



Photo: V. Bourduas Crouhen et A. Poulin

**COMPLEMENTARITE ET DIVERSITE QUEBEC-MEXIQUE EN MATIERE DE GESTION DE L'EAU DANS LE
CONTEXTE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES : IMPACTS SUR LES REGIMES HYDRIQUES ET PRISE DE
DECISION EN ADAPTATION**

Annie, Poulin, ing. PhD
Mathias Glaus, ing., PhD

Professeurs, École de technologie supérieure

Les résultats et opinions présentés dans cette publication sont entièrement la responsabilité des auteurs et n'engagent pas Ouranos ni ses membres.



Table des matières

1. Introduction	6
2. Contexte / objectifs.....	7
3. Cadre théorique / compte-rendu de la revue de la littérature	9
3.1 Axe I Produire des connaissances nouvelles sur les extrêmes climatiques	9
3.2 Axe II Établir une structure d'analyse des échanges d'informations et d'outil d'aide à la planification de mesures d'adaptation	11
4. Méthodologie / données	13
4.1 Axe I Produire des connaissances nouvelles sur les extrêmes climatiques	13
4.2 Axe II Établir une structure d'analyse des échanges d'informations et d'outil d'aide à la planification de mesures d'adaptation	14
5. Résultats.....	18
5.1 Axe 1 Produire des connaissances nouvelles sur les extrêmes climatiques	18
5.1.1 Territoires à l'étude.....	18
5.1.2 Objectif I.1 Modélisation climatique fine résolution et incertitudes en modélisation hydroclimatique en périodes de crues	18
5.1.3 Objectif I.2 Modélisation hydroclimatique sous-journalière en période de crues.....	26
5.1.4 Objectif I.3 Modélisation hydroclimatique en périodes d'étiages	31
5.2 Axe II Établir une structure d'analyse des échanges d'informations et d'outil d'aide à la planification de mesures d'adaptation	35
5.2.1 Analyse des échanges d'informations associées à l'adaptation aux changements climatiques	35
5.2.2 Outil de structuration des informations hydroclimatiques en réponse aux besoins des utilisateurs	38
6. Analyse et discussion	42
7. Conclusion et recommandations	45
8. Références	49
Liste des Annexes.....	53

Liste des tableaux

Tableau 1.1 Identification des partenaires du projet et description de leurs contributions.....	6
Tableau 3.1 Synthèse de cadres d'application (frameworks) dédiés à l'adaptation aux changements climatiques, suivi & évaluation (ACC,S&E) [tirés de : Bours et al., 2013 et Climate Eval, 2015]	12
Tableau 4.1 Description des approches méthodologies et des données utilisées dans le cadre de l'Axe I du projet.	13
Tableau 4.2 Description des approches méthodologies et des données utilisées dans le cadre de l'Axe II du projet.	14
Tableau 5.1 Stratégies de calage-validation testées au Québec et au Mexique en conditions climatiques contrastées	22
Tableau 5.2 Liste et description des formulations d'ETP utilisées dans le cadre des travaux de l'objectif I.3 sur les étiages. L'ensemble des références peut être retrouvé dans l'article de Dallaire et al. (2021).	32
Tableau 5.3 Principales caractéristiques des nœuds (acteurs) et des liens (liens) du réseau d'échange d'information pour le Québec et le Mexique.	37

Liste des figures

Figure 1.1 Illustration des quelques similitudes et différences qui caractérisent le Québec et le Mexique, sur fond de variabilité spatiale des précipitations totales annuelles moyennes calculées sur la période historique 1976-2005, à partir des données sur grille de Livneh et al. (2015) pour le Mexique et à partir des données sur Grille de Bergeron (2017) pour le Québec (mm éq. eau /an). * GIEBV = Gestion intégrée de l'eau par bassin versant.	7
Figure 2.1 Axes du projet et objectifs associés à chacun des axes.	7
Figure 3.1: Chaîne de modélisation hydroclimatique sur laquelle s'appuient les études s'intéressant aux impacts des changements climatiques sur les ressources en eau, dans le cadre de ce projet et de manière plus générale.	10
Figure 4.1 Structure schématique de l'outil matriciel développé.	16
Figure 5.1 Méthodologie associée au premier objectif de la thèse de Mariana Castañeda Gonzalez.	19
Figure 5.2 Enveloppes d'incertitude sur le débit annuel moyen, issues de la modélisation climatique, du post-traitement et de la modélisation hydrologique dans des bassins a) du Québec, b) du Mexique (zone aride), c) du Mexique (zone humide). L'amplitude complète de l'incertitude est montrée (enveloppes grise et bleue), de même que les 25 ^e et 75 ^e quartiles (traits pointillés noirs et bleus) et les médianes (traits pleins noirs et bleus).	20
Figure 5.3 Résultats de l'analyse de décomposition de la variance appliquée à l'étude de la contribution des diverses sources d'incertitude sur les crues de périodes de retour 2, 5, 10, 20, 50 et 100 ans, en climats historique et futur, dans des bassins versants du Québec et du Mexique. Les sources d'incertitude considérées sont : les simulations du MRCC5 réalisées à l'aide de pilotes différents (bleu), les modèles hydrologiques (vert), les méthodes de post-traitement (jaune) et les lois statistiques utilisées pour l'analyse fréquentielle (rouge).	21
Figure 5.4 Illustration de la stratégie de calage-validation en conditions contrastées de température (années froides-années chaudes). Chacune des cases correspond à une année de l'historique disponible, pour un bassin versant donné.	23
Figure 5.5 Distributions des KGE par bassin, au Québec, calculés sur les cinq années les plus extrêmes (chaudes, en bleu; humides, en jaune) lors que le calage et la validation sont effectuée en conditions contrastées (froides-chaudes en bleu; sèches-humides en jaune). Les boîtes à moustaches sont générées par modèle hydrologique et, pour les trois méthodes de pondération (Wsm, Wsw, Wgra). ..	24
Figure 5.6 Comparaison des résultats de l'application des méthodes de pondération des simulations climatiques CMIP5 pour un bassin mexicain.	26
Figure 5.7 Comparaison des résultats de l'application des méthodes de pondération des simulations climatiques CMIP5 pour un bassin québécois.	26
Figure 5.8 Distributions des valeurs de KGE en validation lorsque les bassins sont regroupés par processus (titres en noir) et par régions (regroupements de bassins pour les différents processus). Les valeurs entre parenthèses indiquent les nombres de bassins fournissant les valeurs à partir desquelles chacune des boîtes à moustaches a été générée. Les couleurs noire, bleue et verte représentent les	

résultats obtenus en utilisant les données de précipitation et température provenant, respectivement, de MOPEX (É.-U. seulement), ERA5 et MSWEP.	28
Figure 5.9 Distributions des valeurs de l'erreur relative sur les débits maximums annuels 3h lorsque les bassins sont regroupés par processus (titres en noir) et par régions (regroupements de bassins pour les différents processus). Les valeurs entre parenthèses indiquent les nombres de bassins fournissant les valeurs à partir desquelles chacune des boîtes à moustaches a été générée (la légende de couleur est la même que pour la Figure 5.8).....	28
Figure 5.10 Comparaison entre la modélisation aux 24 heures (notée 24) et la modélisation aux 24 heures obtenue à partir de simulations effectuées aux trois heures et ensuite moyennées sur 24 heures (notée 324). Les valeurs constituant les boîtes à moustaches sont, pour chaque bassin, la différence entre les écarts absolus 'simulé-observé 24' et 'simulé-observé 324'. Qm représente la moyenne des débits maximums annuels; 10, 25, 50 et 100 réfèrent aux débits associés à es périodes de retour.....	30
Figure 5.11 Comparaison entre l'utilisation de la modélisation aux trois heures (notée 3) et la méthode du facteur de pointe appliquée aux débits de pointe 24 heures (notée EFP-Qs24) pour la simulation des crues. Les valeurs constituant les boîtes à moustaches sont, pour chaque bassin, la différence entre les écarts absolus 'simulé-observé EFP-Qs24' et 'simulé-observé 3'. La légende, pour l'axe des abscisses, demeure la même que pour la Figure 5.10.	30
Figure 5.12 Méthodologie appliquée dans le cadre des travaux de l'objectif I.3 sur l'incertitude liée à la formulation d'évapotranspiration dans les études d'impacts des changements climatiques sur les étiages. Les numéros apparaissant dans les boîtes réfèrent aux sections de l'article de Dallaire et al. (2021) (Annexe B).	32
Figure 5.13 Résultats de l'analyse de décomposition des variances associées aux formulations d'ETP (E), aux modèles hydrologiques (H), aux simulations climatiques (C), aux méthodes de post-traitement (P) et aux RCP (R) pour l'indice d'étiage 7Q2 à l'horizon 2071-2100.....	33
Figure 5.14 : Localisation et numéros des stations hydrométriques des bassins mexicains sur lesquels la version 4 d'HYDROTEL a été mise en place par Sara Ibarra. La valeur annuelle moyenne de précipitation totale est également montrée, suivant l'échelle de couleurs de droite.....	34
Figure 5.15 Représentation du bassin versant Arcediano situé dans l'état de Jalisco au Mexique	35
Figure 5.16 Structure comparée des réseaux d'échanges d'informations (a) Québec; (b) Mexique.....	36
Figure 5.17 Structuration des informations territoriales et du processus d'identification des sensibilités d'un territoire : exemple de la municipalité de Saint-Michel, BV de la St-Régis (Qc)	39
Figure 5.18 Illustration de l'information spatialisée pour la municipalité de José Cardel (BV La Antigua, État de Veracruz) (a) des zones inondables à partir de les données disponibles pour le territoire; (b) des zones de vulnérabilité après analyse multicritère par composantes de services à la population	41
Figure 6.1 Schéma des processus spécifiques et des échanges d'informations entre les sous-systèmes « Chaîne de modélisation hydroclimatique » et « Démarche territoriale d'adaptation aux CC ».	45

1. Introduction

La genèse de ce projet découle d’initiatives qui sont distinctes mais complémentaires : d’une part, la volonté du Gouvernement du Québec de renforcer les liens scientifiques avec le Mexique et, d’autre part, le développement et l’établissement d’une collaboration scientifique entre l’École de technologie supérieure (ÉTS) de Montréal et la Universidad Veracruzana (UV) (État de Veracruz, Mexique) par les professeurs Annie Poulin, Mathias Glaus et Rabindranarth Romero López entre 2010 et 2015. Reposant initialement sur un MoU signé en 2015 à Mexico entre l’ÉTS, l’UV et le Consortium Ouranos ainsi que sur le rassemblement de partenaires québécois et mexicains dont la participation se montrait pertinente à la réalisation et au succès des activités proposées, le projet s’est déroulé entre les mois de décembre 2016 et novembre 2020. Le Tableau 1.1 identifie l’ensemble des partenaires scientifiques et financiers du projet ainsi que la nature de leurs contributions au projet.

Tableau 1.1 Identification des partenaires du projet et description de leurs contributions

Partenaire	Contribution financière	Contribution scientifique
Ministère de l’Économie et de l’innovation du Québec, via le programme PSR-SIIRI	120 000\$	Aucune
Consortium Ouranos	120 000\$ Nature	Anne Blondlot Diane Chaumont Dominique Paquin
Direction de l’expertise hydrique (DEH), Ministère de l’Environnement et de la lutte contre les changements climatiques du Québec (MELCC)	Nature	Richard Turcotte
Regroupement des organismes de bassins versants du Québec	Nature	Antoine Verville Marc-André Demers
Université de Veracruz	Nature	Professeur Rabindranarth Romero- Lopez, co-chercheur
Commission nationale de l’eau du Mexique (CONAGUA)	Nature	José Alfredo Galindo Sosa
Institut mexicain des technologies de l’eau	Nature	Sergio Armando Trelles Jasso Martín José Montero Martínez José Antonio Salinas Prieto José Avidán Bravo Jacomo Eduardo Alexis Cervantes Carretero

Cette section du rapport présente une synthèse des travaux réalisés et des résultats qui ont été obtenus dans le cadre des objectifs définis (et présentés à la section suivante). Le projet comporte deux axes, un premier qui s’est concentré plus spécifiquement sur la modélisation hydroclimatique des extrêmes hydrologiques (crues, étiages) et un second qui a abordé des questions liées aux outils et à l’information à la disposition des usagers pour la prise de décisions en matière d’adaptation aux changements climatiques. L’information est présentée en mettant l’accent sur la complémentarité et la diversité Québec-Mexique. La Figure 1.1 montre des éléments territoriaux, démographiques, de gouvernance de l’eau et hydroclimatiques qui illustrent bien, en guise de points de départ, des similitudes et différences entre les deux territoires. À ces éléments, s’ajoutent l’intérêt et la volonté partagés de développer des

méthodes et stratégies favorisant l'adaptation aux changements climatiques ainsi qu'un élément spécifique lié à l'utilisation commune du modèle HYDROTEL (IMTA, DEH). Le reste de ce rapport s'intéresse donc à exposer comment se traduisent ces similarités et distinctions en regard des travaux qui ont été réalisés dans le cadre de ce projet que l'on a pris l'habitude d'appeler « QC-MX ».

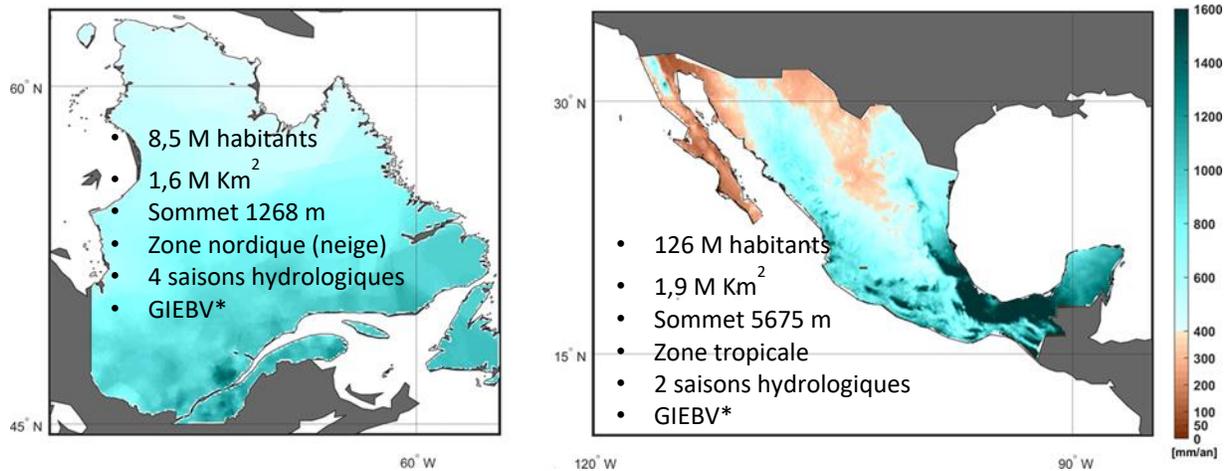


Figure 1.1 Illustration des quelques similitudes et différences qui caractérisent le Québec et le Mexique, sur fond de variabilité spatiale des précipitations totales annuelles moyennes calculées sur la période historique 1976-2005, à partir des données sur grille de Livneh et al. (2015) pour le Mexique et à partir des données sur Grille de Bergeron (2017) pour le Québec (mm éq. eau /an). * GIEBV = Gestion intégrée de l'eau par bassin versant.

2. Contexte / objectifs

La Figure 2.1 présente les Axes I et II du projet ainsi que les objectifs qui sont associés à chacun. Chaque objectif (à l'exception de I.4 et II.3) a constitué un sous-projet. Ces sous-projets sont brièvement décrits ci-après.

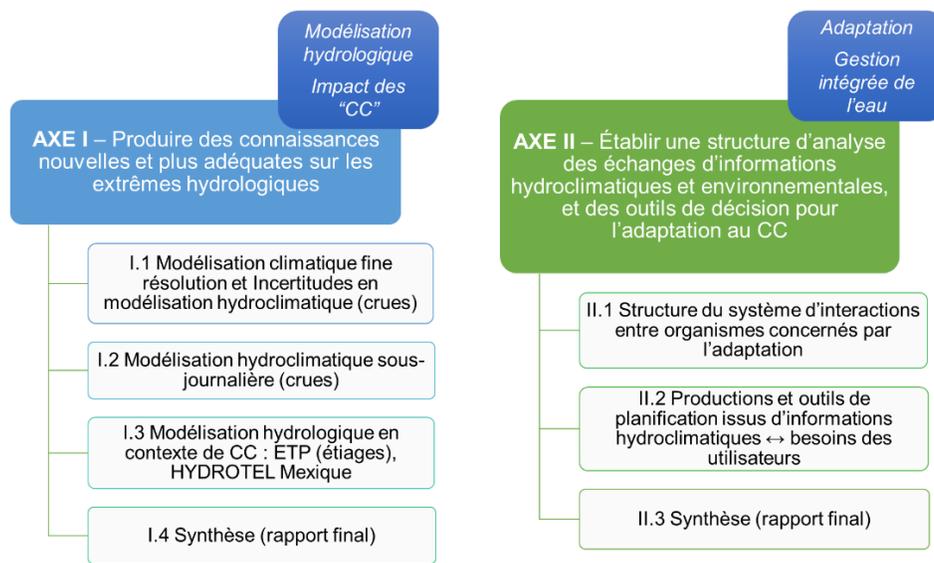


Figure 2.1 Axes du projet et objectifs associés à chacun des axes.

Objectif 1.1 Modélisation climatique fine résolution et incertitudes en modélisation hydroclimatique en périodes de crues;

Cet objectif comporte deux projets d'étudiants, soient un projet de maîtrise et un projet de doctorat, tous deux réalisés par Mariana Castañeda Gonzalez, étudiante d'origine mexicaine venue étudier au Québec (à l'ÉTS). Pour le projet de maîtrise, l'évaluation a porté sur la sensibilité des crues simulées en modélisation hydrologique à la résolution spatiale des sorties du MRCC5 piloté par la réanalyse ERA-Interim (climat historique, résolutions de 0.11°, 0.22° et 0.44°). Les résultats des travaux se trouvent dans le mémoire de Mariana (disponible au : <https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/2048/>) ainsi que dans un article publié dans *Climate Dynamics* en 2019 (Annexe A).

Dans le cadre de sa thèse de doctorat, Mariana a travaillé sur trois objectifs principaux, liés entre eux par la question de l'incertitude associée à la modélisation hydroclimatique en contexte de changement climatique. Les objectifs sont : (1) l'étude des sources d'incertitude sur les crues; et, à la lumière des résultats obtenus (2) le développement d'une approche de pondération des simulations hydrologiques; ainsi que (3) le développement d'une approche de pondération des simulations climatiques. Les crues printanières (Québec) ainsi que d'été-automne (Québec, Mexique) ont été étudiées.

Mariana bénéficie d'une bourse du CONACYT (équivalent mexicain du CRSNG) qui la supporte financièrement jusqu'à la fin de l'année 2021. Ses travaux sont bien avancés, trois articles sont en préparation. Ces derniers ainsi que la thèse de Mariana (format par articles) seront complétés d'ici la fin de 2021.

Objectif 1.2 – Modélisation hydroclimatique sous-journalière en périodes de crues

Ce sous-projet est associé aux travaux de doctorat de Virginie Destuynder. Trois objectifs associés à la modélisation hydrologique sous-journalière des crues ont été identifiés : (1) explorer et identifier des jeux de données et stratégies de calage adéquates pour la modélisation hydrologique sous-journalière; (2) étudier la valeur ajoutée de la modélisation hydrologique sous-journalière dans des bassins d'Amérique du Nord (Québec, États-Unis et Mexique); (3) analyse de l'incertitude sur le calcul de débits de crue futurs liée au choix du pas de temps de la chaîne de modélisation.

Bien que la progression du projet QC-MX en général n'ait pas été affectée par la pandémie de SARS-CoV-2, la progression des travaux de Virginie l'a été pour des raisons qui lui sont bien personnelles. Ceci dit, Virginie continue de progresser et devrait être en mesure de déposer sa thèse au cours de la prochaine année. Avec Virginie, le format de thèse traditionnelle a été choisi. Un article est par ailleurs en voie d'être finalisé et sera soumis pour publication au cours de l'année 2021.

Objectif 1.3 – Modélisation hydroclimatique en périodes d'étiages

Les travaux associés à cet objectif comportent trois sous-projets. Le premier consiste en l'étude de l'incertitude associée la formulation d'évapotranspiration potentielle pour la modélisation des étiages en contexte de changement climatique. Il s'agit des travaux de maîtrise de Gabrielle Dallaire qui sont complétés et qui ont donné lieu à la production d'un article scientifique publié dans *Hydrological Sciences Journal* (une copie du manuscrit se trouve à l'Annexe B). Le mémoire de Gabrielle est accessible au : <https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/2312/>.

Le second sous-projet a consisté en l'étude comparative des données de bacs d'évaporation disponibles au Mexique et de séries temporelles calculées à l'aide de formulations d'évapotranspiration potentielle pour la modélisation hydrologique. Ce sous-projet a été l'objet du projet de maîtrise sans mémoire de Laura Liu. Ce projet n'est pas couvert dans le présent document mais le rapport produit au terme de ces travaux est disponible sur demande.

Le dernier sous-projet a impliqué la participation de Sara Patricia Ibarra Zavaleta, stagiaire postdoctorale, et de Guillaume Lévesque, étudiant à la maîtrise. Ce sous-projet a consisté en l'augmentation du nombre de bassins versants modélisés à l'aide d'HYDROTEL au Mexique.

Objectif II.1 – Structure d'analyse des échanges d'informations entre organismes concernés par l'adaptation aux changements climatiques

Ce sous-projet a porté sur l'analyse des échanges d'informations disponibles pour les différents organismes concernés par l'adaptation au changement climatique. Une approche d'analyse de réseaux sociaux a été appliquée au Québec, dans le cadre des travaux de maîtrise de Laurence Blondeau-Bouchard.

Objectif II.2 – Outil de structuration des informations hydroclimatiques en réponse aux besoins des utilisateurs

Ce sous-projet s'est intéressé au besoin des acteurs du territoire en termes d'outils d'aide à la prise de décision en support à l'identification et à la planification d'un processus d'identification des mesures d'adaptation à privilégier (travaux de maîtrise de Laurence Blondeau-Bouchard).

En regard du contexte du projet, une attention particulière a été portée sur l'implication des acteurs des deux territoires dans le processus de déploiement des activités de recherche. Dès lors, au-delà de l'acquisition des données et des informations associées au contexte des deux territoires, cette volonté a amené à impliquer des chercheurs et des étudiants mexicains afin de déployer une partie des activités au Mexique. Ainsi, les démarches et approches associées aux objectifs II.1 et II.2 ont aussi été appliquées au Mexique par trois étudiant.e.s de maîtrise, soient Flora Angélica Solano Cerdán (II.1) ainsi que Alma Bordonave et Adair Parra Aguirre (II.2).

3. Cadre théorique / compte-rendu de la revue de la littérature

Le cadre théorique général ainsi que les références clés appuyant les travaux exposés dans ce rapport sont présentés ci-après.

3.1 Axe I Produire des connaissances nouvelles sur les extrêmes climatiques

L'approche générale des travaux de l'Axe I repose sur la chaîne classique de modélisation hydroclimatique utilisée dans le cadre des études de l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau, montrée à la Figure 3.1. Comme le montre l'information présentée à la section précédente, des éléments spécifiques à l'étude des crues et des étiages ont fait l'objet des travaux réalisés et se concentrent surtout (sans s'y limiter) sur des questions liées à l'incertitude qui s'accumule tout au long de cette chaîne, d'une étape de traitement / modélisation à l'autre.

Plusieurs études ont déjà examiné l'incertitude associée à la modélisation hydroclimatique, ce thème n'est pas nouveau mais demeure d'actualité au sein de la communauté scientifique s'intéressant à

l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau. En ce qui a trait aux crues en particulier, citons à titre d'exemples les études de Collet et al. (2017), Hailegeorgis et Alfredsen (2017), Meresa et Romanowicz (2017) et de Das et Umamahesh (2018). Toutes ces études ont fourni des informations pertinentes sur les principales sources d'incertitude dans les projections des crues à l'échelle régionale. Cependant, des différences et des limites sont observées, ce qui rend les résultats difficilement comparables. Par conséquent, une étude approfondie, réalisée à travers un cadre commun à plus large échelle, fait toujours défaut, ce à quoi s'est intéressée la première étude menée dans le cadre de l'objectif I.1 en considérant 96 bassins aux régimes hydroclimatiques contrastés (50 bassins au Québec, 46 bassins au Mexique).

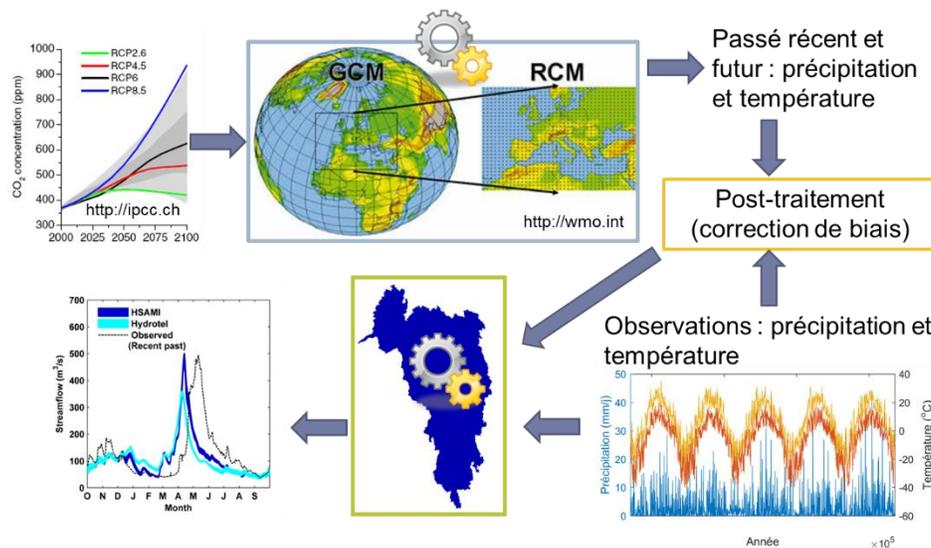


Figure 3.1: Chaîne de modélisation hydroclimatique sur laquelle s'appuient les études s'intéressant aux impacts des changements climatiques sur les ressources en eau, dans le cadre de ce projet et de manière plus générale.

Des études récentes se sont intéressées au calage des modèles hydrologiques dans le contexte des études d'impacts des changements climatiques, considérant les limites de l'hypothèse classique à l'effet que les paramètres identifiés en conditions historiques demeurent valides en conditions futures (climat modifié; Coron et al., 2012; Seiller et al., 2012; Dakhlaoui et al., 2019; Dakhlaoui et al., 2017; Motavita et al., 2019). Une directive claire sur le calage des modèles hydrologiques pour les études en changement climatique fait encore défaut et il y a certainement place à des travaux ciblant spécifiquement les crues et permettant d'explorer, à plus grande échelle, diverses stratégies de calage, soient : en conditions contrastées (froid vs. chaud; humide vs. sec), considérant des modèles hydrologiques de structures différentes (globaux vs. distribué) et dans des conditions hydroclimatiques diversifiées (Québec, Mexique). En outre, considérant la prédominance de l'incertitude associée aux modèles hydrologiques au Québec (résultats présentés à la section 5), il se montre pertinent d'explorer des stratégies de pondération des simulations hydrologiques issues de modèles différents afin d'améliorer les projections hydrologiques et d'en réduire l'incertitude (seconde partie de l'objectif I.1).

