaleur	Vulnérabilité aux chaleurs extrêmes	Données ouvertes VDM – Couche Vulnérabilité aux vagues de chaleur 2022
	Îlots de chaleur intra-urbains (ICIU) – sensibilité physique	Sensibilité physique : îlots de chaleur	<i>Géoportail de santé publique du Québec</i>
	Sensibilité sociale aux vagues de chaleur	Sensibilité de la population aux chaleurs extrêmes	Données ouvertes VDM – Couche Sensibilité Sociale 2022 – Champ ChaleurCI
	Sensibilité territoriale aux vagues de chaleur	Sensibilité des infrastructures (réseau routier et voies ferrées) aux chaleurs extrêmes	Données ouvertes VDM – Couche Sensibilité Territoriale 2022 – Champ ChaleurCI
	Sensibilité environnementale aux vagues de chaleur	Sensibilité des écosystèmes (végétaux, milieux aquatiques) aux chaleurs extrêmes	Données ouvertes VDM – Couche Sensibilité Environnementale 2022 – Champ ChaleurCI

(suite à la page suivante)

Tableau-A IV-1: Cartographie des aléas et sources de données (*suite*)

Aléas	Nom de la carte sur le portail	Nom de la variable dans l'outil	Source de données
Pluies abondantes	Vulnérabilité aux pluies abondantes	Vulnérabilité aux pluies abondantes	Données ouvertes VDM – Couche Vulnérabilité aux pluies abondantes 2022
	Zones de ruissellement excessif ; cuvettes de rétention (sensibilité physique)	Sensibilité physique : ruissellement excessif	<i>Données ouvertes VDM – Carte de cuvettes de rétention d'eau de ruissellement</i>
	Sensibilité sociale aux pluies abondantes	Sensibilité de la population aux pluies abondantes	Données ouvertes VDM – Couche Sensibilité Sociale 2022 – Champ PluiesCI
	Sensibilité territoriale aux pluies abondantes	Sensibilité des infrastructures aux pluies abondantes	Données ouvertes VDM – Couche Sensibilité Territoriale 2022 – Champ PluiesCI
Crues	Vulnérabilité aux crues	Vulnérabilité aux crues	Données ouvertes VDM – Couche Vulnérabilité aux crues 2022
	Sensibilité sociale aux crues	Sensibilité de la population aux crues	Données ouvertes VDM – Couche Sensibilité Sociale 2022 – Champ CruesCI

(suite à la page suivante)

Tableau-A IV-1: Cartographie des aléas et sources de données (*suite*)

Aléas	Nom de la carte sur le portail	Nom de la variable dans l'outil	Source de données
	Sensibilité territoriale aux crues	Sensibilité des infrastructures (réseau d'égouts, bâtiments, sites critiques, lieux d'intérêt, réseau routier) aux crues	Données ouvertes VDM – Couche Sensibilité Territoriale 2022 – Champ CruesCI
Tempêtes destructrices	Vulnérabilité aux tempêtes destructrices	Vulnérabilité aux tempêtes destructrices	Données ouvertes VDM – Couche Vulnérabilité aux tempêtes destructrices 2022
	Sensibilité sociale aux tempêtes destructrices	Sensibilité de la population aux tempêtes destructrices	Données ouvertes VDM – Couche Sensibilité Sociale 2022 – Champ TempeteCI
	Sensibilité territoriale aux tempêtes destructrices	Sensibilité des infrastructures (bâtiments, sites critiques et lieux d'intérêt) aux tempêtes destructrices	Données ouvertes VDM – Couche Sensibilité Territoriale 2022 – Champ TempeteCI
Sécheresses	Vulnérabilité aux sécheresses	Vulnérabilité aux sécheresses	Données ouvertes VDM – Couche Vulnérabilité aux sécheresses 2022

(suite à la page suivante)

Tableau-A IV-1: Cartographie des aléas et sources de données (*suite*)

Aléas	Nom de la carte sur le portail	Nom de la variable dans l'outil	Source de données
	Zones avec potentiel de contraction des sols (sensibilité physique)	Sensibilité physique : tassement	<i>Données ouvertes VDM – Carte des dépôts meubles de 1975</i>
	Sensibilité sociale aux sécheresses	Sensibilité de la population aux sécheresses	Données ouvertes VDM – Couche Sensibilité Sociale 2022 – Champ SecheresCI
	Sensibilité territoriale aux sécheresses	Sensibilité des infrastructures (bâtiments) aux sécheresses	Données ouvertes VDM – Couche Sensibilité Territoriale 2022 – Champ SecheresCI