Les travaux de Wang et al. (2019) ont comparé différentes méthodes de pondération des simulations climatiques en se basant sur la performance obtenue en modélisation hydrologique, et non pas sur la capacité des simulations à représenter les variables climatiques (ici, précipitation et température,

typiquement utilisées en entrée des modèles hydrologiques). Ceci dit, il reste des éléments à explorer tels que : (1) la possibilité d'améliorer davantage la performance des méthodes de pondération en considérant les extrêmes de débits (dans le cas présent les crues); (2) sachant que la performance des méthodes repose toujours sur une évaluation en conditions historiques (en raison de la disponibilité d'observations), la comparaison des différentes méthodes, combinées ou non au post-traitement, en ce qui a trait au signal de changement, en conditions futures; et (3) la prise en compte d'un plus grand nombre de bassins, dans des territoires différents (troisième partie de l'objectif I.1).

En lien avec l'objectif I.3, Seiller et Anctil (2016) ont examiné les projections de débits générées à l'aide de 24 formulations d'ETP et d'un ensemble de 20 modèles hydrologiques sur deux bassins versants situés au Canada et en Allemagne. Pour les deux bassins versants, les formules d'ETP ont généré un large éventail de réponses reflétant leur contribution à l'incertitude le long de la chaîne de modélisation hydroclimatique. Les travaux réalisés dans le cadre du présent projet proposent d'aller plus loin en : (1) réalisant une étude à plus grande échelle, considérant une variété de bassins versants différents; (2) intégrant davantage d'éléments de la chaîne de modélisation pouvant contribuer à l'incertitude, soient une plus grande diversité de projections climatiques, les méthodes de post-traitement et les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (RCP).

Enfin, en ce qui concerne la modélisation hydrologique sous-journalière (objectif I.2), le nombre d'études dans la littérature commence à augmenter, notamment en raison de la disponibilité croissante (mais encore limitée) de données hydrométriques à l'échelle sous-journalière (Hailegeorgis et Alfredsen 2015; Bennet et al., 2016). Il reste, cependant, encore bon nombre d'éléments à étudier davantage en ce qui a trait entre autres à la structure des modèles hydrologiques et leur capacité à modéliser les processus à échelle temporelle fine (Mathevet, 2005); aux sources de données climatiques utilisées en entrée des modèles hydrologiques (Bennet et al. 2016); à la valeur ajoutée de la modélisation à échelle sous-journalière (Van Esse et al. 2013).

3.2 Axe II Établir une structure d'analyse des échanges d'informations et d'outil d'aide à la planification de mesures d'adaptation

L'approche dans le cadre de l'Axe II du projet s'inscrit dans le contexte de la structuration de l'information disponible et pertinente en regard des besoins des acteurs d'un territoire qui mettent en œuvre une démarche d'adaptation aux changements climatiques. Dans ce contexte, les éléments spécifiques en appui à la démarche et en regard des deux sous-objectifs sont associés dans un premier temps à la nature de l'information disponible, par qui elle est produite et à qui elle s'adresse. Dans un deuxième temps, les éléments retenus concernent le cadre d'application associé à une démarche d'adaptation aux changements climatiques, considérant le besoin en information structurée en appui à un processus d'identification et de planification des mesures d'adaptation réalisé par les acteurs du territoire.

Pour le premier volet associé à l'information disponible dans un contexte d'aléas hydroclimatique, le cadre normatif pour établir la structure des informations échangées vise à caractériser la nature de l'information ainsi que l'auteur et les entités/organisations auxquelles elle est destinée. À cet effet, les travaux de Bleau et al (2018a) présentent une structure de classification des ressources appropriée (Bleau et al., 2018a ; tableau de classification pp 12-15). Cette classification est, par ailleurs, spécifiquement appliquée aux informations en lien avec l'adaptation aux changements climatiques. Afin

de rendre compte de la multidimension des échanges d'informations entre acteurs concernés, une des représentations pertinentes est l'illustration sous forme de réseaux. Cette représentation s'applique dans de multiples domaines tels que l'analyse des réseaux sociaux (Mislove, 2007; ENAP, 2017). Cette approche est également appliquée dans des domaines divers tels que l'apprentissage (Saqr, 2019) ou de l'analyse bibliométrique (Huang et al., 2019).

Le deuxième volet de l'Axe II s'inscrit plus spécifiquement dans le processus d'aide à la décision en matière d'adaptation aux changements climatiques et l'information utile et utilisable dans une démarche d'identification des mesures à mettre en œuvre initiée par les acteurs du territoire. Cette démarche de proximité doit se positionner en complémentarité et en cohérence avec des initiatives entreprises à une échelle de territoire plus large tant au niveau des politiques des différents paliers gouvernementaux que de l'acquisition de nouvelles connaissances. Cette approche multi-niveaux s'inscrit dans les principes d'une adaptation efficace (GIEC, 2014 ; Bours et al., 2015).

En support à la démarche d'adaptation aux changements climatiques (ACC) ainsi qu'au suivi et évaluation (S&É), plusieurs organisations à travers le monde ont développé des cadres d'applications, des approches ou des outils. Bours et al (2013) et Climate-Eval (2015) ont recensé dans leurs études respectivement 14 et 16 cadres d'application dont dix en commun. Le Tableau 3.1 présente une synthèse des caractéristiques de ces dix cadres d'application.

Tableau 3.1 Synthèse de cadres d'application (frameworks) dédiés à l'adaptation aux changements climatiques, suivi & évaluation (ACC,S&E) [tirés de : Bours et al., 2013 et Climate Eval, 2015]

NOM	Porteur	Objectif	Approche	Contenu [2]				Territoire [1,2]	
				Liste indicateurs	Dével. Indicateurs	Étude(s) de cas	Réflexions	Échelle	région
Learning to ADAPT	IDS (UK)	développement S&É CCA	Processus d'apprentissage: "Comment", "pourquoi" plutôt que le "quoi"	x	x	-	x	int nat rég	rural
AdaptME Toolkit	UKCIP (UK)	développement S&É CCA	Ensemble de questions flexibles servant de guide	-	x	-	x	nat rég	-
Making Adaptation Count	GIZ (All.) WRI	développement S&É CCA	capacité d'adaptation, actions d'adaptation, dével. soutenu	x	x	x	x	nat	rural
Adaptation Made to Measure	GIZ, WRI	développement S&É CCA	Guide step-by-step	-	x	x (Inde)	x	nat	rural
Tracking Adaptation and Measuring Development (TAMD)	IIED	développement S&É CCA	Double piste: management (global) et adaptation (local)	x	x	x	x	int nat rég	-
UNDP CCA M&E	UNDP	programmes \$	(6) secteurs identifiés et (5) processus adaptation	(4) type	x	-	-	int nat	rural
AMAT	GEF	rapport de suivi programmes LDCF/SCCF	Mesure des livrables et objectifs	x	x	-	-	int nat	-
Technical Assistance to Non-Governmental Organisations (TANGO)	Tango	Résilience : sécurité alimentaire (FAO)	Évaluation de la résilience (théorie et mesure)	x	-	x (Afrique)	-	int nat rég	rural
Community-Based Resilience Assessment (CoBRA)	UNDP	Projets	Évaluation résilience à l'échelle locale (conceptuelle)	- (5 cat)	-	x	x	local	rural
Participatory monitoring, evaluation, reflection and learning (PMERL)	IISD	Projets	Guide pour développer des solutions d'adaptation	x	x	-	x	local	rural

Notes : [1] Climate Eval 2015 ; [2] Bours et al. 2013

Les approches en adaptation, sous-jacentes aux différents cadres, sont multiples et variées en regard des objectifs ciblés. À titre d'exemple, elles peuvent s'intéresser aux mesures d'adaptation (CCNUCC), au processus par lequel l'adaptation est atteinte (PNUD) ou encore aux résultats résultant d'un processus conduisant à une réduction du risque (UKCIP). Ceci étant, indépendamment de l'approche, une des clés adressées par Bours et al. (2013) est que l'adaptation est locale et doit refléter les conditions in situ afin de prendre en considération les différentes dimensions qui définissent la vulnérabilité : sensibilité, exposition, capacité d'adaptation (Thomas et al., 2012). Dans une approche participative (démarche de proximité), le ROBVOQ (2018) a développé un guide à l'intention des organismes de bassin versant pour établir un processus d'évaluation des vulnérabilités du territoire (https://robvq.qc.ca/wp-content/uploads/2020/11/evaluation_vulnerabilite.pdf). Structurée par matrices (une par dimension de la vulnérabilité), l'analyse est traduite par des scores attribués à des degrés définis pour des fonctions définissant chacune des dimensions traitées. La résultante de la démarche est l'obtention d'un indice de vulnérabilité traduit en quatre classes de vulnérabilité par l'entremise d'une grille d'interprétation. En regard de l'adaptation, la démarche de l'évaluation des vulnérabilités s'inscrit dans un processus d'aide à la prise de décision dans l'identification des mesures à privilégier. Dès lors, dans ce contexte, un des enjeux réside dans la capacité de considérer les liens de causalité (Climate-Eval, 2015), sachant qu'une mesure performante en regard de la vulnérabilité peut être envisagée en amont de zones ou d'actifs identifiés comme vulnérables.

4. Méthodologie / données

Les Tableau 4.1 et Tableau 4.2 présentent les approches méthodologiques et les données qui ont été utilisées pour la réalisation des objectifs associés à chacun des deux axes du projet (Figure 2.1), respectivement.

4.1 Axe I Produire des connaissances nouvelles sur les extrêmes climatiques

Tableau 4.1 Description des approches méthodologies et des données utilisées dans le cadre de l'Axe I du projet.

Activités / Objectifs	Approche méthodologique	Données (sources)
I.1 Modélisation climatique fine résolution et incertitudes en modélisation hydroclimatique (crues)	<ul style="list-style-type: none"> • Modélisation climatique : ensemble CMIP5, ensembles MRCC5-NAM, MRCC5-CAM • Post-traitement : <i>quantile mapping</i> (Thiemeßl et al., 2011), DBC (Chen et al., 2013) • Modélisation hydrologique : GR4J (Perrin et al., 2003), MOHYSE (Fortin et Turcotte, 2007), HMETs (Martel et al., 2011), HYDROTEL (Fortin et al., 2001), IHACRES (Croke et al., 2005), CEQUEAU (St-Hilaire et al., 2015) • Métrique de calage des modèles hydrologiques : KGE (Kling et al., 2012) • Analyse fréquentielle suivant les distributions Gumbel, log-normale (2 paramètres), log-normale (3 paramètres), Pearson type III, log-Pearson type III, GEV • Indices : débits de crues de périodes de retour 2, 5, 10, 20, 50 et 100 ans 	<ul style="list-style-type: none"> • Données climatiques sur grille de Livneh et al. (2015) • Données climatiques sur grille MELCC (Bergeron, 2017) • Données hydrométriques (CONAGUA, MELCC-DEH)

	<ul style="list-style-type: none"> Méthodes de pondération des modèles hydrologiques et des modèles climatiques développées dans le cadre de ce projet 	
I.2 Modélisation hydroclimatique sous-journalière (crues)	<ul style="list-style-type: none"> Modélisation hydrologique : GR4H, MOHYSEH Métrique de calage des modèles hydrologiques : KGE Analyse fréquentielle suivant la méthode USGS reposant sur la distribution Log-Pearson (England Jr et al., 2019), la méthode <i>peak over threshold</i> Méthode du facteur de pointe Indices : débits de crues de périodes de retour 10, 25, 50 et 100 ans 	<ul style="list-style-type: none"> Réanalyse du climat ERA5 (Hersbach et al., 2020) Précipitation sur grille MSWEP (Beck et al., 2017) Données sur grille de Livneh et al. (2015) Base de données MOPEX (climat et hydrométrie) Données hydrométriques (CONAGUA, MELCC-DEH)
I.3 Modélisation hydroclimatique en contexte de changement climatique : évapotranspiration (étiages), HYDROTEL Mexique	<ul style="list-style-type: none"> [Étiages] Modélisation hydrologique : GR4J, HMET5, 10 formulations d'évapotranspiration (Tableau 5.2), simulations de l'ensemble CMIP5, méthodes de post-traitement <i>daily scaling</i> et DBC (Chen et al., 2013) Indices : 7Q2, 7Q10, 30Q5 [HYDROTEL] version 4 	<ul style="list-style-type: none"> [Étiages] Données de bacs d'évaporation historiques MX [Étiages] Bases de données CANOPEX et MOPEX (Arsenault et al., 2016; Schaake et al., 2006) [Étiages et HYDROTEL] Données sur grille de Livneh et al. (2015) [Étiages et HYDROTEL] Données hydrométriques de la CONAGUA

Il est à noter que les simulations MRC5-CAM (objectif I.1) ont été réalisées par Dominique Paquin du Consortium Ouranos pour les besoins spécifiques du présent projet. Il s'agit d'un ensemble de 11 simulations à 0.22° et 0.44° de résolutions spatiales, pilotées par ERA-Interim (1979-2014) ainsi que par les modèles globaux GFDL-ESM2M, CNRM-CM5 et CanESM2 (1950-2100) considérant les RCP 4.5 et/ou 8.5.

4.2 Axe II Établir une structure d'analyse des échanges d'informations et d'outil d'aide à la planification de mesures d'adaptation

Le Tableau 4.2 présente la synthèse des deux sous-objectifs spécifiques, l'approche méthodologique et les données associées suivi des explications en lien avec les différentes démarches méthodologiques déployées.

Tableau 4.2 Description des approches méthodologies et des données utilisées dans le cadre de l'Axe II du projet.

Activités / Objectifs	Approche méthodologique	Données (sources)
II.1 Structure d'analyse des échanges d'informations entre organismes concernés par l'adaptation aux changements climatiques	<ul style="list-style-type: none"> Analyse de réseaux sociologiques adaptée aux échanges d'informations (littérature) pour les territoires du Québec et du Mexique à l'aide du logiciel libre Gephi (https://gephi.org/) Recensement de la littérature (rapports, guides, atlas, plans d'actions, articles, ...) 	<p>Pour le Québec :</p> <ul style="list-style-type: none"> Base de données (Bleau et al., 2018b) Documents du ROBVQ sur la vulnérabilité des territoires <p>Pour le Mexique :</p>

	associée à la vulnérabilité des territoires (littérature accessible en ligne) <ul style="list-style-type: none"> • Adaptation de la démarche au Mexique 	<ul style="list-style-type: none"> • Littérature sur la vulnérabilité des territoires disponible en ligne
II.2 Outil de structuration des informations hydroclimatiques en réponse aux besoins des utilisateurs	<ul style="list-style-type: none"> • Étude de cas du BV de la St-Régis • Formalisation des besoins des utilisateurs sur la base des échanges lors des rencontres en comité Rés-Alliance des acteurs du territoire • Structuration du processus d'identification des sensibilités par une approche matriciel de type analyse d'impacts • Qc : Application au territoire du cas d'étude • Mx : Adaptation de la démarche au contexte mexicain 	<ul style="list-style-type: none"> • Suivi Rés-Alliance (BV-St-Régis) • OBV Scabric • Qc : Informations disponibles pour le BV St-Régis • Mx : Informations littérature

En ce qui concerne l'objectif II.1, la représentation des échanges d'information basée sur une approche inspirée de l'analyse des réseaux sociaux, la structure des tables de données (nœuds et liens) du logiciel Gephi est inspirée de l'étude de Bleau et al. (2018b). Ainsi, les nœuds sont caractérisés par leur acronyme et leur nom ainsi que la catégorie à laquelle ils appartiennent selon qu'ils sont :

- générateur de l'étude : OSBL; Université; Privé; Ordre professionnel; Municipal; Gouvernement; Organisme international;
- public ciblé par l'étude : Bâtiments/Lots; Quartiers; Municipalité; Province (État pour le Mexique); Bassin versant; MRC (Région pour le Mexique); Canada (ou Mexique).

Les liens qui relient les acteurs impliqués dans les échanges d'informations (nœuds) correspondent aux caractéristiques des ressources recensées et la table des liens est structurée selon les caractéristiques des ouvrages :

- nature de la ressource : rapport; guide, plan d'actions; outil; document informatif; communication/fiche; base de données; atlas;
- format : rapport; article; fiche; page web;
- année de publication
- enjeux : hydrique; verdissement; chaleur; général (comprend la littérature qui aborde les changements climatiques)
- public cible : décideurs/professionnels; citoyens; général
- territoire : Québec/Veracruz (État); Canada/Mexique; International

L'inventaire des ressources issues de la littérature disponible au public (sans accès payant tel que certaines bases de données scientifiques) est dressée pour le territoire du Québec en s'appuyant initialement sur la base de données de Bleau et al. (2018b). Pour minimiser le biais potentiel associé à la spécificité des villes qui était l'objet des travaux de Bleau et al., la démarche d'inventaire a été complétée avec les ressources disponibles pour les OBV via le ROBVO. À noter que l'inventaire ne considère pas la documentation qui est pourrait être échangée de façon informelle lors des rencontres ad hoc (ateliers, comités de travail, etc.) dans le cadre d'activités associées à la gestion de l'eau réalisées par les OBV. Du côté mexicain, il n'existe pas de démarche similaire à celle réalisée par Bleau et al. (2018a; 2018b). Le recensement a été réalisé par une recherche sur la littérature disponible en ligne en

regard de l'adaptation aux changements climatiques à l'échelle du Mexique en identifiant un lien « territoire » spécifique pour l'état de Veracruz afin d'obtenir une structure d'échelle de territoire similaire entre le Québec et le Mexique.

En ce qui concerne l'objectif II.2, le développement de la structure de l'outil s'est appuyé sur les échanges avec le ROBVQ et Ouranos à propos des outils disponibles et/ou à développer. Sur ce dernier point, l'intérêt des discussions reposait d'une part sur l'évaluation du potentiel d'utilisation des outils Impact'Climat et Objectif'Climat développés par l'ADEME (Agence de la transition écologique, France) et pour lesquels Ouranos a entamé une réflexion en 2018. Cependant, le déploiement de ces deux outils de l'ADEME à l'échelle d'un petit bassin versant comme celui de la St-Régis n'apparaissait pas réaliste en regard du niveau d'information et de mobilisation des compétences nécessaires pour le mettre rapidement en opération.

L'approche adoptée pour développer l'outil repose sur une structure matricielle s'appuyant sur une démarche similaire aux études d'impacts permettant de caractériser l'interaction entre un événement causal et une composante du territoire. Il vise ainsi à décrire chaque interaction entre les différentes causes (événements hydroclimatiques) et les ouvrages urbains ainsi que les services urbains et les services économiques. Le découpage en services urbains et économiques permet de respectivement rattacher la sensibilité des services avec des indicateurs sociaux et économiques (Figure 4.1).

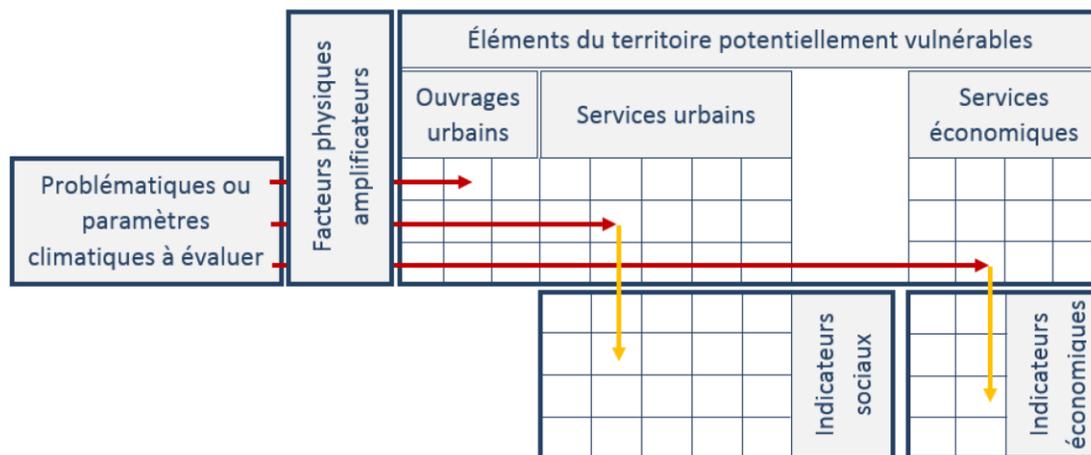


Figure 4.1 Structure schématique de l'outil matriciel développé.

La description de chaque interaction (cellules de la matrice) est déterminée selon deux dimensions qui sont d'une part, l'évaluation du degré de sensibilité de la composante du territoire selon un code de couleur et, d'autre part, la nature de la source de l'information établie sur une échelle de 1 à 4. En ce qui concerne le code de couleur à 4 niveaux, il s'inspire des niveaux développés dans les outils d'analyse de l'ADEME (2015) et du ROBVQ (2018). Il vise à caractériser la probabilité d'occurrence de l'événement :

- Gris : Lorsqu'il ne semble pas probable qu'un événement hydroclimatique induise un aléa sur un ouvrage urbain, service urbain ou service économique, la case située au croisement entre l'événement hydroclimatique et l'élément étudié est grise.

- Jaune : La probabilité qu'un événement hydroclimatique induise un aléa sur un ouvrage urbain, service urbain ou service économique est faible, la case située au croisement entre l'événement hydroclimatique et l'élément étudié est jaune.
- Orange : La probabilité qu'un événement hydroclimatique induise un aléa sur un ouvrage urbain, service urbain ou service économique est moyenne, la case située au croisement entre l'événement hydroclimatique et l'élément étudié est orange.
- Rouge : La probabilité qu'un événement hydroclimatique induise un aléa sur un ouvrage urbain, service urbain ou service économique est élevée, la case située au croisement entre l'événement hydroclimatique et l'élément étudié est rouge.

En ce qui concerne la source de l'information associée à la connaissance du territoire ou de la composante du territoire, elle est classée sur une échelle de 1 à 4 :

1. La probabilité d'occurrences est déterminée à partir de connaissances générales, sans connaître l'emplacement spécifique de l'élément ou l'état de l'ensemble du territoire;
2. La probabilité d'occurrences est déterminée à partir de connaissances générales, mais aussi d'analyses du site à l'étude à l'aide de logiciels de cartographies (Google Map, Google Earth, Street View, etc.) et/ou de photographies;
3. La probabilité d'occurrences est déterminée à partir d'une visite physique du site;
4. La probabilité d'occurrences est déterminée à partir d'information provenant directement d'un propriétaire ou d'un occupant du site à l'étude ou de la consultation d'une étude ou d'un rapport technique sur le terrain en question.

L'analyse de la sensibilité d'une composante en regard de chacune des causes potentielles associées à un aléa hydroclimatique est basée sur l'analyse de l'information disponible, en considérant les sources de connaissances suivantes :

- personnel des hôtels de ville des municipalités;
- observations à partir des logiciels Google Map et Google Earth;
- sites Web des services municipaux du territoire à l'étude;
- rapports d'études (gouvernements, agences, municipalités, organismes, universités, etc.);
- professionnels agissants à titre de représentants pour différentes entités (associations d'agriculteurs, comités citoyens, ministères, municipalités, etc.)
- observations sur la base de visites de terrain ou de plans fournis par le service d'urbanisme des municipalités.

En ce qui concerne les indicateurs sociaux et économiques qui visent à identifier les systèmes ou les groupes de populations les plus exposés aux conséquences d'événements hydroclimatiques. Cette démarche vise à identifier les populations qui sont sensibles advenant la défaillance ou la perte de fonctionnalité d'un service urbain ou d'un service économique. Dans le cadre de l'analyse de sensibilité du bassin versant de la Saint-Régis, les catégories retenues s'appuient sur les données de Statistiques Canada (2017) :

- personnes âgées de plus de 65 ans;
- personnes âgées de plus de 85 ans;
- enfants de moins de 14 ans;
- personnes vivant seules;
- ménages nombreux (plus de 5 personnes);

- familles monoparentales;
- bâtiments construits avant 1960;
- réparations majeures requises sur les bâtiments;
- populations ne parlant pas français;
- secteurs d'emplois.

La sensibilité de chacune des catégories d'indicateurs sociaux et économiques est établie sur la base de leur lien privilégié avec chacun des services urbains ou économique. La sensibilité (code de couleur) la plus élevée sur l'ensemble des services qui relie chaque catégorie d'indicateur lui est attribuée.

Le processus de développement de l'outil s'est appuyé sur le suivi des échanges dans le contexte de la communauté de la Rés-Alliance¹ du bassin versant de la St-Régis en vue d'élaborer un plan d'adaptation aux changements climatiques.

5. Résultats

Il est proposé, dans cette section, de présenter des éléments de synthèse qui permettent spécifiquement d'appréhender la complémentarité et la diversité entre le Québec et le Mexique. Les sections 5.1 et 5.2 présentent les résultats pour les Axes I et II, respectivement.

5.1 Axe 1 Produire des connaissances nouvelles sur les extrêmes climatiques

5.1.1 Territoires à l'étude

Dans le cadre du projet, l'accent a été mis sur les territoires québécois et mexicain bien que des études à plus grande échelle aient aussi été réalisées, impliquant des bassins versants des États-Unis et du Canada, de manière à permettre de tirer profit de plus grandes bases de données dans certains cas. Tel qu'énoncé ci-haut, dans ce rapport, la méthodologie et les résultats se concentrent sur les résultats obtenus au Québec et au Mexique.

Les territoires étudiés varient d'un objectif à l'autre de l'Axe I. Afin d'éviter d'alourdir le rapport en présentant de multiples cartes différentes pour l'ensemble des sous-projets, ces dernières se trouvent à l'Annexe C.

5.1.2 Objectif I.1 Modélisation climatique fine résolution et incertitudes en modélisation hydroclimatique en périodes de crues

Modélisation climatique fine résolution

Dans le cadre de ce projet, le territoire du Québec a été étudié et ce sont des simulations MRCC5-NAM qui ont été utilisées. Il s'agit des simulations ERA-Interim-MRCC5-0.11, ERA-Interim-MRCC5-0.22 et ERA-Interim-MRCC5-0.44 réalisées par Ouranos sur le domaine spatial de l'Amérique du Nord (NAM, selon CORDEX; https://cordex.org/wp-content/uploads/2012/11/CORDEX-domain-description_231015.pdf). L'évaluation a reposé sur la modélisation hydrologique à l'aide du modèle global MOHYSE. Estimées à

¹ La Rés-Alliance est une communauté de pratique en adaptation aux changements climatiques coordonnée par le Regroupement des organismes de bassins versants du Québec (ROBVQ).

l'aide de la distribution de Gumbel, les crues d'été-automne de temps de retour 2, 5, 10 et 20 ans ont été étudiées. Les débits de crue pour chacun de ces indicateurs ont été obtenus à partir de séries de débits journaliers modélisés sur 30 ans à l'aide de MOHYSE (préalablement calibré et validé sur observations – MELCC-DEH) lorsqu'alimenté alternativement par les températures moyennes et précipitations journalières provenant des trois simulations MRCC5. Une comparaison a été réalisée, considérant des intrants climatiques de résolutions spatiales différentes (Annexe A).

Incertitude en modélisation hydroclimatique

La méthodologie associée au premier objectif de la thèse de Mariana Castañeda Gonzalez est présentée à la Figure 5.1. Celle-ci a été extraite de l'article (entièrement rédigé) qui sera soumis pour publication sous peu (à *Climatic Change* ou *Hydrology and Earth System Sciences*). Ce premier objectif porte sur l'évaluation des sources d'incertitudes associées à la modélisation des crues dans des bassins versants du Québec (50) et du Mexique (46). Suite à la génération de l'ensemble des données (à la sortie de la dernière étape de la Figure 5.1), une analyse de décomposition de la variance (Dequé et al., 2007) a été appliquée afin d'étudier la contribution des différentes sources d'incertitudes (simulations climatiques, méthodes de post-traitement, modèles hydrologiques, distributions statistiques pour l'analyse fréquentielle) à l'incertitude sur les débits de crue simulés (périodes de retour 2 – 100 ans; Figure 5.1). Il est à noter que toutes les simulations climatiques utilisées reposent sur le scénario RCP 8.5.

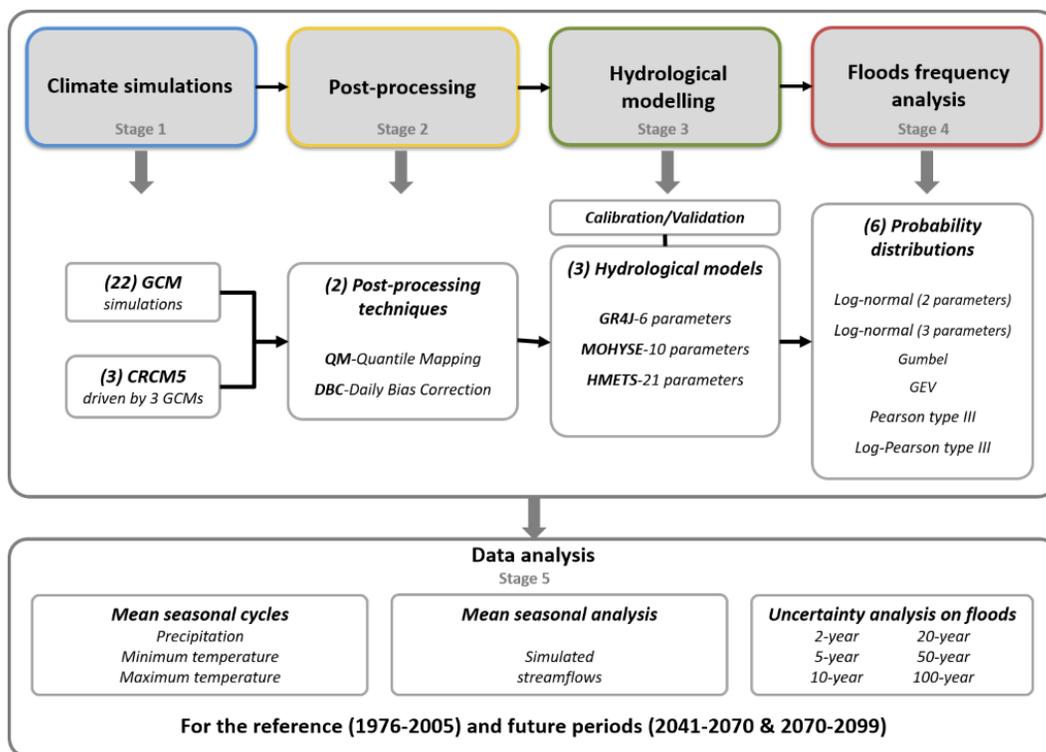


Figure 5.1 Méthodologie associée au premier objectif de la thèse de Mariana Castañeda Gonzalez.

La Figure 5.2 montre des hydrogrammes annuels moyens pour des bassins versants représentant les conditions types au Québec (panneau a; bassin dominé par la neige), au Mexique dans un bassin en zone aride (panneau b; bassin dominé par la pluie) et au Mexique en zone humide (panneau c; bassin

dominé par la pluie). Les hydrogrammes sont montrés pour la période de référence (1976-2005) ainsi que pour le futur proche (2041-2070) et le futur lointain (2071-2100). Les panneaux b) et c) montrent bien les deux principales saisons hydrologiques qui caractérisent les bassins mexicains, soit la saison sèche (décembre-janvier à mai) et la saison humide (juin à octobre-novembre). Il est à noter que le bassin du panneau b) est de plus petite superficie que celui du panneau c), ce qui explique sa plus grande réactivité aux événements pluvieux qui peuvent survenir en saison sèche.

Les enveloppes d'incertitude provenant des scénarios climatiques utilisés dans l'étude sont montrées, soit en bleu l'incertitude provenant de toutes les combinaisons de simulations MRCC5 et méthodes de post-traitement pour le modèle hydrologique GR4J, et en gris les mêmes résultats mais en considérant cette fois les simulations climatiques provenant de l'ensemble CMIP5. Ces figures, qui sont représentatives des résultats obtenus sur l'ensemble des bassins étudiés, suggèrent que l'incertitude associée à la modélisation climatique est plus importante pour les bassins mexicains que pour les bassins québécois, tant en climat historique qu'en climat futur. Des figures très similaires sont obtenues lorsque les modèles hydrologiques HMETS ou MOHYSE sont utilisés.

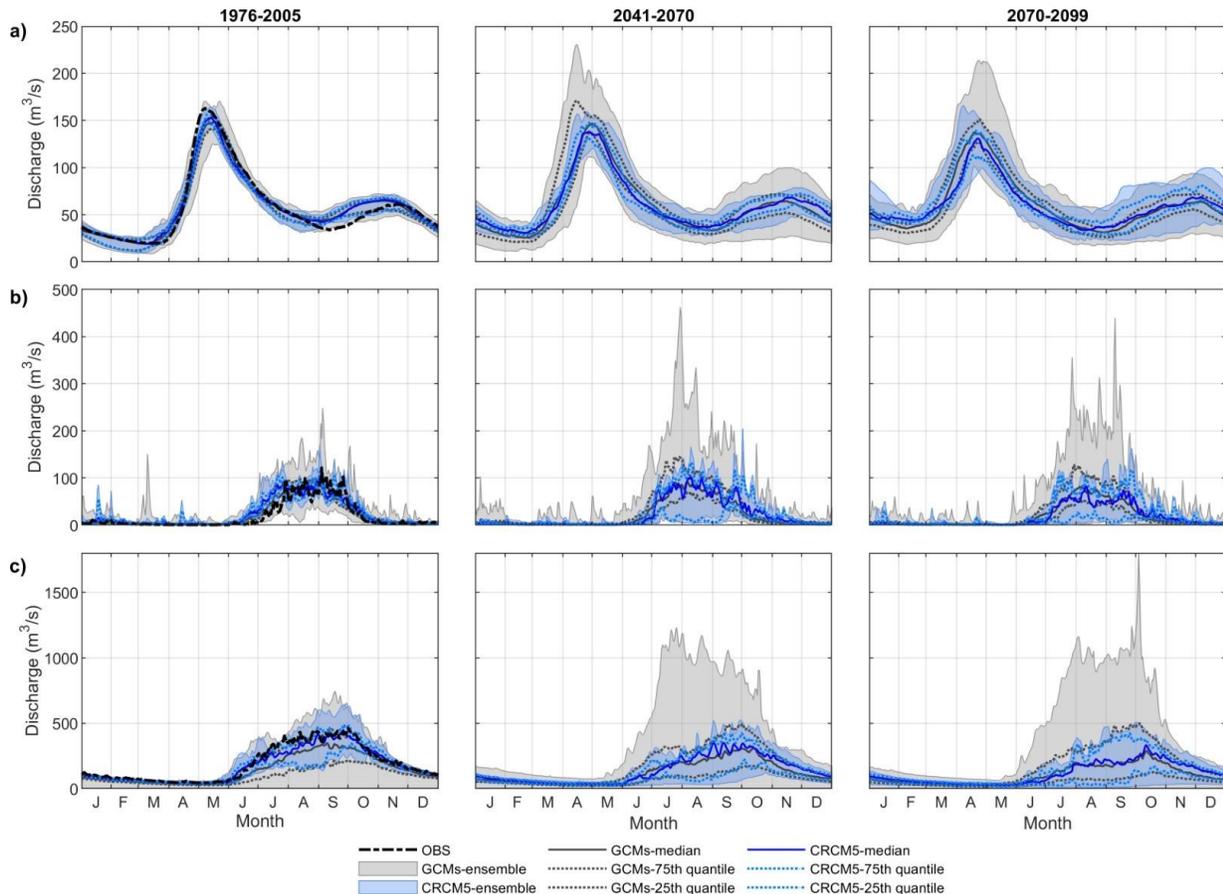


Figure 5.2 Enveloppes d'incertitude sur le débit annuel moyen, issues de la modélisation climatique, du post-traitement et de la modélisation hydrologique dans des bassins a) du Québec, b) du Mexique (zone aride), c) du Mexique (zone humide). L'amplitude complète de l'incertitude est montrée (enveloppes grise et bleue), de même que les 25^e et 75^e quantiles (traits pointillés noirs et bleus) et les médianes (traits pleins noirs et bleus).

De manière cohérente, la Figure 5.3 montre les résultats de l'analyse de décomposition de la variance pour les bassins québécois et mexicains. La légende de droite montre les couleurs associées à chacune des sources d'incertitude considérées, soient les simulations climatiques (R, en bleu); les méthodes de post-traitement (P, en jaune), les modèles hydrologiques (H; en vert) et les différentes lois statistiques utilisées pour l'établissement des débits de crue (D, en rouge). Les résultats sont montrés pour les crues de périodes de retour, 2, 5, 10, 20, 50 et 100 ans, et considérant les simulations climatiques MRCC5. On y voit clairement que la source d'incertitude dominante au Québec est la modélisation hydrologique alors que la modélisation climatique domine au Mexique. Lorsque l'ensemble de simulations CMIP5 est considéré, au lieu des simulations MRCC5, des résultats similaires sont obtenus. La Figure 5.3 montre également que l'incertitude associée au choix du modèle statistique (en rouge) tend à augmenter avec la période de retour, ce qui est attendu étant donné le nombre d'années de disponibles pour l'analyse fréquentielle (30 ans) qui diminue par rapport à la période de retour qui augmente.

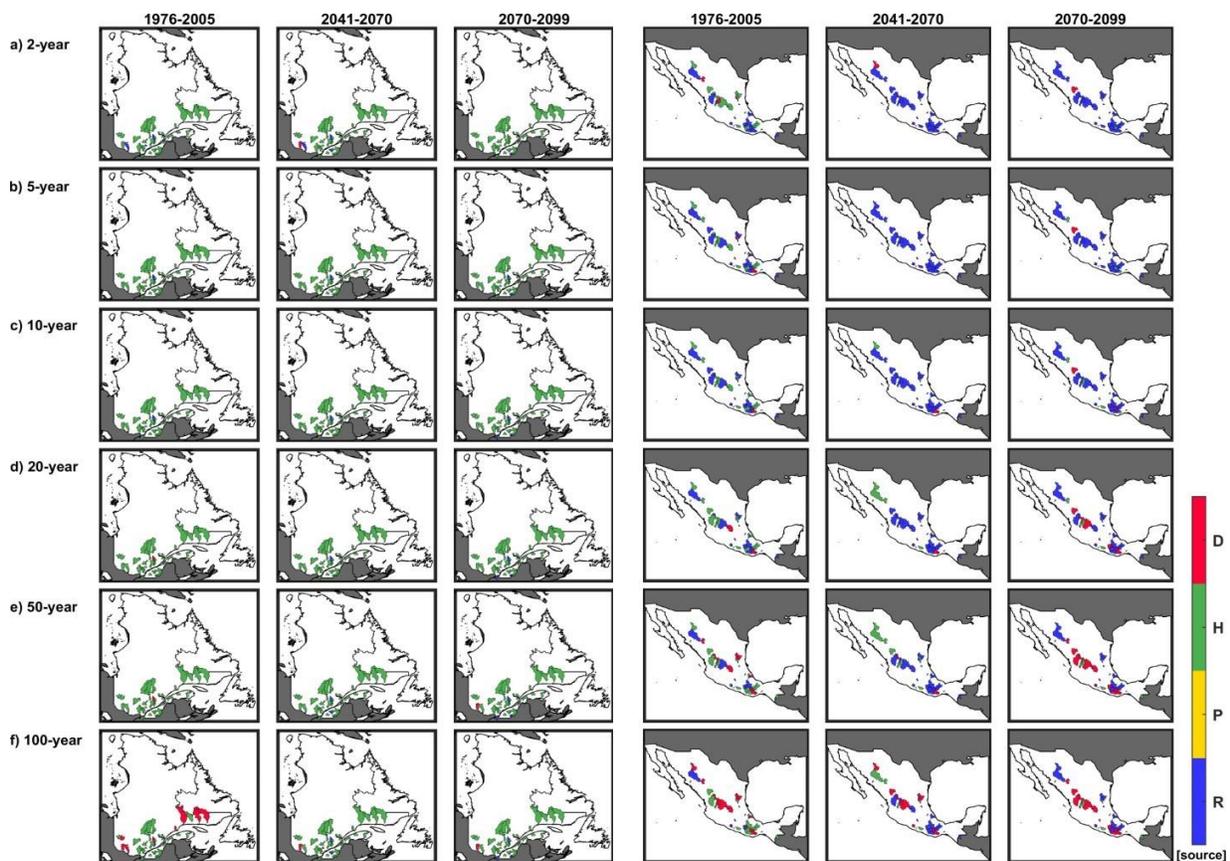


Figure 5.3 Résultats de l'analyse de décomposition de la variance appliquée à l'étude de la contribution des diverses sources d'incertitude sur les crues de périodes de retour 2, 5, 10, 20, 50 et 100 ans, en climats historique et futur, dans des bassins versants du Québec et du Mexique. Les sources d'incertitude considérées sont : les simulations du MRCC5 réalisées à l'aide de pilotes différents (bleu), les modèles hydrologiques (vert), les méthodes de post-traitement (jaune) et les lois statistiques utilisées pour l'analyse fréquentielle (rouge).

Développement de méthodes de pondération des simulations hydrologiques et climatiques

À la lumière des résultats présentés aux paragraphes précédents, il est apparu pertinent de se pencher sur le développement de méthodes de pondération visant à améliorer le degré de confiance dans la projection des crues (en tirant le maximum d'information de la combinaison des simulations), dans le cadre des objectifs 2 et 3 de la thèse de Mariana. Ainsi, des méthodes de pondération des simulations hydrologiques et des simulations climatiques, respectivement, sont en cours de développement / ont été développées. Les résultats obtenus à ce jour sont présentés ci-après (rappel : la formation au doctorat de Mariana se terminera à la fin de l'année 2021).

La méthodologie associée au développement d'une méthode de pondération de simulations hydrologiques implique deux principales étapes, soit (1) l'exploration de stratégies de calage-validation des modèles hydrologiques en considérant des conditions climatiques de calage et validation qui sont contrastées; et (2) l'attribution de poids aux simulation issues de ces modèles suivant leur performance en validation (conditions contrastées). Trois types de tests ont été effectués suivant les possibles directions de changement en climat futur pour le Québec et le Mexique (Tableau 5.1). La prise en compte des deux territoires permet de comparer l'impact des pondérations utilisées sur les résultats obtenus entre des secteurs où les niveaux d'incertitude associée à la modélisation hydrologique se sont montrés différents *a priori*.

Tableau 5.1 Stratégies de calage-validation testées au Québec et au Mexique en conditions climatiques contrastées

Conditions calage	Conditions validation	Territoire(s) visé(s)
Années les plus froides	Années les plus chaudes	Québec Mexique
Années les plus humides	Années les plus sèches	Certains bassins du Mexique
Années les plus sèches	Années les plus humides	Québec Certains bassins du Mexique

La Figure 5.4 illustre le principe des stratégies de calage-validation en conditions contrastées. L'ensemble des stratégies du Tableau 5.1 a été testé en considérant des périodes de calage et de validation de 2, 4, 6 et 8 ans, suivant les résultats de Motavita et al. (2019). Les cinq années les plus chaudes de tout l'historique disponible pour un bassin versant sont d'abord extraites (années en orange à la Figure 5.4). La figure illustre le cas du calage sur les 4 années les plus froides (en bleu plus foncé) parmi les années restantes et la validation sur les quatre années les plus chaudes (en rouge), toujours parmi les années restantes. Il faut comprendre que plus le nombre d'années considéré en calage et en validation est grand, plus le contraste entre les deux périodes diminue. En contrepartie, des périodes de durée trop courte peuvent ne pas contenir suffisamment d'information pour l'identification des paramètres des modèles hydrologiques. Le principe de la Figure 5.4 s'applique également lorsque les années sèches et humides sont considérées (les cinq années les plus sèches/humides de l'historique sont d'abord extraites). Les températures annuelles moyennes, ou encore le cumul annuel des précipitations, sont utilisés afin d'identifier les années à prendre en compte, dans chaque bassin.

Pour la réalisation de ce second objectif, les modèles hydrologiques suivants ont été utilisés : CEQUEAU, GR4J, MOHYSE, HMETS, HYDROTEL et IHACRES. La performance obtenue (KGE) en validation a servi au calcul des poids à attribuer aux simulations suivant diverses méthodes (somme pondérée suivant les KGE; méthode GRA, Arsenault et al., 2015). Les poids obtenus sont par la suite appliqués aux simulations sur les 5 années les plus chaudes/humides/sèches.

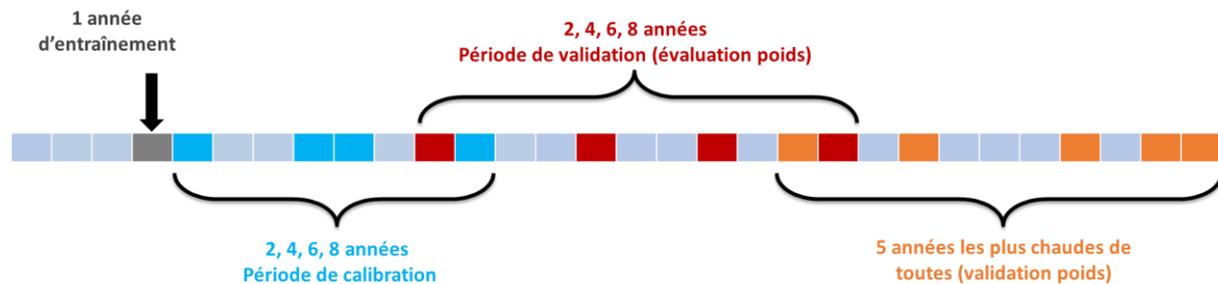


Figure 5.4 Illustration de la stratégie de calage-validation en conditions contrastées de température (années froides-années chaudes). Chacune des cases correspond à une année de l'historique disponible, pour un bassin versant donné.

Au moment de rédiger le présent rapport, (1) les résultats d'HYDROTEL pour les bassins du Mexique sont en cours de production, et (2) il reste des analyses à réaliser en ce qui a trait à l'exploitation des résultats. À titre d'exemple, la Figure 5.5 montre les distributions des KGE sur les cinq années les plus extrêmes (ici chaudes ou humides) pour les bassins québécois lorsque : (en bleu) le calage est effectué sur les six années les plus froides de l'historique et la validation est effectuée sur six années chaudes; (en jaune) le calage est effectué sur les six années les plus sèches de l'historique et la validation est effectuée sur six années humides (Figure 5.4). Dans chaque cas, les six premières boîtes à moustaches montrent les résultats par modèle hydrologique. Les modèles affichent des degrés de performance, en conditions contrastées, qui varient. La variabilité inter-modèle est plus grande lorsque la combinaison de conditions sèches-humides est considérée (en jaune). Les trois boîtes à moustaches de droite, dans chaque cas, comparent les résultats de trois méthodes de pondération, soient la moyenne arithmétique (cas de base; W_{sm}), la somme pondérée suivant les KGE en validation (W_{sw}) et la méthode GRA (W_{gra}), plus sophistiquée qui permet notamment l'attribution de poids négatifs. La méthode GRA surpasse les deux autres dans le cas des conditions sèches-humides. Ceci dit, l'application de pondérations permet, dans tous les cas, d'améliorer la performance de la modélisation hydrologique en conditions contrastées (médiane et/ou dispersion).

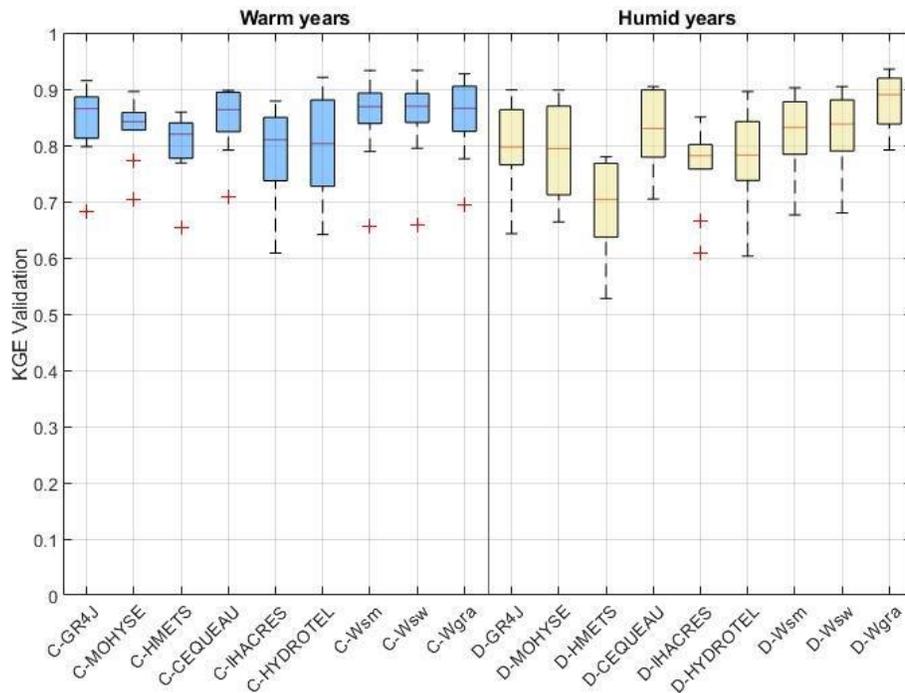


Figure 5.5 Distributions des KGE par bassin, au Québec, calculés sur les cinq années les plus extrêmes (chaudes, en bleu; humides, en jaune) lors que le calage et la validation sont effectuée en conditions contrastées (froides-chaudes en bleu; sèches-humides en jaune). Les boîtes à moustaches sont générées par modèle hydrologique et, pour les trois méthodes de pondération (Wsm, Wsw, Wgra).

Dans le cadre de l'objectif 3 de la thèse de Mariana, différentes méthodes de pondération ont été testées, reposant toutes sur la méthode REA (*reliability ensemble averaging*) de Giorgi et Mearns (2002), utilisant comme point de départ l'étude de Wang et al. (2019) (section 3). Les versions testées (et comparées) sont les suivantes :

- Méthode REA-p utilisant la précipitation comme variable climatique à la base de la détermination des poids; cette méthode repose sur deux principaux critères, à savoir le biais, pour la variable considérée, entre la valeur issue d'une simulation et les observations, et la convergence soit la similitude, en conditions futures, entre la valeur issue d'une simulation et celles issues des autres simulations;
- Méthode REA-q, telle que modifiée par Wang et al. (2019), utilisant le débit annuel moyen simulé comme variable à la base de la détermination des poids;
- Méthode UREA-q telle que proposée par Wang et al. (2019), qui repose sur la méthode UREA (*updated* REA) de Xu et al. (2010) laquelle tient compte des biais issus de la moyenne climatologique et de la variance interannuelle, encore une fois en utilisant le débit annuel moyen simulé comme variable à la base de la détermination des poids; la méthode UREA, par rapport à REA, permet par ailleurs de combiner plusieurs variables à la fois dans la détermination des poids ce qui permet, notamment, d'éviter d'obtenir des pondérations différentes lorsque la température et la précipitation sont considérées, par exemple;

- Méthode UREA-mod-q, nouvelle version introduite dans le cadre des présents travaux, qui combine plusieurs indices de débits calculés sur une base saisonnière, soit les débits saisonniers moyens (Dec-Jan-Fev, Mar-Avr-Mai, Juin-Juil-Août, Sept-Oct-Nov).

Des résultats types sont montrés aux Figure 5.6 et Figure 5.7 pour un bassin mexicain et un bassin québécois, respectivement, en climats historique (période de référence 1976-2005) et futur (horizons proche 2041-2070 et lointain 2071-2100). Les figures montrent des hydrogrammes annuels moyens. Les résultats ont été générés en utilisant en entrée les précipitations et températures provenant des simulations CMIP5 (Figure 5.1). L'enveloppe d'incertitude y est également montrée en gris de même que la médiane d'ensemble (trait noir) et les 25^e et 75^e percentiles (traits pointillés fins en noir). Tant pour le bassin du Québec que pour celui du Mexique, la méthode UREA-mod-q (en mauve) est celle qui performe le mieux en conditions historiques si l'on compare les débits simulés aux observations (trait point-ligne noir) et l'amélioration par rapport aux autres méthodes pour le bassin mexicain est particulièrement frappante (beaucoup moins pour le bassin québécois). En conditions futures, la distinction entre la méthode UREA-q mod et les autres méthodes demeure moins marquée pour le bassin québécois mais persiste pour le bassin mexicain. Il est donc raisonnable de croire que, si le critère d'identification d'une méthode repose sur sa performance en conditions historiques, la nouvelle méthode UREA-mod-q devrait être privilégiée. **Ce résultat se montre cohérent avec celui de l'incertitude prépondérante provenant des simulations de climat pour les bassins du Mexique, obtenu au terme de l'objectif 1 de la thèse de Mariana.** Ceci dit, il demeure impossible de valider toute méthode en conditions futures. Un très large éventail de « futurs » est possible et une diversité doit être conservée dans les réponses hydrologiques qui sont générées. Des analyses et discussions supplémentaires sont requises et seront ajoutées à ces travaux en ce qui concerne notamment la question de la démocratie des modèles climatiques (poids égaux) versus l'application de méthodes de pondération. Un angle d'analyse supplémentaire, gardé en réserve pour le moment, concerne la correction de biais des sorties de modèles de climat versus l'application de méthodes de pondération. Bien que les deux approches soient différentes, elles partagent au moins une finalité, à savoir : augmenter le niveau de confiance dans les simulations de climat en conditions historiques (en supposant que ce niveau demeure le même en conditions futures).

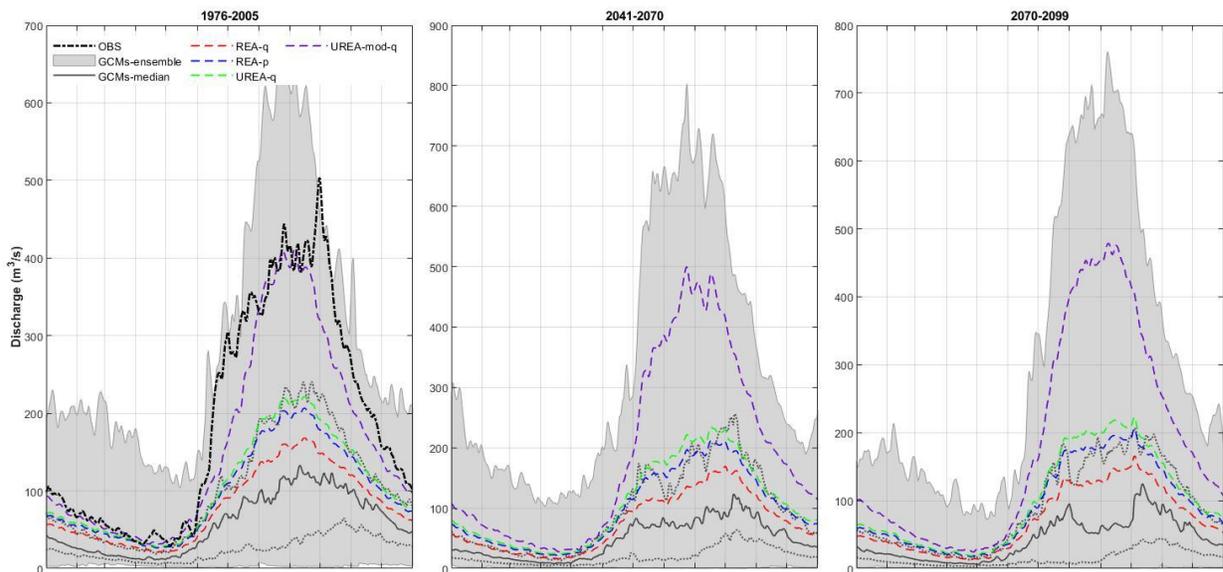


Figure 5.6 Comparaison des résultats de l'application des méthodes de pondération des simulations climatiques CMIP5 pour un bassin mexicain.