BIBLIOGRAPHIE

- Alberti-Dufort, A., Ing, M., Crouhen, V. B., Demers-Bouffard, D., Hennigs, R., Legault, S., Cunningham, J. & Ouranos. (2022). *Québec ; Chapitre 2 dans Le Canada dans un climat en changement : Le rapport sur les Perspectives régionales*.
- Angelica Alberti-Dufort & Raphaël Desjardins. (2022). *Guide de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional 2022*.
- Annie Chaloux. (2023). *Le Climatoscope* 5e édition.
- Arsenault, L.-P. (2023). Triste record pour les feux de forêt au Québec en 2023. *Radio-Canada*. Repéré à <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/2026545/quebec-octroi-sopfeu-reboisement-incendie>.
- Benessaieh, K. (2025). Pluies torrentielles : Des pluies plus intenses que Debby. *La Presse*. Repéré à <https://www.lapresse.ca/actualites/grand-montreal/2025-07-14/pluies-torrentielles/des-pluies-plus-intenses-que-debby.php>.
- Berry, P. & Schnitter, R. (2022). *La santé des Canadiens et des Canadiennes dans un climat en changement : faire progresser nos connaissances pour agir*. Repéré le 2025-11-18 à <https://ostrnrcan-dostrncan.canada.ca/handle/1845/134215>.
- BTER. (2025). Vulnérabilité aux changements climatiques - Site web des données ouvertes de la Ville de Montréal. Repéré le 2025-09-30 à <https://donnees.montreal.ca/dataset/vulnerabilite-changements-climatiques#methodology>.
- Champagne St-Arnaud, V., Labonté, K., Olivier, A. & Vincent, S.-J. (2024). *Baromètre de l'action climatique 2024 : Disposition des Québécoises et des Québécois envers les défis climatiques*. Repéré le 2025-10-23 à https://cdn.prod.website-files.com/65de237a907486cd99c45264/6751cde275af0d688f16b19c_BarometreClimat2024_WEB_compressed.pdf.
- Deliang Chen, Maisa Rojas, Bjørn H. Samset, Kim Cobb, Aida Diongue-Niang, Paul Edwards, Seita Emori, Sergio Henrique Faria, Ed Hawkins, Pandora Hope, Philippe Huybrechts, Malte Meinshausen, Sawsan Khair Elsied Abdel Rahim Mustafa, Gian-Kasper Plattner & Anne Marie Treguier. (2023). Framing, Context and Methods. Dans *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis : Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (éd. 1, pp. 147–286). Cambridge University Press. doi : 10.1017/9781009157896.

- ECCC. (2025). *DonneesClimatiques.ca – Donneesclimatiques.ca fournit des données climatiques à haute résolution pour aider les décideurs à bâtir un meilleur avenir pour le Canada*. Repéré le 2026-02-03 à <https://donneesclimatiques.ca/>.
- Environnement et Changement climatique Canada. (2023). *Indicateurs canadiens de durabilité de l'environnement : Changements de la température au Canada*.
- Environnement et du Changement climatique Canada. (2023). *Stratégie nationale d'adaptation du Canada - Bâtir des collectivités résilientes et une économie forte*. Repéré le 2025-05-06 à https://publications.gc.ca/collections/collection_2023/eccc/en4/En4-544-2023-fra.pdf.
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J. & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937–1958. doi : 10.5194/gmd-9-1937-2016.
- GIEC. (2013). Summary for Policymakers. Dans *Climate Change 2013 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- GIEC. (2015). *GIEC, 2014 : Changements climatiques 2014 : Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Sous la direction de l'équipe de rédaction principale, R.K.Pachauri et L.A.Meyer]*. Genève (Suisse).
- GIEC. (2023). *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability : Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (éd. 1). Cambridge University Press. doi : 10.1017/9781009325844.
- Gouvernement du Canada. (2023). *Aperçu du CMIP6 et des profils socioéconomiques partagés*. Repéré le 2025-10-08 à [https://scenarios-climatiques.canada.ca/?page=cmip6-overview-notes#phase-6-du-projet-d%E2%80%99intercomparaison-de-mod%C3%A8les-coupl%C3%A9s-\(cmip6\)](https://scenarios-climatiques.canada.ca/?page=cmip6-overview-notes#phase-6-du-projet-d%E2%80%99intercomparaison-de-mod%C3%A8les-coupl%C3%A9s-(cmip6)).
- ICLEI Canada. (2025). *Climate Communications Playbook : Behavioural strategies for community action*. Repéré le 2025-06-26 à <https://icleicanada.org/wp-content/uploads/2025/01/ICLEI-Canada-2025-Climate-Communications-Playbook-1126.pdf>.
- INSPQ. (2023). *Îlots de chaleur/fraîcheur urbains, écarts de température et indice d'intensité d'îlots de chaleur urbains 2020-2022, [Jeu de données] - Données Québec*. Repéré le 2025-08-09 à <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/ilots-de-chaleur-fraicheur-urbains-et-ecarts-de-temperature-relatifs-2020-2022>.