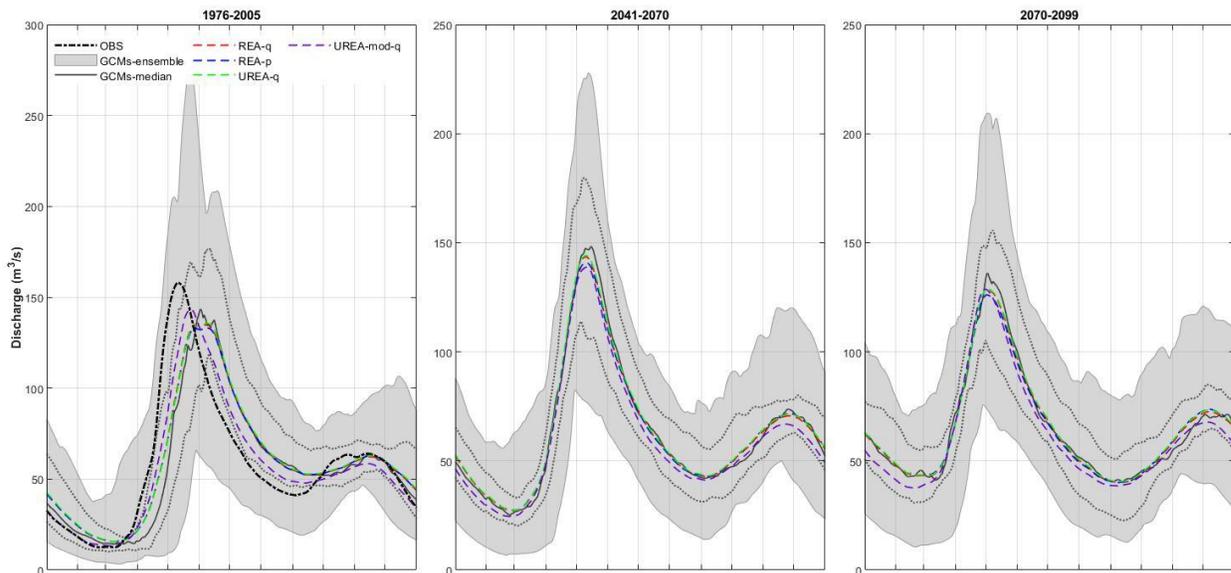


Figure 5.7 Comparaison des résultats de l'application des méthodes de pondération des simulations climatiques CMIP5 pour un bassin québécois.

5.1.3 Objectif I.2 Modélisation hydroclimatique sous-journalière en période de crues

Modélisation hydrologique sous-journalière

Une part importante de la thèse de Virginie Destuynder a impliqué l'exploration de méthodes / sources de données associées à la modélisation hydrologique sous-journalière, étant donné la quantité comparativement beaucoup plus faible de travaux publiés sur la modélisation hydrologique sous-

journalière par rapport à la modélisation hydrologique journalière. Un défi supplémentaire a consisté en l'obtention des données hydrométriques fiables et couvrant des périodes suffisamment longues dans les principaux territoires d'étude, soient le sud du Québec (moins problématique) et le Mexique (plus problématique). Plusieurs tests ont été effectués en ce qui a trait : au jeu de données climatiques utilisé pour le calage et la validation des modèles hydrologiques; au modèle hydrologique; à la métrique de calage; à la durée de la période de calage. Cette section montre les principaux résultats qui ont été obtenus, en mettant l'accent sur la comparaison entre les territoires québécois et mexicain. Les résultats détaillés seront disponibles dans la thèse de Virginie ainsi que dans un article en préparation qui sera soumis au cours de la prochaine année au *Journal of Hydrology* ou à *Hydrological Sciences Journal*. Le pas de temps sous-journalier considéré, dans le cadre de ces travaux, est de 3h, soit la résolution temporelle la plus grossière parmi les jeux de données utilisés.

La Figure 5.8 montre les performances obtenues (KGE) par bassin lorsque les deux jeux de données de précipitations MSWEP (combinaison de données aux stations, réanalyses et données satellitaires) et ERA5 (réanalyse) sont utilisés pour le calage des modèles hydrologiques GR4H et MOHYSEH (combinés sur la figure) au pas de temps de trois heures (les températures utilisées proviennent d'ERA5). Il importe de préciser, ici, que puisque l'étude dans son ensemble couvre des bassins versants situés au Québec, aux États-Unis et au Mexique, les bassins ont été regroupés suivant les processus hydroclimatiques dominants impliqués dans la genèse des crues. Un même bassin peut présenter plus d'une saison de crue (générées par des processus différents), de même que les mêmes processus peuvent être associés à plusieurs secteurs du domaine à l'étude. Ainsi, les résultats de la figure sont d'abord regroupés par processus (titres en noir au-dessus de chacune des séries de boîtes à moustaches) et ensuite par région (sous-groupes pour chacun des processus). La dernière ligne de la figure montre les résultats par région, tous processus confondus. Les processus considérés sont : (1) la fonte de la neige; (2) les tempêtes de pluie hivernales; (3) les crues se produisant en périodes de forts débits de base; (4) les crues se produisant en périodes de faibles débits de base. Si l'on se concentre sur les résultats obtenus au Québec (QC) et au Mexique (MX), il est possible de remarquer qu'au Québec ERA5 (en bleu) et MSWEP (en vert) donnent généralement des résultats similaires alors qu'au Mexique MSWEP permet d'obtenir de meilleures performances. Des conclusions similaires peuvent également être tirées de la Figure 5.9 qui montre l'erreur relative entre les maximas annuels de débits 3h simulés et observés.

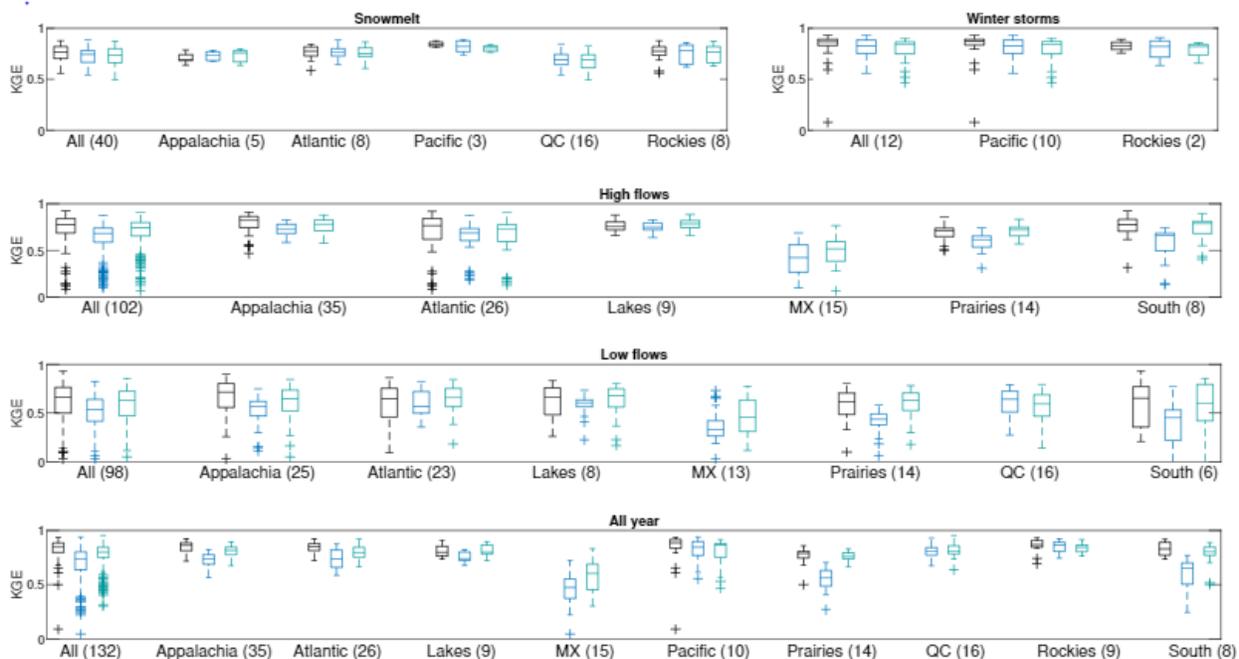


Figure 5.8 Distributions des valeurs de KGE en validation lorsque les bassins sont regroupés par processus (titres en noir) et par régions (regroupements de bassins pour les différents processus). Les valeurs entre parenthèses indiquent les nombres de bassins fournissant les valeurs à partir desquelles chacune des boîtes à moustaches a été générée. Les couleurs noire, bleue et verte représentent les résultats obtenus en utilisant les données de précipitation et température provenant, respectivement, de MOPEX (É.-U. seulement), ERA5 et MSWEP.

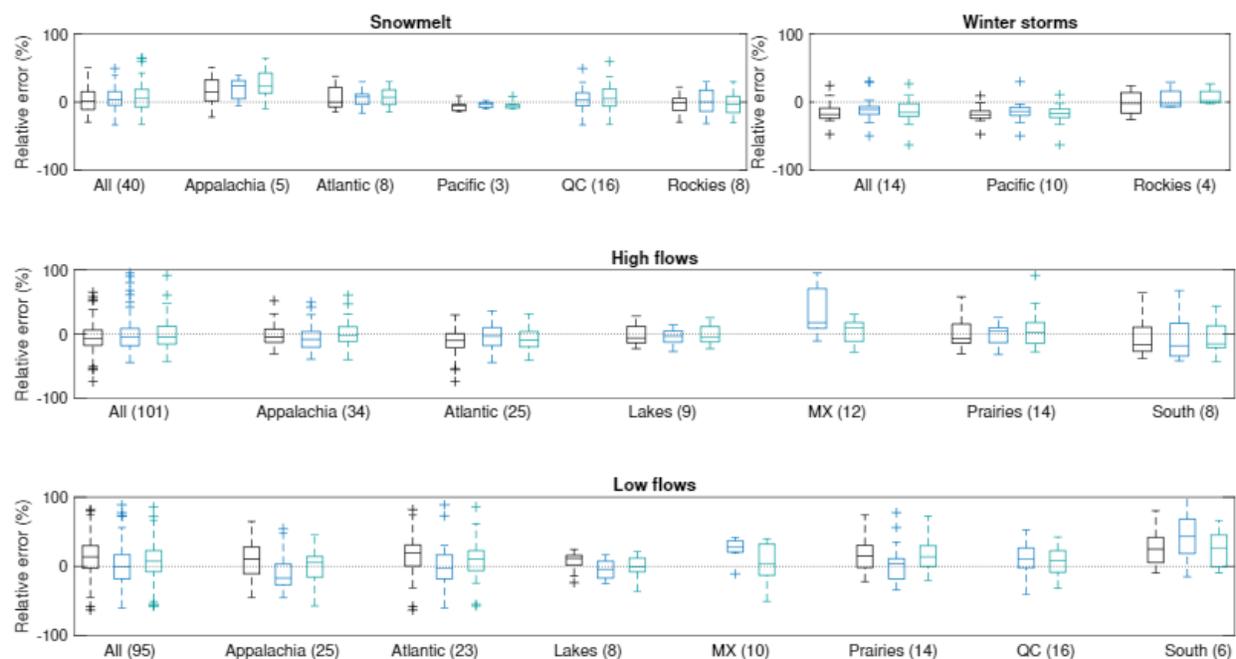


Figure 5.9 Distributions des valeurs de l'erreur relative sur les débits maximums annuels 3h lorsque les bassins sont regroupés par processus (titres en noir) et par régions (regroupements de bassins pour les différents processus). Les valeurs entre parenthèses indiquent les nombres de bassins fournissant les valeurs à partir desquelles chacune des boîtes à moustaches a été générée (la légende de couleur est la même que pour la Figure 5.8).

Les Figure 5.10 et Figure 5.11 montrent les résultats des deux principaux types de comparaisons qui ont été effectuées, de manière à étudier la valeur ajoutée des simulations sous-journalières. Les résultats sont présentés pour la variable notée Q_m , soit la valeur moyenne des débits maximums annuels pour la période de disponibilité des données dans chaque bassin, ainsi que pour les débits de crue de périodes de retour 10, 25, 50 et 100 ans. Les valeurs constituant chacune des boîtes à moustaches ont été obtenues en considérant, pour chaque bassin, la meilleure combinaison 'jeu de données climatiques-modèle hydrologique-méthode d'analyse fréquentielle'. Le modèle hydrologique et le jeu de données sont sélectionnés sur la base des KGE obtenus en validation, au pas de temps de 3h. La meilleure méthode d'analyse fréquentielle est sélectionnée comme étant celle qui minimise l'écart entre les débits de crues estimés à partir des valeurs simulées et les débits de crues estimés à partir des observations, parmi les deux méthodes suivantes : (1) la méthode *peak-over-threshold* (qui permet d'augmenter le nombre de valeurs de débits considérés dans l'analyse, pour les bassins dont les historiques de données sont plus courts), (2) la méthode préconisée par le USGS (*United States Geological Survey*) et reposant sur la loi Log-Pearson III (England Jr et al., 2019; rappelons qu'une part importante des bassins utilisés dans l'étude se trouve aux États-Unis, ce qui a mené à l'identification de cette méthode).

Les résultats de la Figure 5.10 montrent la comparaison entre la modélisation aux 24 heures (notée 24) et la modélisation aux 24 heures obtenue à partir de simulations effectuées aux trois heures et ensuite moyennées sur 24 heures (notée 324). Les valeurs constituant les boîtes à moustaches sont, pour chaque bassin, la différence entre les écarts absolus 'simulé-observé 24' et 'simulé-observé 324'. Lorsque les valeurs sont positives, la simulation 324 donne de meilleurs résultats que la simulation 24. Au Mexique, pour les crues *High flows*, la modélisation aux 24 heures se montre plus avantageuse pour l'indice Q_m , par contre ceci pourrait être dû au manque de données au pas de temps de 3 heures, par rapport à celui de 24 heures. Ensuite, avec l'augmentation de la période de retour, l'avantage de la modélisation aux trois heures ressort. Des résultats similaires sont aussi obtenus pour les crues *Low flows*, mais de façon moins marquée. Au Québec, un léger avantage de la modélisation aux 3 heures ressort pour les crues associées à la fonte de la neige.

La Figure 5.11 montre une comparaison entre l'utilisation de la modélisation aux trois heures (notée 3) et la méthode du facteur de pointe appliquée aux débits de pointe 24 heures (notée EFP-Qs24) pour la simulation des crues. Les valeurs constituant les boîtes à moustaches sont, pour chaque bassin, la différence entre les écarts absolus 'simulé-observé EFP-Qs24' et 'simulé-observé 3'. Lorsque les valeurs sont positives, la simulation aux trois heures donne de meilleurs résultats que la méthode du facteur de pointe. Les avantages de la modélisation aux 3 heures sont évidents pour le Mexique (malgré les données manquantes) et également observés pour le Québec, quoique moins marqués. De façon générale, les résultats montrent un avantage pour les bassins ayant un comportement réactif, soit en raison de leur plus faible superficie ou de leur localisation en zone montagneuse (MX, Appalaches), ou encore en période de forts débits. De plus, en période de faibles débits, la modélisation aux trois heures se montre avantageuse dans les régions des Grands Lacs (Lakes) et dans les bassins du sud des États-Unis (South) où la variabilité des facteurs de pointe est grande.

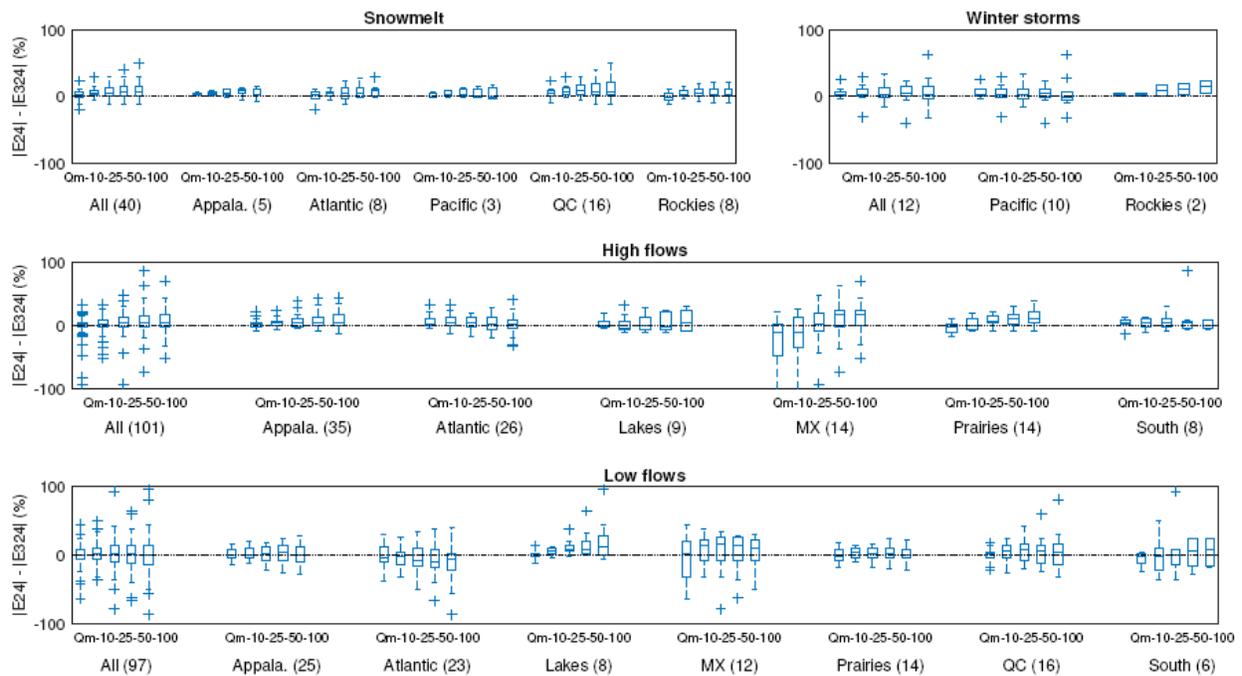


Figure 5.10 Comparaison entre la modélisation aux 24 heures (notée 24) et la modélisation aux 24 heures obtenue à partir de simulations effectuées aux trois heures et ensuite moyennées sur 24 heures (notée 324). Les valeurs constituant les boîtes à moustaches sont, pour chaque bassin, la différence entre les écarts absolus 'simulé-observé 24' et 'simulé-observé 324'. Q_m représente la moyenne des débits maximums annuels; 10, 25, 50 et 100 réfèrent aux débits associés à es périodes de retour.

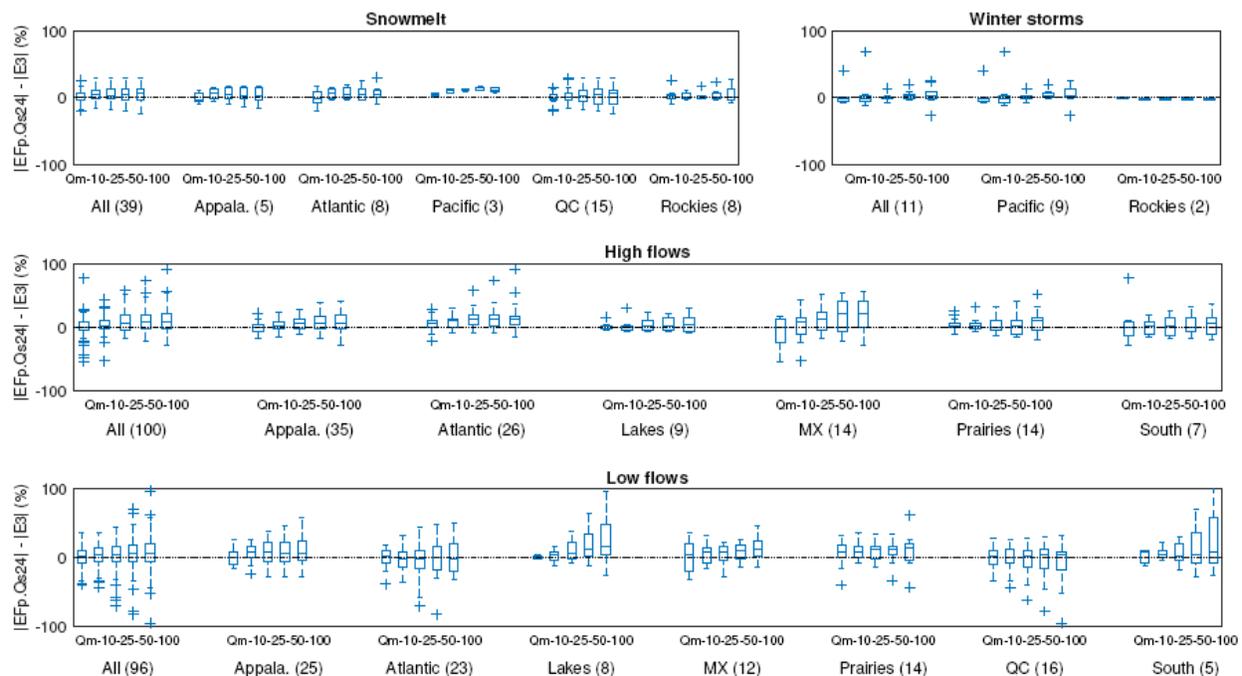


Figure 5.11 Comparaison entre l'utilisation de la modélisation aux trois heures (notée 3) et la méthode du facteur de pointe appliquée aux débits de pointe 24 heures (notée $EFp-Qs24$) pour la simulation des crues. Les valeurs constituant les boîtes à moustaches sont, pour chaque bassin, la différence entre les écarts absolus 'simulé-observé $EFp-Qs24$ ' et 'simulé-observé 3'. La légende, pour l'axe des abscisses, demeure la même que pour la Figure 5.10.

Des défis persistent en modélisation hydrologique sous-journalière, notamment en ce qui a trait à la disponibilité des données, tant en quantité qu'en qualité. La Figure 5.9 montre des écarts relatifs sur les débits maximums annuels aux 3 heures pouvant atteindre 100%. Il peut s'agir d'erreurs sur les observations ou encore de défis associés à la modélisation (modèles utilisés, disponibilité des données) ou d'une combinaison des deux. Cette dernière affirmation demeure vraie pour bon nombre d'études en hydrologie / modélisation hydrologique malgré les progrès réalisés continuellement. Ceci dit, il reste beaucoup de place pour d'autres études en modélisation sous-journalière.

5.1.4 Objectif I.3 Modélisation hydroclimatique en périodes d'étiages

Modélisation hydroclimatique et incertitude associée à la formulation d'évapotranspiration potentielle

Le premier sous-projet associé à cet objectif est le travail de maîtrise qui a été réalisé par Gabrielle Dallaire. Cette dernière s'est intéressée à l'incertitude associée au choix de la formulation d'évapotranspiration potentielle (ETP) pour la modélisation des étiages en contexte de changement climatique. Les travaux de Gabrielle sont entièrement finalisés. Son mémoire de maîtrise se trouve au : <https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/2312/>. De plus, un article scientifique a été produit et a tout récemment été accepté pour publication dans *Hydrological Sciences Journal* (une copie du Manuscrit se trouve à l'Annexe B). L'étude a été réalisée dans 2080 bassins versants situés au Canada, aux États-Unis et au Mexique. Les résultats présentés ci-après sont issus de l'article qui présente quelques modifications (sans impact majeur sur les conclusions générales) par rapport au mémoire en raison des commentaires reçus de la part des réviseurs, notamment.

La Figure 5.12 montre la méthodologie appliquée. Les simulations issues de huit modèles globaux de l'ensemble CMIP5 (couvrant des sensibilités climatiques diversifiées) ont été utilisées, de même que deux méthodes de post-traitement (*daily scaling* et *daily bias correction*), deux modèles hydrologiques (HMETS et GR4J) et 10 formulations d'ETP (présentées au Tableau 5.2). Les RCP 4.5 et 8.5 ont également été considérés. Les résultats ont été générés pour les indices d'étiage 7Q2, 7Q10 et 30Q5 (respectivement : le débit d'étiage sur sept jours consécutifs et de période de retour deux ans, le débit d'étiage sur sept jours consécutifs et de période de retour 10 ans, le débit d'étiage sur 30 jours consécutifs et de période de retour cinq ans). De façon générale, les résultats montrent une augmentation de l'ETP dans le futur (horizons 2041-2070 et 2071-2100), ce qui n'est pas nécessairement surprenant puisque la totalité des formulations utilisées repose sur la température comme donnée d'entrée en plus de la radiation solaire extra-terrestre (calculée) pour certaines. L'augmentation est plus prononcée pour l'horizon plus lointain et pour le RCP 8.5. Les débits d'étiage tendent donc à diminuer.

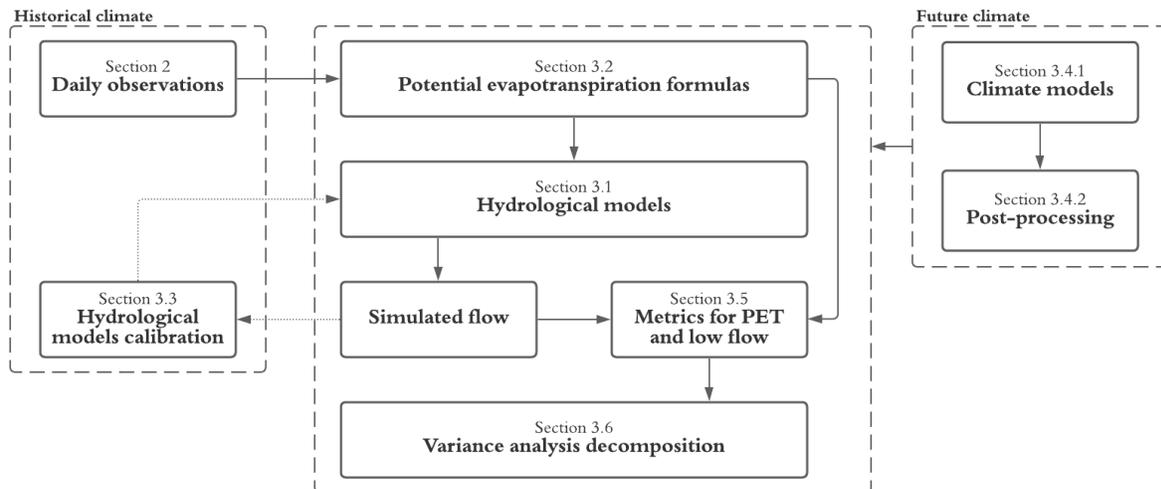


Figure 5.12 Méthodologie appliquée dans le cadre des travaux de l'objectif I.3 sur l'incertitude liée à la formulation d'évapotranspiration dans les études d'impacts des changements climatiques sur les étiages. Les numéros apparaissant dans les boîtes réfèrent aux sections de l'article de Dallaire et al. (2021) (Annexe B).

Tableau 5.2 Liste et description des formulations d'ETP utilisées dans le cadre des travaux de l'objectif I.3 sur les étiages. L'ensemble des références peut être retrouvé dans l'article de Dallaire et al. (2021).

Nom (Référence)	Formulation d'ETP
1. Blaney and Criddle (BC) (Blaney & Criddle, 1950)	$PET_{BC} = 0,825 \left(100 \frac{DL}{365 * 12} \right) (0,46T_m + 8,13)$
2. Hamon (H) (Hamon, 1960)	$PET_H = \left(\frac{DL}{12} \right)^2 \exp \left(\frac{T_m}{16} \right)$
3. Hydro-Quebec (HQ) (Fortin, 2000)	$PET_{HQ} = 0,029718(T_{max} - T_{min}) \exp \left(0,019 \left(\frac{9}{5} (T_{max} + T_{min}) + 64 \right) \right)$
4. Kharrufa (K) (Kharrufa, 1985)	$PET_K = 0,34 \left(100 \frac{DL}{365 * 12} \right) T_m^{1,3}$
5. Mohyse (M) (Fortin & Turcotte, 2006)	$PET_M = \frac{4,088}{\pi} \omega * \exp \left(\frac{17,3T_m}{238 + T_m} \right)$
6. Baier and Robertson (BR) (Baier & Robertson, 1965)	$PET_{BR} = 0,157T_{max} + 0,158(T_{max} - T_{min}) + 0,109R_e - 5,39$
7. Hargreaves and Samani (HS) (Hargreaves & Samani, 1985)	$PET_{HS} = 0,0023 \frac{R_e}{\lambda \rho} \sqrt{(T_{max} - T_{min})} (T_m + 17,8) 1000$
8. Jensen and Haise (JH) (Jensen & Haise, 1963)	$PET_{JH} = 1000 \frac{R_e T_m}{\lambda \rho 40}$
9. McGuinness and Bordne (MB) (McGuinness & Bordne, 1985)	$PET_{MB} = 1000 \frac{R_e T_m + 5}{\lambda \rho 68}$
10. Oudin (O) (Oudin and al., 2005)	$PET_O = 1000 \frac{R_e T_m + 5}{\lambda \rho 100}$

La Figure 5.13 montre les résultats suite à l'application de la méthode de décomposition de la variance pour les bassins québécois et mexicains de l'étude. Il s'agit des résultats pour l'indice 7Q2 et l'horizon 2071-2100, représentatifs des résultats obtenus pour l'indice 7Q10 également et aux horizons 2041-

2070 ainsi que 2071-2100. On y remarque, tant au Québec qu’au Mexique, qu’une forte contribution à l’incertitude provient de la modélisation hydrologique (modèles – H, et formulations d’ETP – E). Ces résultats sont obtenus en considérant toutes les interactions possibles entre les diverses composantes de l’incertitude étudiées. En examinant plus en détail les résultats associés à la formulation d’ETP, ces derniers montrent une forte interaction entre le modèle hydrologique et la formulation d’ETP. Pour ce qui est de l’indice 30Q5, les résultats sont différents et montrent une plus grande contribution du modèle de climat à l’incertitude. Sur une période d’été plus longue, 30 jours dans ce cas, il est possible que l’incertitude climatique joue un rôle plus important.

Il importe de préciser que le nombre de bassins étudiés au Mexique, dans le cadre de cette étude, est comparativement plus faible (20) par rapport au nombre de bassins québécois (environ 50) et ne couvre pas toute la diversité du territoire mexicain. Ces travaux ont été entrepris au tout début du projet alors que la base de données mexicaine était plus limitée que ce qu’elle est aujourd’hui. Ceci dit, les résultats montrent que, pour des travaux futurs, il importe de se pencher sur une modélisation à base plus physique de l’évapotranspiration, laquelle tient compte de facteurs climatiques additionnels (humidité relative de l’air, vitesse du vent, bilan radiatif à la surface) et, si possible, de la disponibilité de l’eau dans le sol. Des défis sont évidemment associés à l’utilisation de ce type d’approche, en ce qui concerne l’accès aux données observées et le transfert d’échelle spatiale entre l’observation (souvent ponctuelle) et la modélisation à l’échelle de bassins versants.

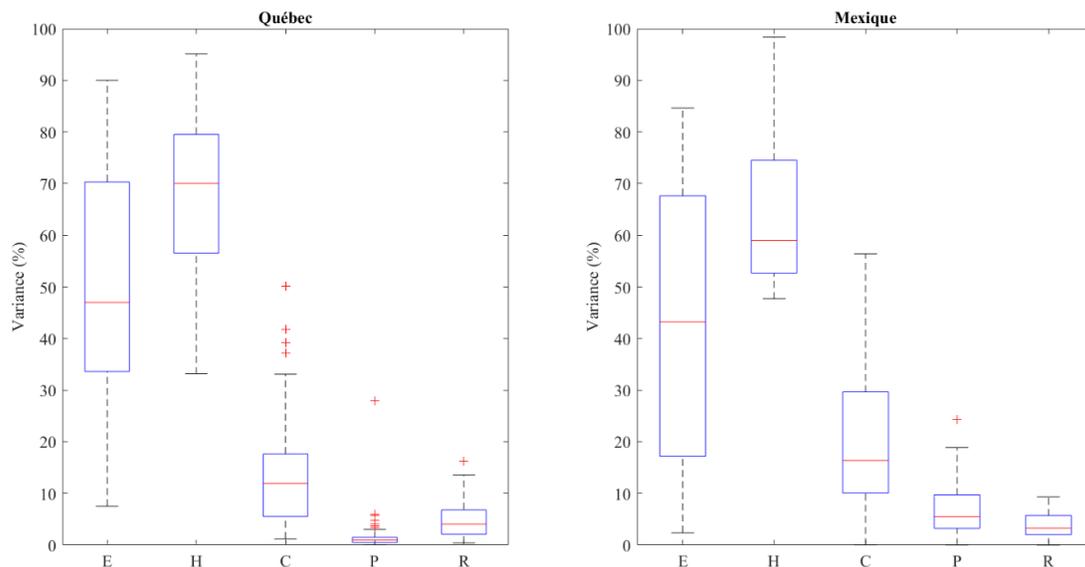


Figure 5.13 Résultats de l’analyse de décomposition des variances associées aux formulations d’ETP (E), aux modèles hydrologiques (H), aux simulations climatiques (C), aux méthodes de post-traitement (P) et aux RCP (R) pour l’indice d’été 7Q2 à l’horizon 2071-2100.

Modélisation hydrologique : HYDROTEL

Ces travaux, réalisés par Sara Patricia Ibarra Zavaleta (stagiaire postdoctorale) et Guillaume Lévesque (étudiant à la maîtrise), ont permis d’augmenter la quantité de bassins versants mexicains modélisés

avec HYDROTEL et utilisant la même version que pour les bassins québécois (version 4). La Figure 5.14 montre une carte des bassins ajoutés par Sara. Ces bassins ont été utilisés par Mariana dans le cadre des travaux de sa thèse de doctorat (partie portant sur le développement de méthodes de pondération des simulations hydrologiques).

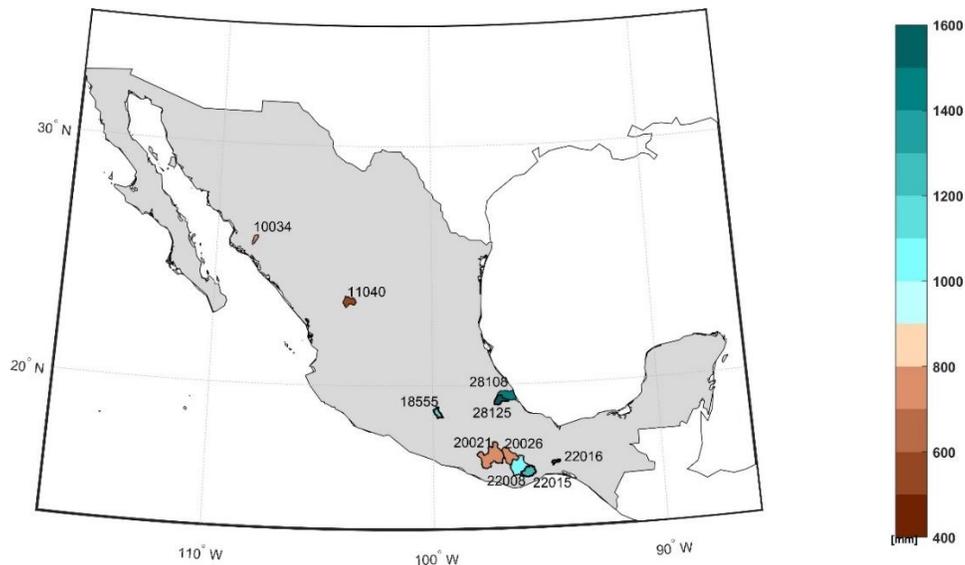


Figure 5.14 : Localisation et numéros des stations hydrométriques des bassins mexicains sur lesquels la version 4 d'HYDROTEL a été mise en place par Sara Ibarra. La valeur annuelle moyenne de précipitation totale est également montrée, suivant l'échelle de couleurs de droite.

La Figure 5.15 montre le bassin sur lequel Guillaume a travaillé en collaboration avec les ingénieurs de l'Institut mexicain des technologies de l'eau (IMTA) dans le cadre d'un stage réalisé à l'automne 2019. Dans ce dernier cas, il s'agissait d'une première implantation visant à accompagner l'IMTA dans la mise à jour d'HYDROTEL et des outils de calage automatique (DDS, DDS-MADS; Tolson et Shoemaker, 2007; Huot et al., 2019). Le bassin se trouve dans l'état de Jalisco, situé sur la côte du Pacifique. Pour le moment, il ne fait pas partie des bassins étudiés par Mariana dans le cadre de sa thèse de doctorat mais constitue certainement un ajout pertinent à la base de données HYDROTEL mexicaine disponible pour des travaux futurs.

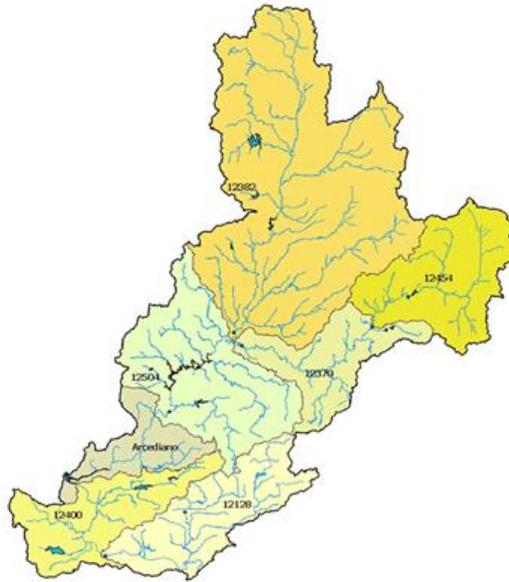


Figure 5.15 Représentation du bassin versant Arcediano situé dans l'état de Jalisco au Mexique

5.2 Axe II Établir une structure d'analyse des échanges d'informations et d'outil d'aide à la planification de mesures d'adaptation

La présente section porte spécifiquement les résultats associés aux deux sous-objectifs de l'Axe II. La première sous-section présente l'analyse des échanges d'information selon une approche de représentation en réseau, tandis que la seconde aborde la démarche associée à l'élaboration d'un outil d'identification des caractéristiques de sensibilité de la zone d'étude en appui à une démarche de proximité portée par des acteurs du territoire.

5.2.1 Analyse des échanges d'informations associées à l'adaptation aux changements climatiques

La démarche d'analyse des échanges d'information réalisée pour les territoires du Québec et du Mexique permet d'illustrer la nature et l'importance tant des catégories d'acteurs que de l'information associée aux ressources (rapport, guide, outil, etc.) en lien avec l'adaptation aux changements climatiques. La Figure 5.16 présente une représentation des échanges d'information pour les deux territoires.

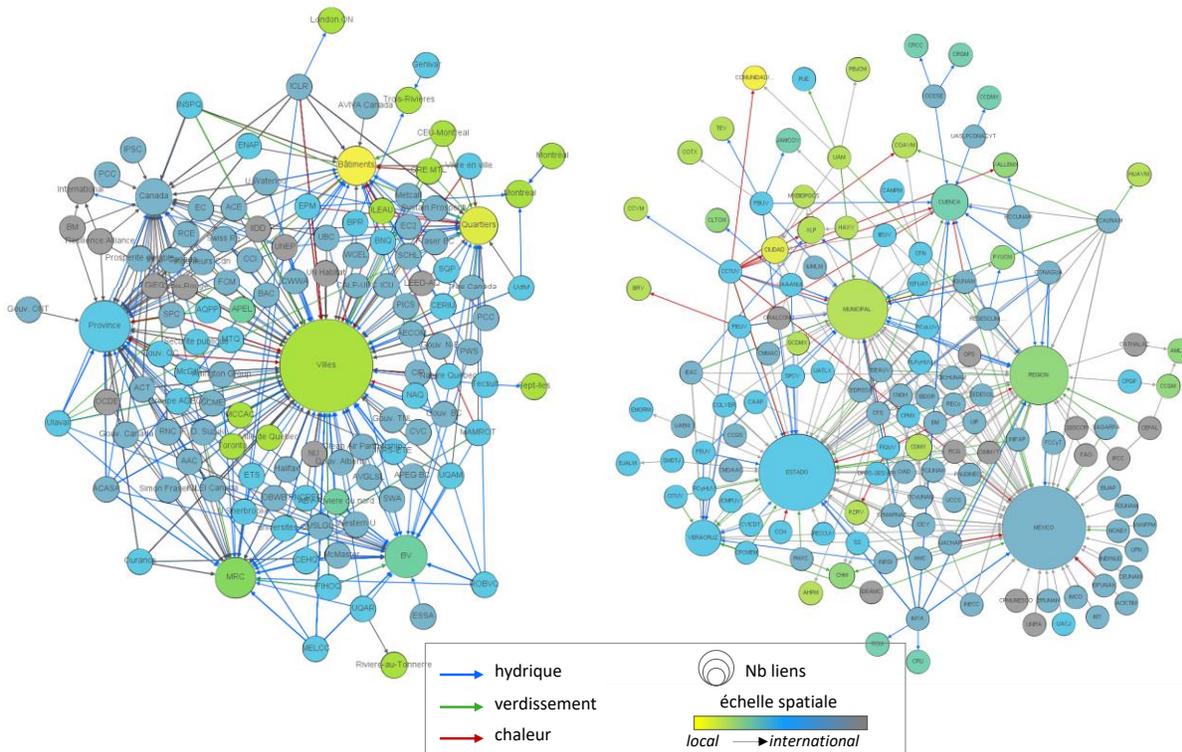


Figure 5.16 Structure comparée des réseaux d'échanges d'informations (a) Québec; (b) Mexique

La démarche de construction des deux réseaux s'appuie sur une structuration commune de l'information similaire pour construire les tables nécessaires à leur élaboration. Néanmoins, certains biais ont pu être constatés qui sont inhérents au processus de compilation l'information de la littérature qui s'est réalisée en parallèle pour les deux territoires (Québec et Mexique). Du côté québécois, la base de données de Bleau et al. (2018b), utilisée dans un premier temps pour constituer les tables des noeuds et des liens, a été élaborée pour dresser l'inventaire des ressources adressées spécifiquement pour les milieux urbains. À noter cependant qu'en ce qui concerne les documents issus de la base de données initiales de Bleau et al. (2018b), 73 % des documents génèrent au moins un lien vers un acteur autre qu'une municipalité. Ceci étant, l'accès facilité à un grand volume de documents référencés, peut générer un biais persistant. Pour limiter ce biais spécifique, les ressources disponibles auprès du ROBQ non déjà référencées dans la base de données Bleau et al. (2018b) ont été considérées et elles correspondent à 40 % (23 des 57 documents recensés) des ressources adressées spécifiquement au niveau des bassins versants. Cependant, l'information recensée ne s'appuie que sur les documents accessibles en ligne et n'inclut pas les échanges entre acteurs qui se réalisent lors d'activités spécifiques telles que les ateliers, séminaires, table de concertation ou autres études non divulguées.

Du côté mexicain, les résultats ont été obtenus par une reconstruction à partir d'une recherche des documents disponibles en ligne en s'appuyant sur la nomenclature utilisée au Québec et n'inclut donc pas le même biais potentiel initial

Considérant les limites identifiées précédemment, l'expression graphique des deux réseaux de la Figure 5.16 permet néanmoins de mettre en évidence certains aspects reliés aux deux contextes territoriaux. L'analyse des deux réseaux montre que l'information disponible pour les acteurs de territoire qui se

penchent sur l'adaptation aux changements climatiques est dirigée vers les différents paliers gouvernementaux des états (nationaux, état/province, municipaux). Il existe toutefois une répartition différente entre les différents paliers de territoires. Au Québec, le poids des villes plus important relativement aux niveaux de la province ou du pays (Canada), tandis qu'au Mexique, il y a un certain équilibre entre les différents paliers qui incluent l'entité « Region ». Ceci étant, en considérant une analyse basée sur les territoires du Québec et du Mexique, cela introduit, *de facto*, une différence en définissant des paliers de gouvernement respectivement provincial et fédéral.

Dans une moindre mesure et plus spécifiquement au Québec, l'information est adressée spécifiquement aux gestionnaires des bassins versants. Ce constat peut s'expliquer par une reconnaissance du Québec des organismes de bassins versants comme des acteurs clés dans la gestion intégrée des ressources hydriques et du ROBVOQ comme interlocuteur privilégié au niveau provincial pour favoriser une bonne gouvernance de l'eau.

En support à la représentation graphique du réseau d'échange d'information, le Tableau 5.3 présente les principales caractéristiques des nœuds (Acteurs) « origine » (par qui l'information est produite) et « destination » (à qui l'information est destinée), la catégorie des acteurs ainsi que la nature des « Liens » type de l'information qui est échangée).

Tableau 5.3 Principales caractéristiques des nœuds (acteurs) et des liens (liens) du réseau d'échange d'information pour le Québec et le Mexique.

	Qc	Mx		Qc	Mx		Qc	Mx
Acteurs (Nœuds)	134	135	Origine (nœuds)	116	97	Relations (Liens)	550	271
Origine	116	97	OSBL	42	18	rapport	208	116
Destination	18	38	gouvernement	21	22	guide, plan d'actions	157	45
			université	19	42	outil	77	41
			prive	16	2	document informatif	63	52
			organisme international	8	7	communication/fiche	29	8
			municipal	6	4	base de données	13	4
			ordre professionnel	4	2	atlas	3	5
			Destination (nœuds)	553	368			
			Municipalités / Villes	236	76			
			Province / État	88	109			
			Bassins versants	57	22			
			MRC / Région	51	59			
			Batiments/Lots	44	0			
			Quartiers	40	2			
			Canada / Mexique	37	100			

Considérant les territoires à l'étude, il apparaît une plus grande proportion de sources (origine) de type universitaire au Mexique qu'au Québec. Le constat inverse est observable pour les sources des organismes sans but lucratif (OSBL). Le grand nombre d'universités ayant généré des informations identifiées pour le territoire mexicain peut s'expliquer par le territoire d'analyse qui est de niveau national alors qu'il est de niveau provincial au Québec. Cette raison peut également être renforcée par une politique de diffusion des études universitaires plus systématique. Pour ce qui est des acteurs « Destinataire », les variations entre les différentes catégories correspondent à la taille des nœuds du graphique du réseau de la Figure 5.16 et à l'analyse qui en a découlé. Pour ce qui est des liens, la majorité des informations, tant au Québec qu'au Mexique, est contenue dans des rapports (environ 40%). Par ailleurs, la répartition entre les différentes catégories tend à indiquer une plus grande proportion de guides ou outils au Québec qu'au Mexique. Cela peut s'expliquer par une production d'information plus

importante des OSBL au Québec. Cet aspect a potentiellement une incidence pour les communautés qui initient une démarche d'analyse et d'identification des mesures d'adaptation aux changements climatiques. En effet, au-delà de l'information hydroclimatique, la mise en place d'un processus d'adaptation, la réussite repose sur l'intégration des différentes dimensions d'une démarche participative telle que la capacité à identifier et comprendre les enjeux, les outils et les indicateurs de suivis en regard d'un accompagnement cohérent apte à mobiliser les acteurs.

5.2.2 Outil de structuration des informations hydroclimatiques en réponse aux besoins des utilisateurs

Pour le deuxième volet de l'Axe II, la démarche s'est appuyée sur le suivi des échanges dans le contexte de la communauté de la Rés-Alliance² du bassin versant de la St-Régis en vue d'élaborer un plan d'adaptation aux changements climatiques. Par ailleurs, les réflexions se sont également appuyées sur les discussions et réflexions avec le ROBVQ et Ouranos sur les outils disponibles et/ou à développer. Sur ce dernier point, l'intérêt des discussions reposait d'une part sur l'évaluation du potentiel d'utilisation des outils Impact'Climat et Objectif'Climat développés par l'ADEME (Agence de la transition écologique, France) et pour lesquels Ouranos a entamé une réflexion en 2018. Cependant, le déploiement de ces deux outils de l'ADEME à l'échelle d'un petit bassin versant comme celui de la St-Régis n'apparaissait pas réaliste en regard du niveau d'information et de mobilisation des compétences nécessaires pour le mettre rapidement en opération.

D'autre part, dans le contexte de la communauté de pratique de la Rés-Alliance, le ROBVQ avait entamé l'élaboration d'un outil d'identification des vulnérabilités d'un territoire. L'outil avait pour objectif d'intégrer une approche d'analyse de risques basée sur une cotation des différentes dimensions de la vulnérabilité (exposition, sensibilité, capacité d'adaptation) en s'appuyant sur la définition de l'unité géographique étudiée, l'identification des causes, de l'actif associé ainsi que les indicateurs pertinents en regard du phénomène hydroclimatique d'intérêt. La structuration de la démarche visait à faciliter l'utilisation d'échelles de cotation spécifiques aux différentes composantes de la vulnérabilité et agréger l'analyse en attribuant une valeur de vulnérabilité à l'unité territoriale étudiée. Sur la base des discussions, et en complémentarité avec la démarche du ROBVQ, l'approche retenue dans le cadre de cette étape du projet repose sur une structuration de l'information minimisant l'agrégation des différents éléments d'un territoire qui amènent à définir sa sensibilité. La démarche du ROBVQ a été formalisée sous la forme d'un guide méthodologique (ROBVQ, 2018)

L'outil, développé sur Excel® selon la structure matricielle préétablie, a été concrétisé et testé dans le cadre des municipalités du bassin versant de la St-Régis. La Figure 5.17 présente un exemple d'application de l'outil pour la municipalité de Saint-Michel du bassin versant de la Saint-Régis.

² La Rés-Alliance est une communauté de pratique en adaptation aux changements climatiques coordonnée par le Regroupement des organismes de bassins versants du Québec (ROBVQ).

La formalisation de la structure par matrices successives permet de minimiser l'agrégation de l'information et favorise le processus de réflexion des parties prenantes en regard des enjeux (sensibilité) et des composantes du territoire soumis aux aléas hydroclimatiques. Par ailleurs, le double code (échelle de 1@4 et couleur), caractérisant respectivement la nature de l'information et la sensibilité estimée, permet d'explicitier le cheminement de la réflexion réalisée par les acteurs impliqués dans le processus d'analyse du territoire. Dans cette perspective, la documentation, qui peut être associée aux différentes composantes, vient supporter la démarche itérative d'identification des mesures potentielles à mettre en place pour faciliter l'adaptation aux changements climatiques.

La représentation structurée et synthétique obtenue par l'outil matriciel permet d'une part, d'exprimer la variété des préoccupations relevées de la communauté de pratique Rés-Alliance du bassin versant de la St-Régis et, d'autre part, d'arrimer les mesures identifiées dans le plan d'adaptation élaboré par la communauté avec les sensibilités identifiées dans l'outil. Le rapport de maîtrise de Blondeau-Bouchard (2018) se trouve à l'Annexe D rapport et présente le travail réalisé par l'étudiante sur le développement de l'outil et son application à l'ensemble des sept municipalités du bassin versant de la Saint-Régis.

En complémentarité avec les activités réalisées au Québec, les réflexions de l'analyse de la sensibilité du territoire dans le contexte mexicain ont amené à utiliser l'outil par matrices dans le contexte de deux territoires. Considérant qu'au Mexique il n'existait pas de démarche similaire à celle de la Rés-Alliance et qu'il n'était donc pas possible d'accompagner une communauté dans sa réflexion dans l'analyse de la sensibilité de son territoire face aux aléas hydroclimatiques en vue d'identifier des mesures d'adaptation, l'approche retenue a été : (1) d'identifier deux territoires de l'État de Veracruz spécifiquement sensibles à un aléa climatique (inondations ou sécheresse); (2) d'identifier les composantes par catégorie de services à la population; (3) d'évaluer le degré de sensibilité du territoire.

Dans ce contexte, le travail s'est porté sur l'analyse d'un territoire correspondant à un contexte de climat chaud et sec (municipalité de Pánuco, État de Veracruz) et d'un territoire soumis historiquement à des inondations (municipalités en aval du bassin versant de La Antigua, État de Veracruz). Sur la base de l'information compilée en lien avec les caractéristiques des territoires étudiés (cartes de risques municipales ou nationales, analyses fréquentielles des débits (périodes de retour), topographie, cartes géologiques, bases de données (météorologiques – CLICOM, de l'Institut national de statistique et de géographie, agricoles), il a été possible de caractériser le territoire en regard de l'aléa climatique ciblé (à l'image de la Figure 5.18 (a)). Sur la base de cette caractérisation, la localisation des éléments du territoire (infrastructures et composantes de services urbains) a servi à compléter les différentes matrices de l'outil développé initialement pour le Québec. Cependant, l'absence d'interlocuteurs associés à une démarche d'adaptation par les acteurs du territoire, n'a pas permis d'intégrer la compréhension du territoire par les parties prenantes et analyser l'adéquation entre l'expression matricielle et leur compréhension. Ceci étant, une avenue a été explorée pour exploiter l'information compilée pour élaborer un indice global de vulnérabilité (par zone ou par infrastructure de service aux citoyens) par l'intégration de critères environnementaux, sociaux et économiques). Ainsi, dans chacun des deux territoires mexicains, une approche d'analyse multicritère (méthode AHP - Analytic hierarchy process) a été utilisée pour évaluer l'intérêt d'une expression pondérée de la vulnérabilité en considérant soit les différents services urbains présents à l'intérieur des zones à risque d'inondation (à l'image de la Figure 5.18 (b)), soit par nature des fonctions (sociale, économique, environnementale) associées aux installations soumises à une sécheresse.