- INSPQ. (2024a). Cartographie des îlots de chaleur urbains | INSPQ. Repéré le 2025-09-07 à <https://www.inspq.qc.ca/changements-climatiques/actions/ilots-chaleur/cartographie-ilots-de-chaleur-urbains>.
- INSPQ. (2024b). Parler efficacement des changements climatiques.
- INSPQ. (2025). *Vagues de chaleur extrême et chaleur estivale au Québec : impacts sur la santé de 2010 à 2024*.
- Isabelle Charron. (2016). *Guide sur les scénarios climatiques : Utilisation de l'information climatique pour guider la recherche et la prise de décision en matière d'adaptation*.
- Isabelle Thomas, Nathalie Bleau, Pamela Soto Abasolo, Guillaume Desjardins-Dutil, Musandji Fuamba & Sonia Kadi. (2012). *Analyser la vulnérabilité sociétale et territoriale aux inondations en milieu urbain dans le contexte des changements climatiques, en prenant comme cas d'étude la Ville de Montréal*.
- June-Yi Lee, Jochem Marotzke, Govindasamy Bala, Long Cao, Susanna Corti, John P. Dunne, Francois Engelbrecht, Erich Fischer, John C. Fyfe, Christopher Jones, Amanda Maycock, Joseph Mutemi, Ousmane Ndiaye & Swapna Panickal. (2023). Future Global Climate : Scenario-based Projections and Near-term Information. Dans *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis : Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (éd. 1, pp. 553–672). Cambridge University Press. doi : 10.1017/9781009157896.
- Lavoie, J., Bourgault, P., Smith, T. J., Logan, T., Leduc, M., Caron, L.-P., Gammon, S. & Braun, M. (2024). An ensemble of bias-adjusted CMIP6 climate simulations based on a high-resolution North American reanalysis. *Scientific Data*, 11(1), 64. doi : 10.1038/s41597-023-02855-z.
- Liza Leclerc, Robert Siron, Beatriz Osorio, Hélène Côté & Travis Logan. (2015). *VERS L'ADAPTATION : Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec*. Repéré le 2024-06-17 à <https://www.ouranos.ca/sites/default/files/2022-12/proj-201419-synthese2015-rapportcomplet.pdf>.
- Lulham, N., Warren, F. J., Walsh, K. A. & Szwarc, J. (2023). *Le Canada dans un climat en changement : rapport de synthèse*. Repéré le 2025-09-09 à <https://ostrnrcan-dostrncan.canada.ca/handle/1845/271934>.
- Maxime Boivin, Valériane Champagne St-Arnaud, Anne-Sara Briand, Mélissa Généreux, Erick Lachapelle, Elsa Landaverde, Alizée Pillod & Hélène Scheed. (2023). *Communiquer sur L'adaptation aux changements climatiques dans un contexte pandémique au québec*.