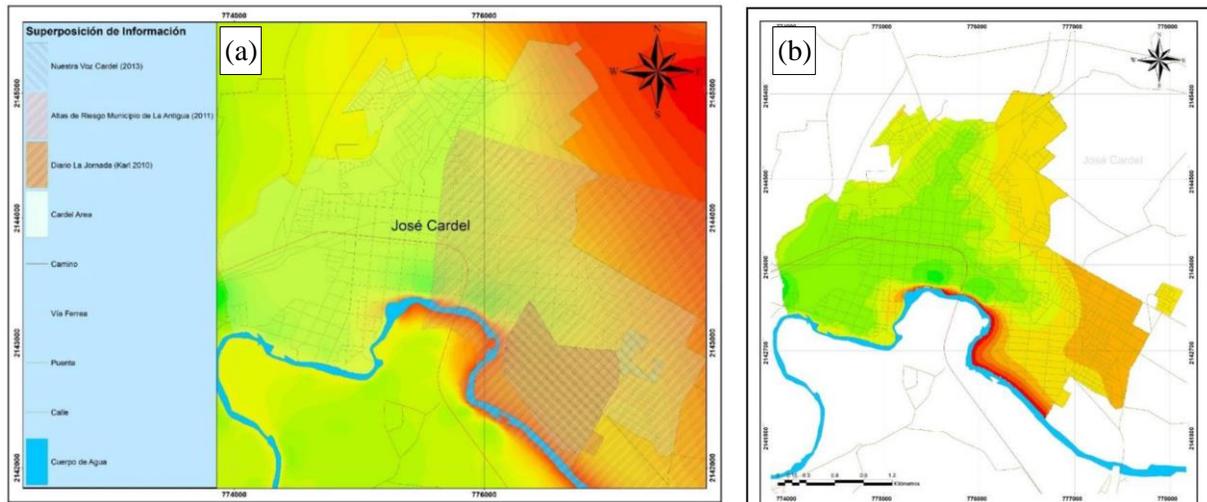


Figure 5.18 Illustration de l'information spatialisée pour la municipalité de José Cardel (BV La Antigua, État de Veracruz) (a) des zones inondables à partir des données disponibles pour le territoire; (b) des zones de vulnérabilité après analyse multicritère par composantes de services à la population

La démarche spécifiquement appliquée dans le contexte mexicain, soit l'analyse multicritère amenant à pondérer le degré de sensibilité en regard du risque d'aléa par zone et la présence d'infrastructures de service, révèle un aspect intéressant : la détermination d'un indice de sensibilité pondéré, permet dès lors l'expression de cet indice sous forme de carte(s), facilitant l'identification des zones à prioriser. Ceci étant, dans un processus d'élaboration d'un plan de mesures d'adaptation, l'identification par zone des sensibilités des points de services limite potentiellement l'analyse de la dynamique territoriale et, *de facto*, l'identification de mesures préventives ou correctrices applicables en amont des éléments du territoire identifiés comme sensibles. Ceci est particulièrement signifiant dans le cas des aléas de type hydroclimatique. Ainsi, les cartes de vulnérabilité doivent être interprétées avec l'information compilée dans les matrices de l'outil afin de conserver dans l'analyse du territoire les liens fonctionnels entre les caractéristiques et les ouvrages du territoire et les différents points de services tant urbains qu'économiques. Un autre point de réflexion spécifique à la démarche réalisée au Mexique est l'application d'une pondération aux différents critères de l'analyse permettant l'agrégation des différents facteurs du territoire en un indice de vulnérabilité. Pour que l'indice reflète une compréhension des spécificités locales, il apparaît pertinent que le processus de pondération repose sur une participation des différentes catégories d'acteurs du territoire, ce qui n'était pas envisageable dans le contexte des deux études de cas.

Indépendamment des étapes spécifiques appliquées au Québec ou au Mexique, la démarche d'analyse de l'information disponible permettant d'identifier les éléments du territoire sensibles à des aléas climatiques s'inscrit dans un processus dynamique d'identification de mesures potentielles permettant de répondre aux enjeux. À l'exemple du bassin versant de la St-Régis, le plan d'adaptation identifie un ensemble d'interventions qui méritent par la suite des études spécifiques en vue de leur mise en œuvre. Dans cette perspective, les échanges avec les acteurs du territoire (municipalité de Saint-Isidore, BV de la St-Régis) en 2018 ont permis d'identifier une problématique d'inondations spécifique à un secteur de la municipalité dont l'information nécessaire à la prise de décision n'était pas disponible. Afin de combler cette lacune, un projet de recherche a été développé en vue de modéliser le phénomène et

évaluer les mesures d'adaptation (finalisation 2021). Les caractéristiques du projet sont présentées plus spécifiquement à la prochaine section.

6. Analyse et discussion

Dans le cadre de cette section, l'approche adoptée repose sur les réflexions engendrées par les activités selon trois angles d'analyse, soient : (1) les résultats et développements issus du projet; (2) les aspects de complémentarité des deux axes du projet; (3) les enseignements tirés de l'intégration des spécificités des territoires du Québec et du Mexique, tant au niveau du contexte territorial que de la collaboration.

Les travaux de l'Axe I du projet ont permis la génération et le développement de connaissances scientifiques pour les études d'impacts des changements climatiques sur les extrêmes hydrologiques, soit les crues et les étiages. Bien que les étiages aient été abordés, plus d'efforts ont été dédiés à la question des crues et des inondations en raison du caractère prioritaire de ce type de question au Québec et au Mexique, et fort possiblement aussi en raison du meilleur arrimage que générerait ce thème entre les collaborateurs du Québec et ceux du Mexique, pour une première approche. Ceci dit, tel qu'exposé dans les recommandations de la Section 7, la question des étiages est tout simplement conservée pour la suite de la collaboration.

Le fait de travailler sur deux territoires aussi différents que le Québec et le Mexique a certainement contribué de manière positive au projet, en permettant : (1) d'effectuer des comparaisons et de tirer des conclusions à plus grande échelle, dans une gamme de conditions très variées (relief, climat, hydrologie); (2) de « confronter » des outils de modélisation hydrologique et climatique communément utilisés au Québec à ces conditions diversifiées (HYDROTEL, modèles hydrologiques globaux, MRCC5); (3) de tirer profit des expériences québécoise et mexicaine en lien avec les phénomènes climatiques et processus hydrologiques pertinents. Ceci dit, ce genre de projet bilatéral comporte également son lot de défis, surtout dans le cadre d'une première collaboration. Les différences culturelles, la manière de communiquer les enjeux et les intérêts (sans même considérer la barrière de la langue, peu présente en raison de la présence de partenaires bilingues ou presque tant du côté québécois que du côté mexicain) ont nécessité une adaptation et un apprentissage de part et d'autre. Par ailleurs, l'accès aux observations du côté mexicain, l'identification de périodes communes de disponibilité des données au Québec et au Mexique et la différence dans la quantité d'information disponible ont posé quelques défis qui ont nécessité d'adapter certaines parties des projets des étudiant(e)s, entre autres dans le cas du projet de doctorat de Virginie Destuynder s'intéressant à la modélisation hydrologique sous-journalière. Un autre élément à mentionner en lien avec la question des données est le temps. Au fil des échanges et des communications, nous avons réussi à identifier des sources additionnelles de données, faisant en sorte que la taille de la base de données hydroclimatiques mexicaines à disposition a augmenté entre le début et la fin du projet.

Alors que les objectifs I.1 et I.3 se sont concentrés sur des éléments de la chaîne de modélisation hydroclimatique qui ont donné lieu à beaucoup d'activité scientifique et à des développements continus ces dernières années, l'objectif I.2 a revêtu un caractère plus exploratoire. La modélisation hydrologique sous-journalière à l'échelle de bassins versants de l'ordre de dizaines et centaines de kilomètres carrés nécessitera des développements supplémentaires et est certainement appelée à gagner en maturité au cours des années à venir avec les bases de données sous-journalières qui sont en croissance et de plus en plus disponibles. Il n'en demeure pas moins que l'ensemble des travaux réalisés

ont mené à l'amélioration des connaissances et au développement de nouvelles méthodes qui contribueront à alimenter les outils de modélisation des partenaires du projet, soit l'IMTA et la DEH.

En ce qui concerne l'outil d'analyse de la sensibilité du territoire aux aléas hydroclimatiques développé dans le cadre de l'Axe II, il a été spécifiquement appliqué pour les municipalités du bassin versant de la St-Régis en bénéficiant de la dynamique de la communauté de pratique de la Rés-Alliance. Dans le contexte des collaborations en cours avec la SCABRIC (OBV de la St-Régis), il est attendu d'accompagner les acteurs de ce territoire dans le cadre d'études et de projets d'implantation de mesures d'adaptation au cours des prochaines années. Dans ce contexte, il est prévu de bénéficier de ces opportunités pour :

- consolider l'évaluation de l'analyse de sensibilité par les informations obtenues par le biais d'études spécifiques;
- évaluer la compréhension de l'information et du processus d'analyse auprès des acteurs du territoire;
- évaluer le potentiel d'intégration dans l'outil des notions complémentaires de vulnérabilité (capacité d'adaptation) et des termes de référence du guide du ROBVQ sur l'analyse de vulnérabilité;
- diffuser la démarche auprès des autres territoires par le biais d'événements regroupant des OBV;
- appliquer la démarche dans le contexte du Mexique sur des bassins versants en accompagnant des acteurs impliqués dans la gestion des ressources hydriques.

Par ailleurs, en fonction de l'intérêt et des opportunités, une des avenues pour la diffusion de l'outil est de le déployer sur une plateforme web. Ceci implique cependant une certaine maturité de développement pour que l'outil demande un minimum d'accompagnement et également une organisation qui prenne en charge la démarche.

Bien que le découpage et la planification des activités associées à chacun des deux axes étaient *a priori* indépendants, les réflexions tout au long du projet ont pris en considération la notion d'intégration des aspects de la chaîne de modélisation d'une part et, d'autre part, des informations utiles et utilisables par les initiatives réalisées par les acteurs de territoire, à l'exemple québécois des huit communautés de pratiques de la Rés-Alliance. Le retour d'expérience, notamment dans le cas du bassin versant de la St-Régis, montre qu'il est difficile de répondre adéquatement au besoin d'information, et ce, particulièrement dans le cas de petits bassins versants non jaugés. En effet, le manque d'informations hydrométriques / limnimétriques et climatiques, à des échelles spatiale et temporelle adéquates, constituaient les principaux obstacles à une meilleure analyse du comportement du bassin versant.

Afin de répondre à cette problématique, un projet de recherche a été initié sur un très petit bassin versant (2 km²) occupé par la municipalité de Saint-Isidore en prise avec un problème d'inondations. Dans ce contexte, la démarche visait à élaborer une méthodologie à l'intention de la municipalité afin d'évaluer des scénarios d'adaptation tout en considérant les changements climatiques. Basés sur l'étude de cas, les objectifs spécifiques consistaient à : (i) développer une chaîne de modélisation (climatique-hydrologique-hydraulique) adaptée au contexte d'un très petit bassin versant non jaugé en considérant le climat présent et futur; (ii) développer un processus d'analyse multicritère des scénarios d'adaptation en considération des besoins des acteurs du territoire. Le sujet de recherche fait l'objet d'un projet de maîtrise dont la finalisation est prévue au printemps 2021.

À titre de réflexion, la Figure 6.1 présente un découpage des processus spécifiques à chacun des deux sous-systèmes « Chaîne de modélisation hydroclimatique » et « Démarche territoriale d'adaptation aux CC » ainsi que leurs interactions potentielles en termes de dynamique d'échanges d'information.

Il y a dès lors une réflexion à poursuivre sur le niveau d'informations génériques pertinentes pour les initiatives territoriales par le biais, dans un premier temps, d'atlas, d'outils en ligne ou de bases de données ainsi que les capacités à mobiliser les ressources nécessaires pour répondre à la demande à des besoins spécifiques d'information de la part des acteurs du territoire. Cette démarche de réflexion devrait prendre en considération :

- les particularités des territoires qui peuvent s'exprimer en termes de sévérité de la vulnérabilité du territoire, les enjeux locaux, régionaux et nationaux associés ainsi que la maturité des organisations impliquées dans la démarche territoriale;
- l'accompagnement des parties prenantes dans l'analyse et le traitement des données afin de structurer les informations en regard des objectifs d'adaptation aux CC;
- les réseaux d'acteurs mobilisables pour favoriser les synergies entre les parties prenantes à la question d'adaptation (mutualisation des ressources, apprentissage par retours d'expériences, etc.);
- l'identification des acteurs en charge de la production et le transfert de l'information auprès des parties prenantes en regard des spécificités des besoins et des caractéristiques des territoires (notamment des enjeux du territoire, des échelles considérées et de la nature du public visé).

En ce qui concerne le deuxième angle d'analyse, soit celui portant sur les enseignements tirés de l'intégration des territoires du Québec et du Mexique, il apparaît en premier lieu des similitudes dans les intérêts et les démarches en regard des enjeux d'adaptation aux changements climatiques.

En plus d'alimenter, en diversité, les connaissances et outils qui ont été générés, le projet a contribué à initier une méthode de travail ainsi que l'utilisation et le partage des outils de modélisation qui soient plus systématiques entre les partenaires québécois et mexicains (complémentarité). Le réseau de collaborateurs Québec-Mexique s'intéressant aux questions de modélisation hydroclimatique s'est ainsi consolidé menant notamment à la signature d'une entente avec l'IMTA, visant à appuyer la mobilité entre les deux institutions et le développement de projets de recherche et de formation. De plus, des échanges récents avec la CONAGUA (janvier 2021) ont permis de convenir de l'établissement d'un agenda de thèmes d'intérêt commun au Québec et au Mexique autour desquels des échanges seraient organisés sur une base régulière.

Ceci étant, une mobilisation initiale d'acteurs québécois bénéficiant d'un réseau de collaborateurs universitaires mexicains a nécessité des démarches spécifiques pour présenter le projet aux collaborateurs mexicains et intégrer la collaboration dans leurs activités, notamment sur le plan de la mobilisation de ressources (matériel, personnels, étudiants). Au-delà des intérêts communs sur des problématiques de recherche en lien avec les aléas hydroclimatiques, il ressort la question de l'implication des organismes en charge de la gestion des ressources hydriques à l'échelle des bassins versants. Du côté québécois, le fait d'avoir pu bénéficier du contexte de la Rés-Alliance et des liens avec la communauté de pratique du bassin versant de la Saint-Régis a permis d'intégrer les préoccupations spécifiques à la démarche d'identification des mesures d'adaptation aux changements climatiques. Dès lors, dans une perspective de transposition des composantes considérées dans une approche de

recherche collaborative, il serait pertinent dans le futur d'intégrer des organismes à même d'exprimer les processus territoriaux spécifiques au contexte mexicain (exemple : les conseils de bassins versants). Ceci étant, la démarche doit être entreprise en toute considération du contexte socio-économique et politique du Mexique et des États et doit donc être initiée par les partenaires mexicains en collaboration avec ceux du Québec.

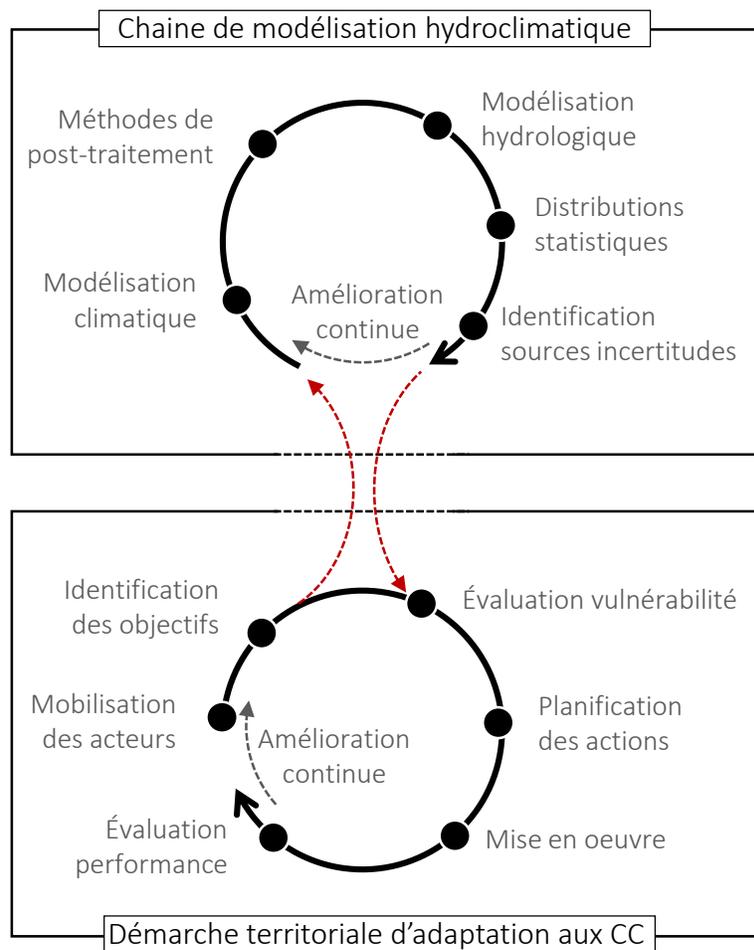


Figure 6.1 Schéma des processus spécifiques et des échanges d'informations entre les sous-systèmes « Chaîne de modélisation hydroclimatique » et « Démarche territoriale d'adaptation aux CC ».

7. Conclusion et recommandations

Le projet de recherche initié en 2016 aura été l'occasion de réunir un groupe de collaborateurs québécois et mexicains autour de questions associées à l'étude de l'impact des changements climatiques et à l'adaptation aux changements climatiques en lien avec la gestion de l'eau.

Les retombées de ce projet sont diverses et se situent à différents niveaux, tel que décrit ci-après.

Retombées en matière de formation de personnel hautement qualifié

Le projet a contribué à la formation d'une stagiaire postdoctorale d'origine mexicaine (inscrite à l'ÉTS); de deux étudiantes de doctorat (inscrites à l'ÉTS), l'une d'origine mexicaine et l'autre originaire de la France; et de sept étudiant(e)s de maîtrise, soit quatre d'origine québécoise, inscri(e)ts à l'ÉTS, et trois d'origine mexicaine, inscrit(e)s à l'Universidad Veracruzana au Mexique.

Tous ces jeunes gens ont participé aux échanges avec les partenaires du projet, tant québécois que mexicains. Tou(te)s les étudiant(e)s inscrit(e)s à l'ÉTS ont par ailleurs effectué au moins un déplacement au Mexique durant le projet. Ils (elles) ont réellement vécu l'expérience bilatérale. Cela aura certainement contribué à enrichir leur formation ainsi que leur développement sur le plan personnel. Leur enthousiasme, leur intérêt et leur niveau de motivation très élevés par rapport aux projets et activités qu'ils ont menés sont d'ailleurs dignes de mention et sont probablement des indicateurs de la valeur ajoutée de ce type de collaboration de recherche.

Retombées en matière scientifique

L'Axe I du projet est celui qui s'est particulièrement concentré sur les développements scientifiques alors que l'Axe II a permis l'application et le développement d'outils dans le but de répondre aux besoins des acteurs d'un territoire qui mettent en œuvre une démarche d'adaptation aux changements climatiques. Dans le cadre de l'Axe I, plusieurs éléments de modélisation, le long de la chaîne typiquement utilisée en études d'impacts, ont été l'objet de développements ou d'études approfondies. Il ressort, des travaux réalisés, les éléments suivants :

- Amélioration des connaissances quant à l'influence de la résolution spatiale du MRCC5 sur la simulation des crues, en climat historique, au Québec;
- Amélioration des connaissances sur les sources d'incertitudes associées à la modélisation des crues et des étiages au Québec et au Mexique, en climats historique et futur;
- Développement de nouvelles méthodes de pondération des simulations climatiques et des simulations hydrologiques;
- Amélioration des connaissances en modélisation hydrologique des crues à l'échelle temporelle sous-journalière;
- Développement d'une base de données de bassins mexicains sur lesquels une version récente du modèle hydrologique HYDROTEL est en place; cette base de données, utilisée dans le cadre du présent projet, demeure utilisable pour des travaux de recherche futurs;
- Amélioration des connaissances quant au comportement d'outils de modélisation hydrologique plus typiquement utilisés au Québec et quant au comportement du MRCC5 dans un large éventail de conditions hydroclimatiques, depuis des conditions nordiques jusqu'à des conditions tropicales;
- Intangible : apprentissages sur les méthodes et outils utilisés par les partenaires du Québec et ceux du Mexique en lien avec les enjeux et spécificités propres à chacun des territoires.

L'ensemble des développements effectués et des connaissances acquises sont à la disposition des collaborateurs du projet. Sur le plan plus opérationnel, la DEH et l'IMTA pourront les intégrer dans leurs outils de modélisation, pour la production d'Atlas hydroclimatiques par exemple. Le maintien d'un lien entre les chercheurs du projet et les collaborateurs (autres projets en cours, collaborations futures en cours de développement – voir ci-après) permettra d'en assurer le transfert.

Retombées pour le processus d'adaptation aux changements climatiques en gestion de l'eau

Les travaux de l'Axe II du projet, plus spécifiquement liés aux questions d'adaptation aux changements climatiques, ont généré les retombées suivantes :

- Le constat à l'effet que l'information à l'usage des acteurs relève en grande partie de paliers administratifs qui ne sont pas les mêmes au Québec et au Mexique, à savoir : municipalités et province au Québec, contre paliers fédéral et d'État au Mexique. Ce constat est tout à fait cohérent, d'une part, avec l'échelle à laquelle les analyses ont été menées au Québec et au Mexique (province versus pays) et, d'autre part, avec les paliers gouvernementaux desquels relève la mise en place de la gestion de l'eau par bassin versant (provincial versus fédéral);
- Le développement d'un outil d'analyse de sensibilité du territoire aux aléas hydroclimatiques. L'outil a été appliqué aux municipalités du bassin versant de la rivière St-Régis au Québec; il a également été adapté et appliqué à deux municipalités mexicaines. La nécessité d'adapter l'outil pour son application au Mexique est principalement expliquée par une distinction entre le Québec et le Mexique qui ressort des activités de l'Axe II : alors que l'application au Québec a été appuyée par la communauté de pratique Rés-Alliance du bassin versant de la rivière St-Régis, aucun équivalent de ce type de communauté n'existe au Mexique ce qui n'a pas permis de relever, auprès d'acteurs, les préoccupations pour les territoires analysés.

Au Québec, plus spécifiquement :

- Le développement d'un projet avec la municipalité de St-Isidore (faisant partie du bassin versant de la rivière St-Régis). Le projet, réalisé à travers les travaux de maîtrise d'Audrey Coulombe, s'est intéressé à l'élaboration d'une chaîne de modélisation climat-hydrologie-hydraulique dans un très petit bassin versants (2 km²) non jaugé aux prises avec des problématiques d'inondations et à l'analyse de solutions d'adaptation par une méthode multi-critères;
- Le développement d'un projet avec le ROBVQ via les travaux de maîtrise d'Allan Fontaine. Le projet, initié en 2020, vise à effectuer un retour sur les activités de la Rés-Alliance en identifiant, pour les huit communautés qui se sont impliquées, les similitudes, les différences et les complémentarités dans l'élaboration des plans d'action des différents territoires;
- La participation des chercheurs A. Poulin et M. Glaus à un projet initié par l'OBV SCABRIC – bassin versant de la rivière St-Régis et appuyé financièrement par le Fonds régions et ruralité (du Ministère des Affaires municipales et de l'habitation du Québec – MAMH). Ce projet vise à compléter et intégrer le plan d'action établi dans le cadre de la Rés-Alliance. Partant entre autres des résultats du projet d'Audrey Coulombe, il s'agira, d'une part, de développer une modélisation hydrologique et hydraulique intégrée à l'échelle du bassin versant, et d'autre part, d'intégrer l'expression des parties prenantes dans un processus d'analyse multi-critères construite sur la base des résultats de scénarios d'adaptation de l'étude d'Audrey Coulombe à l'échelle du bassin versant;
- Le développement d'un projet par l'OBV SCABRIC (participation de M. Glaus), soumis pour financement au programme Approche régionale et interrégionale (PAAR) du MAMH et impliquant la municipalité de St-Rémi. Le projet vise l'identification de mesures d'économie d'eau associées aux activités du secteur agricole.

Retombées en matière de collaboration entre le Québec et le Mexique

Les retombées suivantes permettront de maintenir et renforcer le lien de collaboration entre les partenaires québécois et mexicains du projet, et d'initier de nouvelles collaborations :

- La signature d'une entente entre l'ÉTS et l'IMTA, laquelle vise à favoriser la mobilité et le développement de projets conjoints entre les deux institutions. Les chercheurs de ces deux organisations pourront initier des projets d'envergures diverses impliquant en tout ou en partie les autres partenaires indiqués au Tableau 1.1, de même que des partenaires supplémentaires. Deux exemples de projets sont décrits aux points qui suivent;
- Le développement d'un projet qui sera soumis, pour financement, au FORDECTY (Fondo Institucional de Fomento Regional para el Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación) au cours de l'année 2021. Ce projet, piloté par l'IMTA, l'Université de Chiapas, et le Centro del cambio global y la sustentabilidad, et impliquant la participation de l'UV et de l'ÉTS, s'intéresse aux impacts des changements climatiques sur les sécheresses et les inondations dans un bassin versant du sud du Mexique à travers des volets climatique, hydrologique, écologique et social. La durée prévue du projet est de trois ans. Le bassin d'étude, Gijalva-Usumacinta, se trouve parmi les priorités d'étude au Mexique du fait notamment de la quantité de précipitations qu'il reçoit chaque année, qui est l'une des plus élevées d'Amérique latine, de sa localisation en zone accidentée et de la complexité de son réseau hydrographique, de sa biodiversité qui est reconnue comme l'une des plus riches à l'échelle de la planète. S'ajoute à ces éléments la croissance des activités humaines à l'échelle du bassin, lesquelles sont liées au développement de la production hydro-électrique, et au développement d'agriculture et d'activités d'élevage extensives;
- L'obtention d'un appui en nature de la part de l'organisation CORDEX pour un projet Flagship Pilot Study (CORDEX-FPS) d'une durée de cinq ans, piloté par l'IMTA, et impliquant la participation de l'ÉTS, de l'UV et d'Ouranos via des cosupervisions d'étudiants, au départ (voir aussi les recommandations ci-dessous). Le projet vise à effectuer une évaluation climatique des simulations CMIP6 à l'échelle de l'Amérique du Nord et ensuite à sélectionner des simulations qui serviront à piloter des modèles régionaux du climat en mode convection résolue pour des domaines spécifiques au Québec et au Mexique. Une évaluation climatique et hydrologique de ces simulations sera réalisée. Le projet a démarré officiellement en avril 2021.

Recommandations

À la lumière des retombées mentionnées ci-haut, il est recommandé de :

- Poursuivre les développements scientifiques en continuant de tirer profit des diversités territoriales et hydroclimatiques du Québec et du Mexique, tout en ciblant des défis communs aux deux territoires en matière de gestion de l'eau et propices aux apprentissages Québec → Mexique et Mexique → Québec. En ce sens, dans le cadre d'un atelier qui s'est tenu le 19 novembre 2021, la thématique des étiages et de l'adaptation dans un contexte de partage de l'eau est ressortie. Le Nord du Mexique, plus sec et aride, fait face de manière récurrente au manque d'eau et les organisations de bassins versants ont dû mettre en place des systèmes d'allocation de la ressource. Il y a là une occasion pertinente pour le Québec d'apprendre de ces pratiques en préparation à des étiages qui deviendront plus sévères avec le changement climatique et qui nécessiteront la mise en place de stratégies de partage de l'eau entre les divers usagers et, en amont, d'outils de modélisation adaptés. Ce genre de projet nécessitera et permettra, par ailleurs, l'établissement d'un lien entre les sous-systèmes « Chaîne de modélisation hydroclimatique » et « Démarche territoriale d'adaptation aux changements climatiques » (illustrés à la Figure 6.1);
- Tirer des apprentissages du projet FORDECTY, s'il est financé, justement en ce qui a trait au lien entre les deux sous-systèmes évoqué au point précédent. Il est prévu que le projet s'intéresse à

des questions telles que les stratégies d'adaptation générées par les acteurs locaux, la prise en compte des spécificités territoriales dans l'élaboration de politiques publiques pour faire face au changement climatique. Ce projet présente également une occasion d'ouverture sur un milieu preneur mexicain, avec lequel le lien qui serait établi pourrait être mis à profit dans le cadre de la collaboration Québec-Mexique en général;

- Chercher des occasions d'appui financier au projet CORDEX-FPS (au Québec comme au Mexique). Il pourrait être d'intérêt de cibler des programmes qui impliquent la participation d'usagers des résultats, comme par exemple le ROBVQ et/ou un ou des OBV;
- Poursuivre de la démarche de l'Axe II en intégrant des acteurs du territoire, tel que l'évoquent les éléments identifiés aux précédents points;
- Maintenir le lien entre les chercheurs et partenaires formant le noyau de cette collaboration. Ce « Dream team Québec-Mexique » est formé d'individus compétents, enthousiastes, motivés et avec qui nous avons eu beaucoup de plaisir à travailler et à échanger au cours des dernières années!

8. Références

Arsenault, R., Gatien, P., Renaud, B., Brissette, F. and Martel, J.L, 2015. A comparative analysis of 9 multi-model averaging approaches in hydrological continuous streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 529, pp.754-767.

Beck, H.E., Van Dijk, A.I., Levizzani, V., Schellekens, J., Miralles, D.G., Martens, B. and Roo, A.D. 2017. MSWEP: 3-hourly 0.25 global gridded precipitation (1979–2015) by merging gauge, satellite, and reanalysis data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(1), pp.589-615.

Bennett, J.C., Robertson, D.E., Ward, P.G., Hapuarachchi, H.P. and Wang, Q.J. 2016. Calibrating hourly rainfall-runoff models with daily forcings for streamflow forecasting applications in meso-scale catchments. *Environmental Modelling & Software*, 76, pp.20-36.

Bergeron, O. 2017. Grilles climatiques quotidiennes du Programme de surveillance du climat du Québec : guide d'utilisation (2016) / sous la coordination de la Direction du suivi de l'état de l'environnement du ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) ; rédaction, Onil Bergeron. — Version 2. — Québec (Québec).

Bleau N, Bisailon A, Duval V. 2018a. Inventaire et suivi de l'utilisation des ressources en adaptation des milieux urbains aux changements climatiques. Rapport présenté à Ouranos. Montréal : 38 p. + annexes. Disponible en ligne : <https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/RapportBisailon2018-2.pdf>. Consulté : avril 2020.

Bleau N, Bisailon A, Duval V. 2018b. Tableaux classification des ressources (Version finale). Disponible en ligne : <https://docs.google.com/spreadsheets/d/1dhCNfpY67PVn13anZ-z12AsRx1SjPHHgSmqq49D734/edit?ts=5b27c97f#gid=640544873>. Consulté : mars 2020.

Bours et al. 2013. Monitoring & evaluation for climate change adaptation: A synthesis of tools, frameworks and approaches. 67p. Disponible en ligne: https://ora.ox.ac.uk/objects/uuid:8a5b5ca6-aeb6-494f-98e5-371f08659008/download_file?safe_filename=SEA-change-UKCIP-MandE-review.pdf&file_format=application%2Fpdf&type_of_work=Report

Chen, J., Brissette, F.P., Chaumont, D. and Braun, M., 2013. Performance and uncertainty evaluation of empirical downscaling methods in quantifying the climate change impacts on hydrology over two North American river basins. *Journal of Hydrology*, 479, pp.200-214.

Climate-Eval (2015). Good practice study on Principles for Indicator Development, Selection, and Use in Climate Change Adaptation: Monitoring and Evaluation. Climate-Eval Community of Practice. Disponible en ligne: <https://www.eartheval.org/sites/ceval/files/studies/Good-Practice-Study.pdf>

Collet, L., Beevers, L. and Prudhomme, C., 2017. Assessing the impact of climate change and extreme value uncertainty to extreme flows across Great Britain. *Water*, 9(2), p.103.

Coron, L., Andreassian, V., Perrin, C., Lerat, J., Vaze, J., Bourqui, M. and Hendrickx, F., 2012. Crash testing hydrological models in contrasted climate conditions: An experiment on 216 Australian catchments. *Water Resources Research*, 48(5).

Croke, B., Andrew, F., Spate, J. and Cuddy, S., 2005. IHACRES toolkit Disponible en ligne : www.toolkit.net.au/ihacres.

Das, J., Treesa, A. and Umamahesh, N.V., 2018. Modelling impacts of climate change on a river basin: analysis of uncertainty using REA & possibilistic approach. *Water Resources Management*, 32(15), pp.4833-4852.

Dakhlaoui, H., Ruelland, D. and Tramblay, Y., 2019. A bootstrap-based differential split-sample test to assess the transferability of conceptual rainfall-runoff models under past and future climate variability. *Journal of Hydrology*, 575, pp.470-486.

Dakhlaoui, H., Ruelland, D., Tramblay, Y. and Bargaoui, Z., 2017. Evaluating the robustness of conceptual rainfall-runoff models under climate variability in northern Tunisia. *Journal of hydrology*, 550, pp.201-217.

Déqué, M., Rowell, D.P., Lüthi, D., Giorgi, F., Christensen, J.H., Rockel, B., Jacob, D., Kjellström, E., De Castro, M. and van den Hurk, B.J.J.M., 2007. An intercomparison of regional climate simulations for Europe: assessing uncertainties in model projections. *Climatic Change*, 81(1), pp.53-70.

ENAP, Ouranos, Ville de Montréal 2017. Carte du réseau des acteurs œuvrant pour l'adaptation aux changements climatiques et le développement de la résilience à Montréal. Disponible en ligne : <https://embed.kumu.io/bcc204b997d17c4a697e12b0925cd046#reseau-complet-en-adaptation-aux-cc-et-resilience>. Consulté 26 janvier 2021.

England Jr, J.F., Cohn, T.A., Faber, B.A., Stedinger, J.R., Thomas Jr, W.O., Veilleux, A.G., Kiang, J.E. and Mason Jr, R.R., 2019. *Guidelines for determining flood flow frequency—Bulletin 17C* (No. 4-B5). US Geological Survey.

Fortin, J.P., Turcotte, R., Massicotte, S., Moussa, R., Fitzback, J. and Villeneuve, J.P., 2001. Distributed watershed model compatible with remote sensing and GIS data. I: Description of model. *Journal of Hydrologic Engineering*, 6(2), pp.91-99.

Fortin, V., and Turcotte, R. 2007. Le modèle hydrologique MOHYSE (bases théoriques et manuel de l'utilisateur). Université du Québec à Montréal

GIEC (2014). Changements climatiques 2014. Incidences, adaptation et vulnérabilité – Résumé à l'intention des décideurs. Contribution du Groupe de travail II au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [sous la direction de Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea et L.L. White]. Organisation météorologique mondiale, Genève (Suisse), 34p. disponible en ligne : https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/ar5_wgII_spm_fr.pdf

Hailegeorgis, T.T. and Alfredsen, K., 2017. Regional flood frequency analysis and prediction in ungauged basins including estimation of major uncertainties for mid-Norway. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 9, pp.104-126.

Hailegeorgis, T.T. and Alfredsen, K., 2015. Comparative evaluation of performances of different conceptualisations of distributed HBV runoff response routines for prediction of hourly streamflow in boreal mountainous catchments. *Hydrology Research*, 46(4), pp.607-628.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D. and Simmons, A., 2020. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), pp.1999-2049.

Huang, M., Wang, Z., Chen, T. (2019). Analysis on the theory and practice of industrial symbiosis based on bibliometrics and social network analysis. *Journal of Cleaner Production* 213, 956–967. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.131>

Huot, P.L., Poulin, A., Audet, C. and Alarie, S., 2019. A hybrid optimization approach for efficient calibration of computationally intensive hydrological models. *Hydrological Sciences Journal*, 64(10), pp.1204-1222.

Kling, H., Fuchs, M. and Paulin, M., 2012. Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *Journal of Hydrology*, 424, pp.264-277.

Livneh, B., Bohn, T.J., Pierce, D.W., Munoz-Arriola, F., Nijssen, B., Vose, R., Cayan, D.R. and Brekke, L., 2015. A spatially comprehensive, hydrometeorological data set for Mexico, the US, and Southern Canada 1950–2013. *Scientific data*, 2(1), pp.1-12.

Mathevet, T., 2005. *Quels modèles pluie-débit globaux au pas de temps horaire? Développements empiriques et comparaison de modèles sur un large échantillon de bassins versants* (Doctoral dissertation, Doctorat spécialité Sciences de l'eau, ENGREF Paris).

Meresa, H.K. and Romanowicz, R.J., 2017. The critical role of uncertainty in projections of hydrological extremes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(8), pp.4245-4258.

Mislove, A., Marcon, M., Gummadi, K.P., Druschel, P., Bhattacharjee, B. 2007. Measurement and analysis of online social networks, in: Proceedings of the 7th ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement, IMC '07. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, pp. 29–42. <https://doi.org/10.1145/1298306.1298311>

Motavita, D.F., Chow, R., Guthke, A. and Nowak, W., 2019. The comprehensive differential split-sample test: A stress-test for hydrological model robustness under climate variability. *Journal of Hydrology*, 573, pp.501-515.

Perrin, C., Michel, C. and Andréassian, V., 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of hydrology*, 279(1-4), pp.275-289.

ROBVQ (2018). Évaluation des vulnérabilités des usages associés à l'eau aux changements climatiques. 19p. Disponible en ligne : https://robvq.qc.ca/wp-content/uploads/2020/11/evaluation_vulnerabilite.pdf

Saqr, M., Alamro, A. 2019. The role of social network analysis as a learning analytics tool in online problem based learning. *BMC Medical Education* 19, 160. <https://doi.org/10.1186/s12909-019-1599-6>

Seiller, G. and Anctil, F., 2016. How do potential evapotranspiration formulas influence hydrological projections?. *Hydrological Sciences Journal*, 61(12), pp.2249-2266.

Seiller, G., Anctil, F. and Perrin, C., 2012. Multimodel evaluation of twenty lumped hydrological models under contrasted climate conditions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(4), pp.1171-1189.

Statistique Canada. 2017. Delson, V [Subdivision de recensement], Québec et Québec [Province] – Profil du recensement. Recensement de 2016. Produit n°98-316-X2016001 au catalogue de Statistique Canada. Ottawa. Diffusé le 29 novembre 2017.

St-Hilaire, A., Boucher, M.A., Chebana, F., Ouellet-Proulx, S., Zhou, Q.X., Larabi, S., Dugdale, S. and Latraverse, M., 2015, April. Breathing a new life to an older model: The CEQUEAU tool for flow and water temperature simulations and forecasting. In *Proceedings of the 22nd Canadian Hydrotechnical Conference*.

Thomas I., Bleau N., Soto Abasolo P., Desjardin-Dutil G., Fuamba M., Kadi S., 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, Rapport final pour Ouranos, 137 p

Thiemeßl, M.J., Gobiet, A. and Heinrich, G., 2012. Empirical-statistical downscaling and error correction of regional climate models and its impact on the climate change signal. *Climatic Change*, 112(2), pp.449-468.

Tolson, B.A. and Shoemaker, C.A., 2007. Dynamically dimensioned search algorithm for computationally efficient watershed model calibration. *Water Resources Research*, 43(1).

Van Esse, W.R., Perrin, C., Booij, M.J., Augustijn, D.C., Fenicia, F., Kavetski, D. and Lobligois, F., 2013. The influence of conceptual model structure on model performance: a comparative study for 237 French catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(10), pp.4227-4239.

Wang, H.M., Chen, J., Xu, C.Y., Chen, H., Guo, S., Xie, P. and Li, X., 2019. Does the weighting of climate simulations result in a better quantification of hydrological impacts?. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(10), pp.4033-4050.

Liste des Annexes

Annexe A

Castaneda-Gonzalez, M., Poulin, A., Romero-Lopez, R., Arsenault, R., Brissette, F. and Turcotte, R., 2019. Sensitivity of seasonal flood simulations to regional climate model spatial resolution. *Climate Dynamics*, 53(7), pp.4337-4354.

Annexe B

Dallaire, G., Poulin, A., Arsenault, R. and Brissette, F. (2021) Uncertainty of potential evapotranspiration modelling in climate change impact studies on low flows in North America, *Hydrological Sciences Journal*, 1:14.

Annexe C

Territoires à l'étude dans le cadre de l'Axe I du projet

Annexe D

Rapport du projet de maîtrise de Laurence Blondeau-Bouchard

Annexe A – Article de Castañeda Gonzalez et al. (2019)



Sensitivity of seasonal flood simulations to regional climate model spatial resolution

Mariana Castaneda-Gonzalez¹ · Annie Poulin¹ · Rabindranath Romero-Lopez² · Richard Arsenault¹ · François Brissette¹ · Richard Turcotte³

Received: 14 May 2018 / Accepted: 23 April 2019 / Published online: 3 May 2019
© Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2019

Abstract

The potential impacts of floods are of significant concern to our modern society raising the need to identify and quantify all the uncertainties that can impact their simulations. Climate simulations at finer spatial resolutions are expected to bring more confidence in these hydrological simulations. However, the impact of the increasing spatial resolutions of climate simulations on floods simulations has to be evaluated. To address this issue, this paper assesses the sensitivity of summer–fall flood simulations to the Canadian Regional Climate Model (CRCM) grid resolution. Three climate simulations issued from the fifth version of the CRCM (CRCM5) driven by the ERA-Interim reanalysis at 0.44°, 0.22° and 0.11° resolutions are analysed at a daily time step for the 1981–2010 period. Raw CRCM5 precipitation and temperature outputs are used as inputs in the simple lumped conceptual hydrological model MOHYSE to simulate streamflows over 50 Quebec (Canada) basins. Summer–fall flooding is analysed by estimating four flood indicators: the 2-year, 5-year, 10-year and 20-year return periods from the CRCM5-driven streamflows. The results show systematic impacts of spatial resolution on CRCM5 outputs and seasonal flood simulations. Floods simulated with coarser climate datasets present smaller peak discharges than those simulated with the finer climate outputs. Smaller catchments show larger sensitivity to spatial resolution as more detail can be obtained from the finer grids. Overall, this work contributes to understanding the sensitivity of streamflow modelling to the climate model's resolution, highlighting yet another uncertainty source to consider in hydrological climate change impact studies.

Keywords CRCM5 · Floods · MOHYSE · Return periods · Spatial resolution

1 Introduction

Extreme hydrological events such as floods constitute a recurrent problem that can cause pronounced social, economic, and environmental losses worldwide. Consequently, the number of studies evaluating the potential effects of

climate change on flooding has progressively increased (Dankers and Feyen 2008; Giuntoli et al. 2015; Kundzewicz et al. 2017; Veijalainen et al. 2010; Wehner et al. 2017). However, because there is only limited evidence and considerable uncertainty, confidence in projections of future changes in flood magnitude and frequency is still low (Kundzewicz et al. 2014, 2017). The literature identifies many sources of uncertainty in the hydroclimatic modelling processes used to evaluate climate change impacts on hydrology, and recognizes greenhouse emission scenarios, global climate model structures, downscaling methods, impact (or hydrological) models and natural climate variability as some of the most important sources of uncertainty (Falloon et al. 2014; Giuntoli et al. 2015; Kundzewicz et al. 2018; Wilby 2005).

Most studies generally considered the climate model to constitute the most significant source of uncertainty (Arnell and Lloyd-Hughes 2014; Hagemann et al. 2013; Wilby and Harris 2006). However, recent studies have analysed other

Electronic supplementary material The online version of this article (<https://doi.org/10.1007/s00382-019-04789-y>) contains supplementary material, which is available to authorized users.

✉ Mariana Castaneda-Gonzalez
mariana.castaneda-gonzalez.1@ens.etsmtl.ca

¹ École de technologie supérieure, 1100 Notre-Dame Street West, Montreal H3C 1K3, Canada

² Universidad Veracruzana, Lomas del Estadio S/N, Zona Universitaria, Xalapa 91000, Mexico

³ Ministère du Développement durable, Environnement et Lutte contre les changements climatiques, 675 boulevard René Lévesque Est, Quebec, QC G1R 5V7, Canada

sources of uncertainty related to General Circulation Model (GCMs) and Regional Climate Model (RCMs) configurations. Roy et al. (2014) showed that the largest source of uncertainty in seasonal simulations of precipitation extremes came from the climate model selection, the domain size and the member selection, each source with seasonal uncertainty differences. Another example is the impact of spectral nudging, a technique developed to ensure that the RCM simulations remain close to the driving fields during the downscaling process (Biner et al. 2000; Miguez-Macho et al. 2004; Storch et al. 2000). Different studies have analysed the impacts of spectral nudging reaching contrasting conclusions (Mearns et al. 2018; Separovic et al. 2012). For example, Alexandru (2009) confirmed ‘side-effects’ such as the reduction of precipitation extremes, while other studies recommend its application to reproduce daily weather regimes, seasonal anomalies and large-scale conditions (Lucas-Picher et al. 2015a; Sanchez-Gomez et al. 2009). Thus, additional uncertainties and impacts can be expected when spectral nudging is applied to RCM simulations. It has been observed that other sources of uncertainty can also be present in the hydro-climatological modelling chain. Therefore, the research community is continuously looking to identify and quantify the types of uncertainty that are most important for each particular impact study (Beven 2016; Hawkins et al. 2013; Vetter et al. 2017).

During the last decade, GCMs have been downscaled with higher resolution RCMs. This has led to improvements in the representation of climate variables within the hydrological cycle, and suggested that using RCMs was more adequate for studies at local scales (Terai et al. 2017; Teutschbein and Seibert 2010; Wehner et al. 2014; Wehner et al. 2010). Many studies have examined how the increasing spatial resolution of RCMs impacts climate outputs (Chan et al. 2013; Mahajan et al. 2015; Terai et al. 2017; Wehner et al. 2010, 2014; Zeng et al. 2016) showing strong sensitivities to resolution changes. Overall, finer precipitation and temperature simulations were closer to observations. However, these improvements were mixed and inconsistent as mean statistics showed to be more realistic in coarser resolutions over some regions. Some studies have evaluated the effects of finer RCM grids on precipitation simulations, presenting evidence of the commonly named “added value” from the use of finer spatial resolutions to simulate extreme climate events (Curry et al. 2016b; Lucas-Picher et al. 2016). Recently, very high resolution RCM simulations (kilometer-scale) known as *convection-permitting* have been tested in different regions of the world (Kendon et al. 2017; Prein et al. 2015; Sandvik et al. 2018). The high-resolutions (e.g., 2–10 km) allow convective storms to be better represented, yet the added value is still inconsistent and variable depending on spatial heterogeneities (i.e., topography) and temporal scales (Ekström and Gilleland 2017; Prein et al. 2013, 2015).

Discrepancies have also been found in the effects of spatial resolution on other variables such as temperature. For example, studies have shown reductions in temperature biases when using finer spatial resolutions, but at the expense of a decrease in variability (Hertwig et al. 2015; Klavans et al. 2017). These results show that the refinement of spatial resolution brings additional uncertainties which must be taken into account in climate modelling.

As science and computing resources evolve, there is a clear trend towards a finer spatial resolution for both GCMs and RCMs. As observed in climate model outputs, it is also expected that finer resolutions will modify and improve the representation of the hydrological processes for studies at the basin scale. Regional studies at the basin scale typically use GCM or RCM climate projections as inputs to hydrological models to produce estimates of current and future streamflows and to analyse uncertainties associated with the simulation process. In North America, the Canadian Regional Climate Model version 5 (CRCM5) outputs have been used to simulate flood events (Lucas-Picher et al. 2015b; Teufel et al. 2017). These studies showed that CRCM5 using fine grids (0.09° and 0.11°) was able to reproduce spatio-temporal features of particular extreme events in Canada yet difficulties were observed to represent the peak discharges. Other studies have focused on modelling floods under future climate change projections and the quantification of the uncertainties involved (Alfieri et al. 2015; Arnell and Lloyd-Hughes 2014; Dankers et al. 2014; Das and Umamahesh 2018; Roudier et al. 2016; Wasko and Sharma 2017). However, the impact of varying horizontal resolution has been neglected by using the finest climate simulations available. Studies at local scales using climate simulations can be found in large numbers in different regions (Chen et al. 2011; Graham et al. 2007; Kundzewicz et al. 2014; Minville et al. 2008; Naz et al. 2016; Riboust and Brissette 2015; Trudel et al. 2017) compared to the much fewer studies focusing on the analysis of RCM spatial resolution effects on streamflow simulations, and particularly on hydrological extremes such as floods. Among the latter studies, Dankers et al. (2007) evaluated high resolution RCM simulations (12 km and 50 km) over a European river basin, showing a generally better representation of precipitation patterns and extreme events from finer simulations when compared to meteorological observations. However, no clear improvements or considerable differences were found in streamflow simulations at various gauging stations. On the other hand, at the sub-basin scale, better simulations of extreme hydrological events were observed when using high resolution RCM data. Shortly after, a climate change impact study on flood hazards over Europe performed by Dankers and Feyen (2008) confirmed the mixed impacts of spatial resolutions previously obtained in Dankers et al. (2007). At the regional scale, Graham et al. (2007) investigated how the use

of different RCM simulations affected hydrological changes in the Lule River Basin in northern Sweden. Although the paper focused on approaches for transferring the signal of climate change to hydrological models, considerable seasonal differences were observed when using finer resolutions (25 against 50 km resolutions). However, the benefits of using higher resolution regarding peak flows were still inconclusive. Focusing on the simulation of flood events, Lobligeois et al. (2014) investigated the impacts of higher resolution rainfall data on streamflow simulations over a diversity of catchments (181 in all) in France, and yet found no systematic impact among them. It was concluded that the hydrological response was highly variable between catchments, depending on their size and the specific characteristics of each particular rainfall event. More recently, Mendoza et al. (2016) assessed the effects of RCM simulations at three different spatial resolutions (4 km, 12 km and 36 km), as well as their spatial aggregation on hydrological projections, over three catchments of the Colorado River Basin in the United States. Their results suggested that the RCM spatial resolution had significant effects on mean annual runoff projections, which were shown to be larger than the effects of the spatially aggregated climate data. Moreover, in line with Lobligeois et al. (2014)'s results, improvements in streamflow simulation were observed in the largest catchments where the most heterogeneous precipitation patterns were found.

These previous studies provided a wide range of results concerning the impact of RCM spatial resolution on both climate outputs and streamflow simulations. Of particular note, these studies do not show any systematic impact of spatial resolution on streamflow simulation, and especially on flooding events. The differences between methodologies and selected evaluation approaches in the previous studies make it difficult to assess the effects of finer climate data on flood simulations. It is also important to mention that all previous studies compared the streamflow simulations against observations while attempting to pinpoint the potential added value of finer spatial resolution. The use of an observational database induces many challenges (e.g., measurement errors, necessity to bias-correct climate model outputs) and additional uncertainties to take into account (Kundzewicz et al. 2017).

To address these different issues, this paper aims mainly to analyse the sensitivity of flood simulations to changes in the spatial resolution of CRCM5 outputs. The focus of the paper is on extreme rainfall events, occurring in the summer–fall seasons, which are expected to be better represented in finer resolutions, and on the floods directly related to these extreme events. Streamflow simulations for 50 river basins located in the southern province of Quebec are generated with a hydrological model fed with climate model precipitation and temperature outputs at three different

spatial resolutions (0.44°, 0.22° and 0.11°). Then, four flood indicators based on 2, 5, 10, and 20-year return periods are computed. The impact of CRCM5 spatial resolution on precipitation and temperature outputs (entire Quebec province territory) on simulated streamflows and on the flood indicators is then investigated. In the following section, the study area and the data used are described. The methodology is described in Sect. 3. Section 4 presents the main results and analysis, and discussion and conclusions are presented in Sect. 5.

2 Study area and data

2.1 Study area

This study was carried out over 50 river basins in central and southern Quebec, Canada. All 50 river basins are located within the Quebec computational domain of the CRCM5. Figure 1 shows the study area and the mean annual precipitation of each river basin, which ranges from 800 to 1400 mm per year. The river basins were selected to have a diversity of sizes ranging from 512 to 18,983 km² covering a total area of 176,842 km². They are all subject to snow accumulation as the main factor leading to flooding during the winter–spring period along with rain-on-snow events and convective storms during the summer–fall season, annual minimum and maximum temperatures are – 23.5 and + 21 °C averaged on all watersheds.

2.2 Data

2.2.1 Observed data

For this study, observed and RCM datasets were used. Observed data consisted of meteorological and hydrometric datasets. The observed meteorological data included daily maximum temperature, minimum temperature and precipitation values provided by the *Direction de l'expertise hydrique* (DEH) unit of Québec's *Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques* (MDDELCC). The meteorological database was derived by interpolating (simple kriging) observations from 971 stations operated by the MDDELCC and from 21 stations operated by Rio Tinto, a private hydro-power and metal smelting company. The interpolated dataset created a grid of 0.1° (≈ 11 km) resolution covering the domain from 43° to 55° latitude and 60°W to 80°W longitude. The observed hydrometric data consisted of daily streamflow at the river basin outlets. The database was obtained from the *Banque de Données Hydriques* (BDH) of the DEH on a daily time step for the 50 hydrometric stations. This database covered the 1969–2010 period. For each

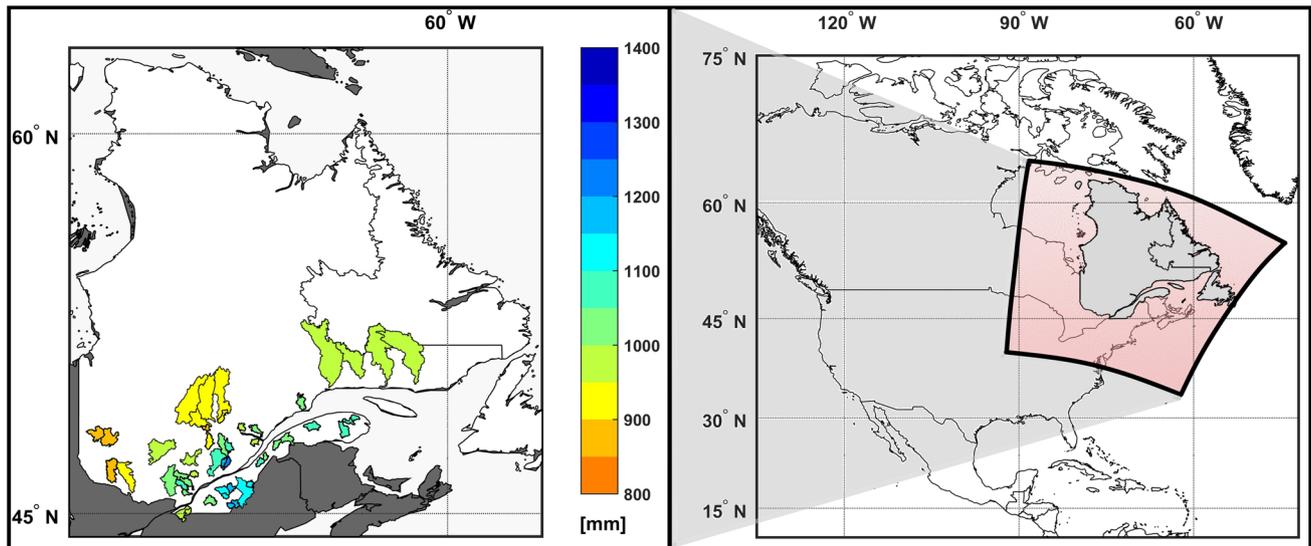


Fig. 1 Location and mean annual precipitation (mm) of the 50 river basins used in this study. The Quebec computational domain of the CRCM5 is presented in light red

basin, the common intersection between all hydroclimatic data was used. The minimum intersection length was at least 12 years.