- Meinshausen, M., Nicholls, Z. R. J., Lewis, J., Gidden, M. J., Vogel, E., Freund, M., Beyerle, U., Gessner, C., Nauels, A., Bauer, N., Canadell, J. G., Daniel, J. S., John, A., Krummel, P. B., Luderer, G., Meinshausen, N., Montzka, S. A., Rayner, P. J., Reimann, S., Smith, S. J., van den Berg, M., Velders, G. J. M., Vollmer, M. K. & Wang, R. H. J. (2020). The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500. *Geoscientific Model Development*, 13(8), 3571–3605. doi : 10.5194/gmd-13-3571-2020.
- MELCCFP. (2025). AHQM. Repéré le 2026-02-03 à <https://www.cephq.gouv.qc.ca/atlas-hydroclimatique/carte-indicateurs/index.htm>.
- Nations Unies. (s.d.). Communiquer sur les changements climatiques | Nations Unies. United Nations. Repéré le 2025-04-20 à <https://www.un.org/fr/climatechange/communicating-climate-change>.
- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J.-F., Lowe, J., Meehl, G. A., Moss, R., Riahi, K. & Sanderson, B. M. (2016). The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(9), 3461–3482. doi : 10.5194/gmd-9-3461-2016.
- ONU. (2015). ACCORD DE PARIS. Repéré le 2025-10-29 à https://treaties.un.org/doc/Treaties/2016/02/20160215%2006-03%20PM/Ch_XXVII-7-d.pdf.
- Ouranos. (s.d.). Mise à échelle des données climatiques. Repéré le 2025-11-12 à <https://www.ouranos.ca/fr/comprendre-les-concepts-en-climat/echelle-donnees-climatiques>.
- Ouranos. (s.d.). Modèles physiques de climat. Repéré le 2025-10-18 à <https://www.ouranos.ca/fr/comprendre-les-concepts-en-climat/modeles-physiques-climat>.
- Ouranos. (s.d.). Températures - Changements projetés. Repéré le 2025-11-13 à <https://www.ouranos.ca/fr/phenomenes-climatiques/temperatures-changements-projetes>.
- Ouranos. (2024). *Guide de recommandations scientifiques visant à faciliter l'utilisation de projections climatiques*. Repéré le 2025-04-24 à https://www.ouranos.ca/sites/default/files/2024-01/Guide_de_recommandations_scientifiques_visant_a_faciliter_lutilisation_de_projections_climatiques.pdf.
- Ouranos. (2025). Portraits climatiques. Repéré le 2026-02-03 à <https://portraits.ouranos.ca/>.
- Ouranos & MELCCFP. (2024). *Élaborer un plan d'adaptation aux changements climatiques - Guide pour les organismes municipaux*.

Prairie Climate Centre. (s.d.). Incertitude | Atlas climatique du Canada. Repéré à <https://atlasclimatique.ca/incertitude>.

Priyadarshi R. Shukla, Jim Skea, Andreas Reinhard Reisinger, Raphael Slade, Alaa Al Khourdajie, Apoorva Hasija, Juliette Malley, Roger Fradera, Malek Belkacemi, Géninha Lisboa, David McCollum, Purvi Vyas, Minal Pathak, Renée van Diemen & Sigourney Luz. (2022). IPCC, 2022 : Summary for Policymakers. Dans *Climate Change 2022 : Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.

Solomon, S., Alley, R. B., Chidthaisong, A., Gregory, J. M., Hegerl, G. C., Heimann, M., Hewitson, B., Jouzel, J., Kattsov, V., Lohmann, U., Matsuno, T., Molina, M., Arblaster, J., Denman, K. L., Fahey, D. W., Jones, P. D., Knutti, R., Treut, H. L., Lemke, P., Meehl, G., Boonpragob, K., Giorgi, F., Jallow, B. P., Qin, D., Manning, M., Alley, R. B., Berntsen, T., Bindoff, N. L., Chen, Z., Chidthaisong, A., Gregory, J. M., Hegerl, G. C., Heimann, M., Hewitson, B., Hoskins, B. J., Joos, F., Jouzel, J., Kattsov, V., Lohmann, U., Matsuno, T., Molina, M., Nicholls, N., Raga, G., Ramaswamy, V., Ren, J., Rusticucci, M., Somerville, R., Stocker, T. F., Whetton, P., Wood, R. A. & Wratt, D. (2007). Résumé technique - Changements climatiques 2007 : Les éléments scientifiques. Contribution du groupe de travail I au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur les changements climatiques.

Ville de Montréal. (2020). Plan climat 2020–2030 MTL. Repéré le 2023-09-13 à https://portail-m4s.s3.montreal.ca/pdf/Plan_climat%2020-16-16-VF4_VDM.pdf.

Ville de Montréal. (2025a). Cuvettes de rétention d'eau de ruissellement [Ensemble de données]. Données ouvertes de la Ville de Montréal. Repéré le 2025-11-09 à <https://donnees.montreal.ca/dataset/cuvettes-retention-eau-ruissellement#additional-info>.

Ville de Montréal. (2025b). Limites administratives de l'agglomération de Montréal (arrondissements et villes liées) [Ensemble de données]. Données ouvertes de la Ville de Montréal. Repéré le 2025-11-07 à <https://donnees.montreal.ca/dataset/limites-administratives-agglomeration>.

Ville de Paris. (2023). *Paris à 50°C - Synthèse*. Repéré le 2025-09-25 à https://cdn.paris.fr/paris/2025/07/22/paris_a_50-c_synthese-EqzW.pdf.

Ville de Paris. (2024). *Paris à 50°C - Guide méthodologique*. Repéré le 2025-09-25 à https://cdn.paris.fr/paris/2025/07/22/paris_a_50-c_kit_methodologique-um2o.pdf.