2.2.2 RCM data

The RCM datasets consisted of minimum and maximum temperatures and precipitation available at a daily time step, and were all provided by the Ouranos Consortium on Regional Climatology and Adaptation. These climate datasets were issued from the CRCM5, developed at the *Centre pour l'Étude et la Simulation du Climat à l'Échelle Régionale* (ESCER) at the *Université du Québec à Montréal* (UQÀM) with the collaboration of Environment and Climate Change Canada (ECCC) (Côté et al. 1998; Irambona et al. 2016; Lucas-Picher et al. 2016; Martynov et al. 2013). The CRCM5 is based on a limited-area version of the Global Environment Multiscale (GEM) model used for Numerical Weather Prediction at ECCC (Côté et al. 1998; Martynov et al. 2013). Regarding the hydrological cycle, the CRCM5 physics package consists of deep and shallow convection schemes (Kain and Fritsch 1990; Kuo 1965; Teufel et al. 2017). A more detailed description can be found in Separovic et al. (2013) and in Martynov et al. (2013).

The three simulations used in this paper were performed at three different spatial resolutions, covering the 1981–2010 period, and using the same driver, namely, the ERA-Interim reanalysis, as well as the same domain (Quebec domain), as presented in Table 1. In other words, the only difference between the model simulations was the spatial resolution, which therefore allowed a targeted sensitivity analysis. Figure 2 shows the different elevation (m a.s.l.; upper panel

Table 1 Description of the CRCM5 climate datasets used in this study

Acronym	Version	Driver	Domain	Resolution
0.11°	5 v3331	ERA-Interim 75	Quebec	0.11° ≈ 12 km
0.22°	5 v3331	ERA-Interim 75	Quebec	0.22° ≈ 24 km
0.44°	5 v3331	ERA-Interim 75	Quebec	0.44° ≈ 48 km

a) and the land area fraction (%; lower panel b) of the three simulations at different resolutions. All simulations were performed without spectral nudging over the Quebec domain.

3 Methodology

This study analyses the sensitivity of the summer and fall flood simulations to changes in the RCM spatial resolution. The methodology consists of three parts. The first part involves a comparison between climate simulations (temperature and precipitation) with different spatial resolutions to evaluate the impact on RCM outputs. The second part deals with the hydrological modelling processes needed to generate the RCM-driven streamflow simulations. Finally, the third part addresses the seasonal (summer–fall) flood simulation analysis using the 2-year, 5-year, 10-year and 20-year return periods as flood indicators. Figure 3 presents an overview of the methodology used for this study. As shown in Fig. 3, it is important to stress that observations are only used in this study to calibrate the hydrological model. Once calibration is complete, the rest of the work

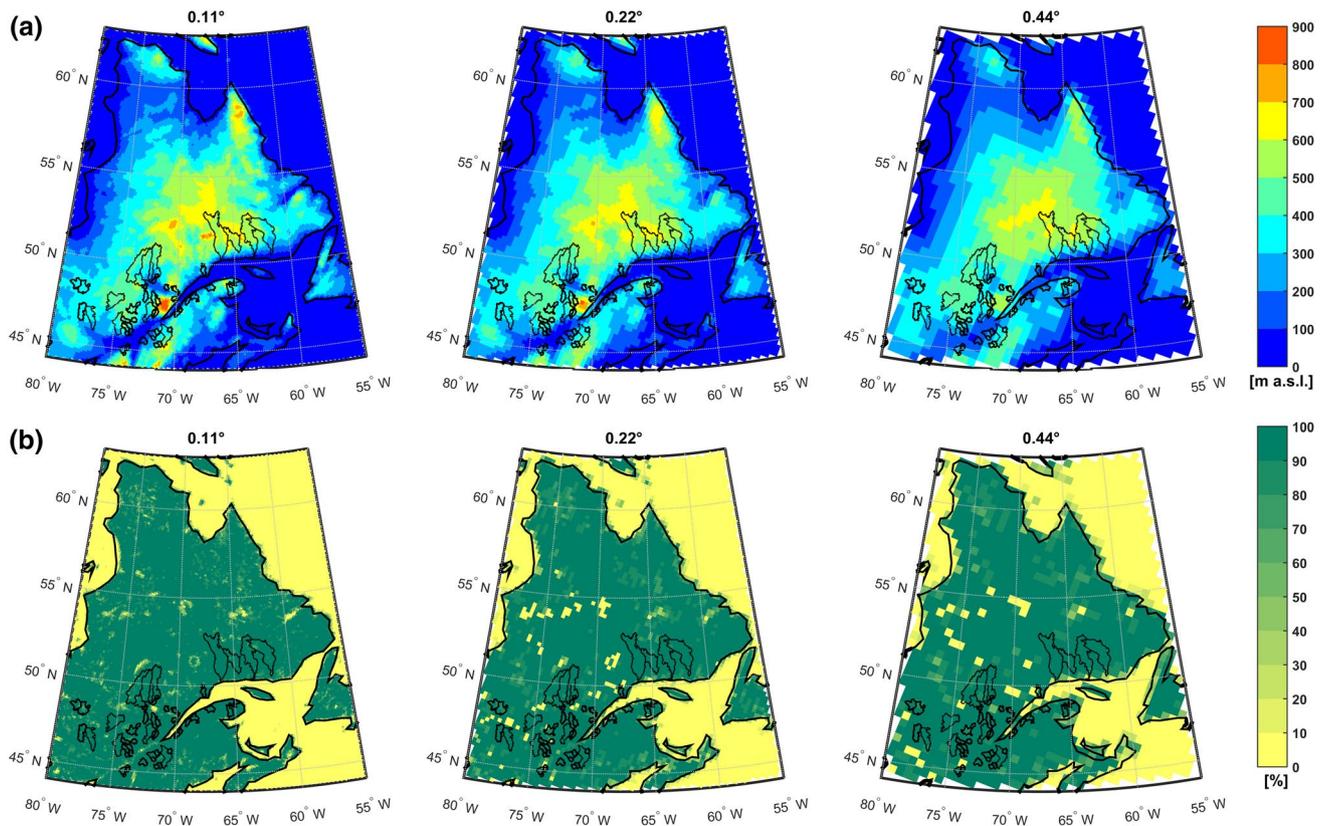


Fig. 2 Elevation (m a.s.l.) and land area fraction (%) of the three CRCM5 simulations with different resolutions. The upper panels **a** show the elevations at 0.11°, 0.22° and 0.44° resolutions. The lower panels **b** show the land area fraction at 0.11°, 0.22° and 0.44° resolutions

is performed using only model data in an intercomparison framework. Comparing against observations would demand some form of bias correction, which would largely remove differences between model outputs at different resolutions, and that would be detrimental to the main objective of this study. This will be further discussed later.

3.1 Climate simulations intercomparison

The first step of the methodology consists in evaluating the impacts of the RCM spatial resolutions (0.44°, 0.22° and 0.11°) on climate outputs (temperature and precipitation). The assessment is performed by comparing the differences between two climate simulations with different resolutions. Two comparisons are performed between the three climate datasets. The first intercomparison is performed between the 0.22° and the 0.11° resolution datasets (presented as 0.22°/0.11°), where the 0.11° simulation is used as the reference dataset. The second intercomparison is performed between the 0.44° and the 0.11° resolution datasets (presented as 0.44°/0.11°), also using the 0.11° simulation as the reference to directly compare the 0.22°/0.11° with the 0.44°/0.11°. These two intercomparisons are performed for both temperature and precipitation. As observed in the

intercomparison configuration, the finer dataset (0.11°) is compared with the coarser datasets (0.22° and 0.44°). The purpose of this paper is to compare the coarser datasets to the finer dataset to quantify the potential ‘added value’ of the higher spatial resolution. For this reason the coarser (and older) datasets (0.22° and 0.44°) were compared against the finer (and latest) dataset (i.e., 0.11°). To that end, the 0.22° and 0.44° resolution datasets are downscaled at the resolution of the higher dataset (0.11°), creating a grid of the same size to allow the intercomparisons to be carried out between each grid point directly. The RCM datasets at different resolutions share the same geographical projection and grid structure, so the downscaling is simply performed by using the same value of the coarser dataset for each divided grid cell to match the finer dataset.

Performance statistics are computed to evaluate the differences between the climate simulations. Three metrics are used to evaluate the RCM outputs during the summer seasons (June, July and August) and fall seasons (September, October and November): the seasonal bias for temperature, the seasonal relative bias for precipitation, and the variance ratio for both temperature and precipitation simulations.

For the seasonal bias and seasonal relative bias, the comparisons are performed using the mean seasonal values for

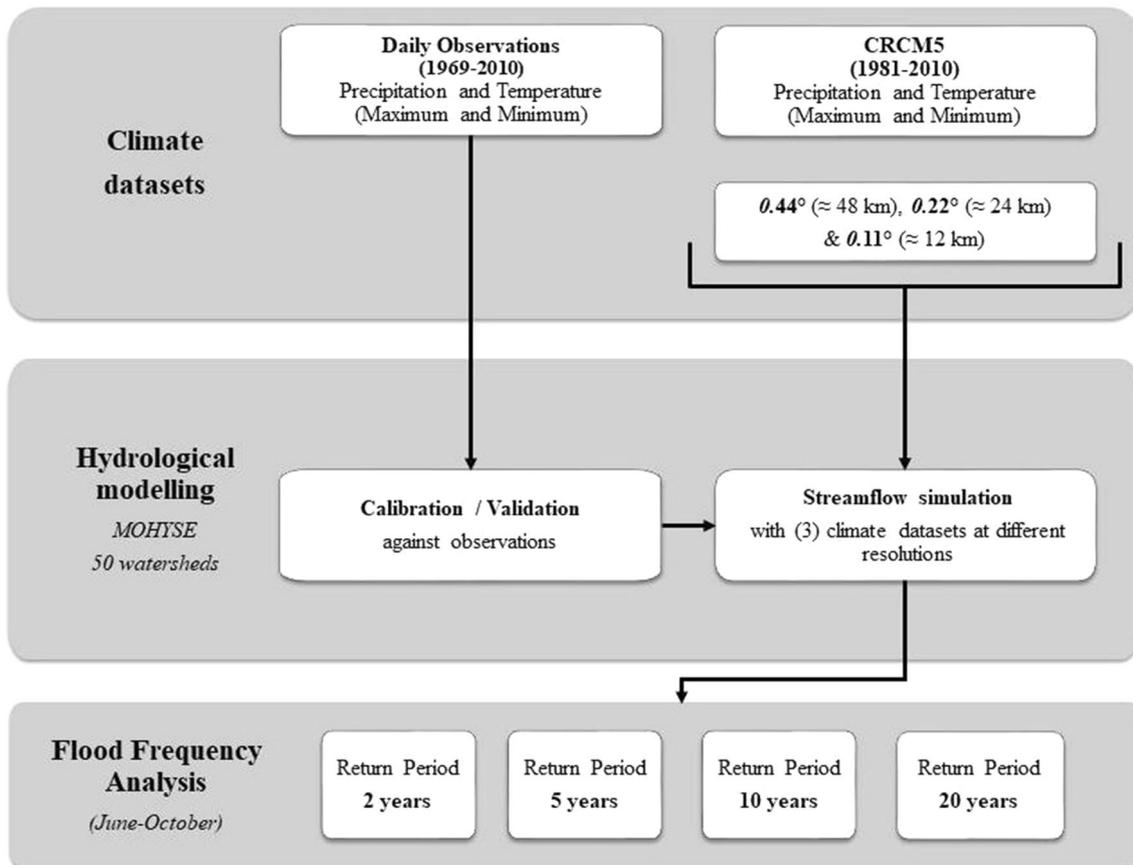


Fig. 3 Overview of this project's research methodology

temperature and precipitation datasets. The mean seasonal temperature (\bar{T}) and the mean seasonal precipitation (\bar{P}) are calculated as follows:

$$\bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^{N_y} \sum_{j=1}^{N_s} T_{ij}}{N_y N_s} \quad (1)$$

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^{N_y} \sum_{j=1}^{N_s} P_{ij}}{N_y N_s} \quad (2)$$

where T_{ij} and P_{ij} are the daily values of temperature and precipitation, N_s is the number of days of the season and N_y is the number of years of the full time series. The leap year day is removed from all the datasets.

The temperature seasonal bias is calculated between the mean seasonal temperatures of a given dataset x (i.e., 0.22° or 0.44° resolution dataset), named \bar{T}_x , and the mean seasonal temperatures of a reference dataset y (i.e., 0.11° resolution dataset), named \bar{T}_y , as follows:

$$B_T = \bar{T}_x - \bar{T}_y \quad (3)$$

The precipitation seasonal relative bias is calculated between the mean seasonal precipitations of a given dataset x (i.e., 0.22° or 0.44° resolution dataset), named \bar{P}_x , and the mean seasonal precipitations of the reference dataset y (i.e., 0.11° resolution dataset), named \bar{P}_y , as follows:

$$B_{P_{rel}} (\%) = \frac{\bar{P}_x - \bar{P}_y}{\bar{P}_y} \times 100\% \quad (4)$$

The ratio of the variances is the third metric used to evaluate the RCM outputs. This metric indicates whether the spatial resolution of the RCM impacts the variability of temperature and precipitation data, and the frequency of their seasonal extremes. The leap year day is also removed from the datasets. The seasonal variance (σ^2) ratio (temperature or precipitation) is then calculated between the mean variance of a given dataset x (i.e., 0.22° or 0.44° resolution dataset), named $\bar{\sigma}_x^2$, and the mean variance of a reference dataset y (i.e., 0.11° resolution dataset), named $\bar{\sigma}_y^2$, as follows:

$$\text{Ratio of the variances} = \frac{\bar{\sigma}_x^2}{\bar{\sigma}_y^2} \quad (5)$$

These metrics were selected to quantify the differences between the climate simulations with different spatial resolutions to evaluate their impacts and differences. Thus, it is important to recall that no comparison is made with actual observations.

3.2 Hydrological modelling

The hydrological modelling is performed by the simple lumped conceptual hydrological model, MOHYSE. This model has been largely used in research over the province of Quebec and was selected due to its availability, simplicity and relatively low computing resource requirements.

3.2.1 Description of the hydrological model

The MOHYSE model is a simple lumped conceptual model with ten parameters, which was first developed by Fortin and Turcotte (2006). The model has been used in different studies over Canadian watersheds, such as those by Velázquez et al. (2010), Arsenault et al. (2015) and Arsenault and Brisette (2016). MOHYSE simulates the main hydrological processes (e.g., potential evapotranspiration and snow melting and accumulation), and can be run on different time scales (from sub-daily to multiple days). The required inputs consist of mean daily temperatures and total daily precipitation (i.e., rain and snow), which are averaged over the basin area.

3.2.2 Calibration and validation

MOHYSE has ten parameters, which were automatically calibrated using the Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy (CMAES) (Hansen and Ostermeier 1997). This optimization algorithm was selected due to the good results presented by Arsenault et al. (2014) in the calibration of MOHYSE over different catchments. The hydrological model was calibrated in the odd years for the different available hydroclimatic periods for each watershed. This, as previously described in Sect. 2.2 consists of a minimum intersection length of 12 years between the 1969–2010 period. The hydroclimatic periods used for each watershed are included in the additional Online Resource 1. A validation was then performed in the even years for each of the 50 river basins. This approach has the disadvantage of requiring the calculation of streamflows for the entire time period during calibration, even though only the odd years are used to compute the objective function (OF). However, it has the great advantage of eliminating problems linked to natural climatic variability and anthropic climate change that are common when splitting the data record into two consecutive periods, one for calibration and one for validation (Arsenault et al. 2015; Essou et al. 2017). The calibration/validation was done using a customized

OF based on the modified Kling–Gupta Efficiency (KGE) (Gupta et al. 2009; Kling et al. 2012) as described in the following Eqs. (6)–(9):

$$KGE = 1 - ED \quad (6)$$

$$ED = \sqrt{(r - 1)^2 + (\beta - 1)^2 + (\gamma - 1)^2} \quad (7)$$

$$\beta = \frac{\mu_s}{\mu_o} \quad (8)$$

$$\gamma = \frac{CV_s}{CV_o} = \frac{\sigma_s/\mu_s}{\sigma_o/\mu_o} \quad (9)$$

where r represents the correlation coefficient between observed and simulated streamflows, β represents the bias ratio and γ represents the variability ratio. The ratio μ represents the mean streamflow, CV is the variation coefficient and σ represents the standard deviation of the streamflow. The “o” subscript represents the observed streamflow and the “s” subscript represents the simulated streamflow.

Possible KGE values range from—infinitive to 1, where a value of 1 indicates a perfect fit between the datasets, a value of 0 means a good fit on average values, and a negative value indicates a worse fitting than using the mean as a predictor. The KGE criterion has been shown to overcome the problems related to the use of functions based on the mean squared error, such as strongly prioritizing runoff peaks and underestimating variability (Gupta et al. 2009), and as a result, its use has significantly increased in hydrological applications (Beck et al. 2016; Huang et al. 2016; Oyerinde et al. 2017; Thirel et al. 2015). Based on the qualitative evaluation criteria recently used in Crochemore et al. (2015) and Huang et al. (2016), median KGE values ≥ 0.7 are considered as “good” to “very good” performances.

As previously mentioned, the OF used in this study is a variation of the KGE criterion previously described in Eqs. (7)–(10). This customized criterion consists of two equal parts. The first is the KGE computed on the interannual mean hydrograph, and the second is the KGE computed on the daily time series of summer–fall months (June–October). This method was selected in order to specifically target the summer and fall flooding (the targeted seasons of the present study), while maintaining a realistic representation of the annual hydrograph. The OF used for calibrating the parameters can be expressed as follows:

$$OF = \frac{KGE_{interannual\ mean}}{2} + \frac{KGE_{summer-fall}}{2} \quad (10)$$

The optimal set of parameters was chosen based on the customized OF. The validation was then performed over the non-calibrated years of the same period. It is important to recall that the number of years used for the calibration/

validation varies between the 50 basins according to data availability as previously mentioned in Sect. 2.

3.2.3 Streamflow simulations

As described previously, the hydrological model MOHYSE was first calibrated and validated with historical observations of streamflows to evaluate its performance in the June–October floods. In this process, a set of model parameters was obtained for each of the 50 basins. Then, the CRCM5 climate datasets were used as inputs to the previously calibrated/validated hydrological model MOHYSE. In a typical study using climate model data for hydrological modelling, the outputs would be bias-corrected, or the hydrological model would be recalibrated to force a better match between computed and observed streamflows. In this study, great care was taken to ensure that any observed difference is only linked to the spatial resolution of the climate model. As such, a common parameter set must be used, and hydrological model recalibration or bias correction would automatically violate the above constraint, making the use of the parameter set used in the real world a reasonable alternative. Thus, it was assumed that the parameter sets derived from the hydrological model calibration/validation would be adequate to avoid possible impacts of hydrological models parameterization. It is important to state once again that this is an intercomparison study between CRCM5 outputs of different resolutions. No comparison will be made against observed datasets. Therefore, three climate-driven streamflow time series (one for each of the climate model resolutions) were generated and used in the intercomparison study.

The climate-driven streamflow simulation intercomparison was done following the same approach described for the climate datasets analyses. Two comparisons were performed between the three streamflow simulations: the first was the 0.22° resolution against the 0.11° resolution (0.22°/0.11°), and the second, the 0.44° resolution against the 0.11° resolution (0.44°/0.11°). To measure the difference between the evaluated datasets, these two comparisons were done by using the seasonal normalized root mean squared error (NRMSE), which is defined as follows:

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} (X - Y_i)^2}}{\bar{Y}} \quad (11)$$

where X_i is the daily simulated streamflow of the dataset X and Y_i is the daily simulated streamflow of the dataset Y used as a reference. \bar{Y} is the mean of the dataset Y and N_s is the number of days of the season of the full time series. The leap year day is again removed from the datasets. The NRMSE indicates the normalized difference between two datasets,

where a value of 0 indicates the perfect fit, and larger values indicate larger differences between the evaluated datasets.

3.3 Flood indicators

Four flood indicators were used to evaluate the effects of the RCM spatial resolution on the flood simulations: the 2-year, 5-year, 10-year and 20-year return periods of the summer–fall floods. As described in Sect. 2, the three CRCM5-simulated datasets used in this study have a length of 30 years. Thus, the four flood indicators were defined based on the dataset length (30 values of annual summer–fall peak flows) in order to have an appropriate sample size to estimate representative distributions for each return period. The four flood indicators were estimated by a flood frequency analysis using the Gumbel distribution for each simulated streamflow and each basin. The Gumbel distribution was selected for this analysis as it is frequently used in hydrology to represent flood peaks distributions due to its commonly good approximations and simplicity of use (Chebana and Ouarda 2011; Loaiciga and Leipnik 1999; Marques et al. 2015; Yue et al. 1999). The fitting of the Gumbel distribution was visually verified for each river basin (results not shown).

The flood values estimated for the four return periods were compared using the same approach previously described for the climate simulations and the streamflow simulations (see Sect. 3.1), namely, the 0.22°/0.11° and the 0.44°/0.11° analyses. The comparisons between the estimated return periods were done using the relative bias (%), which is defined as follows:

$$B_{rel}(\%) = \frac{X - Y}{Y} \times 100\% \quad (12)$$

where Y is the value used as the reference. This metric was selected to quantitatively evaluate the sensitivity of flood simulations to the RCM spatial resolutions for the four different return periods estimated from the generated climate-driven summer–fall peak flows.

4 Results

The results are presented in three main sections. First, comparisons between the climate simulations with different spatial resolutions are presented for the CRCM5-simulated temperature and precipitation. Next, the hydrological modelling performance is shown for calibration and validation years with respect to observed data over the 50 basins. Finally, the climate-driven streamflow simulations are compared and analysed by calculating the NRMSE over the streamflow simulations and the relative biases between the flood values for the four flood indicators (i.e., the 2-year, 5-year, 10-year

and 20-year return periods) estimated from the streamflow simulations at different spatial resolutions.

4.1 Climate simulations analysis

4.1.1 Temperature bias

Figure 4 presents the maps of the seasonal daily mean temperature ($^{\circ}\text{C}$) difference between simulations with different resolutions, the 0.22° resolution against the 0.11° resolution (upper panel a), and the 0.44° resolution against the 0.11° resolution (lower panel b). The figure shows the temperature difference for the summer seasons (JJA, on the left panels) and fall seasons (SON, on the right panels) over the province of Quebec. The 50 basins of the study area are highlighted in black. The results between the 0.22° and 0.11° resolutions (top two panels) show a consistent hot bias over the entire region during the fall months (SON). Smaller and generally hot biases are observed during the summer, with some cold biases observed close to the coastal areas and water bodies in the center of the province. Similar trends are also observed for the 0.44° and 0.11° resolutions comparison (bottom two panels), and yet the range of biases is slightly larger, reaching values of up to 3°C difference. It can also be seen that there are some pixels with suspiciously large biases at some otherwise unremarkable locations. These large differences

can be explained by the presence of large lakes and reservoirs that are resolved in the finer CRCM grid, but not in the coarser resolution ones. As observed in Fig. 2, the differences in the land area fraction masks used for the three simulations can create these large differences observed in the lake and reservoirs locations.

4.1.2 Precipitation relative bias

Figure 5 presents the relative biases between the CRCM5-simulated precipitations at different spatial resolutions. Both comparisons show similar seasonal trends. A general dry trend is observed during the summer months (JJA). On the other hand, during the fall months (SON), wet and dry relative biases are observed throughout the province. Overall, larger relative biases are observed between the 0.44° and the 0.11° resolution precipitation simulations (lower panel b).

4.1.3 Temperature and precipitation variance ratios

Figures 6 and 7 present the variance ratio maps of seasonal mean temperature and precipitation, respectively. Similar trends are observed between the two comparisons for both seasons. On the seasonal mean temperature variance ratio maps (see Fig. 6), the 0.22° and 0.44° resolution temperature simulations show a consistently smaller variance during

Fig. 4 Seasonal daily mean bias of temperature ($^{\circ}\text{C}$) between CRCM5 simulations with different resolutions for the summer (JJA) and fall (SON) seasons over the 1981–2010 time period. The upper panels **a** show the comparisons between datasets at 0.22° and 0.11° resolutions. The lower panels **b** show the comparisons between datasets at 0.44° and 0.11° resolutions

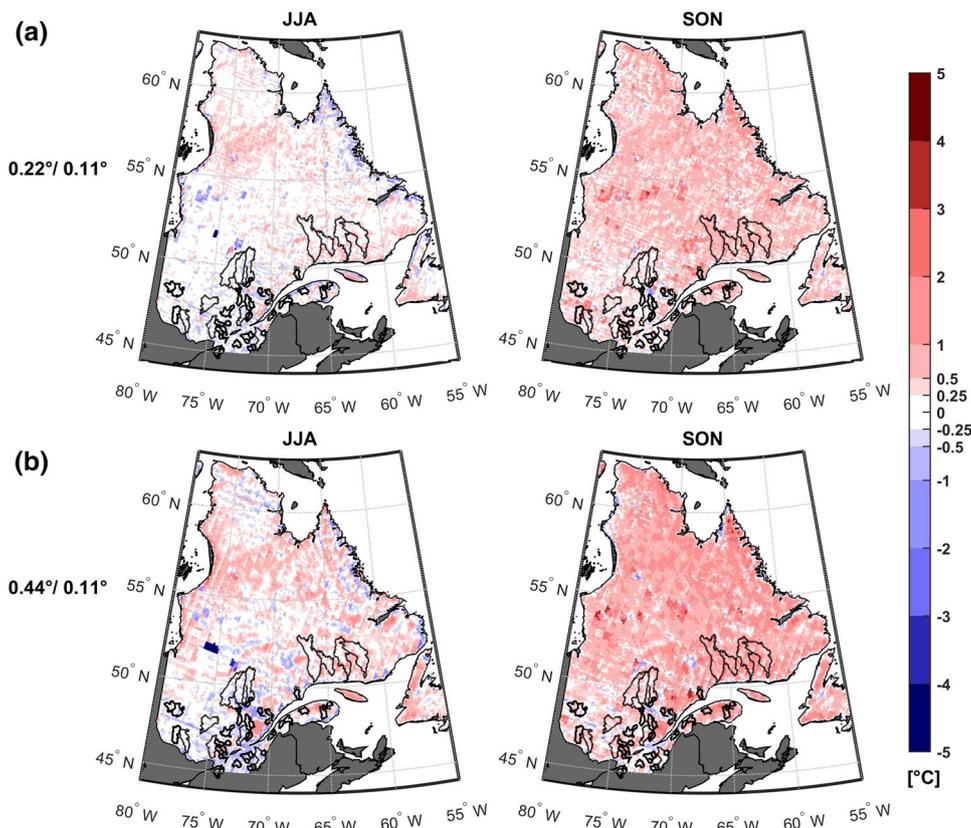


Fig. 5 Seasonal daily mean relative biases of precipitation (%) between CRCM5 simulations with different resolutions for the summer (JJA) and fall (SON) seasons over the 1981–2010 time period. The upper panels **a** show the comparisons between datasets at 0.22° and 0.11° resolutions. The lower panels **b** show the comparisons between datasets at 0.44° and 0.11° resolutions

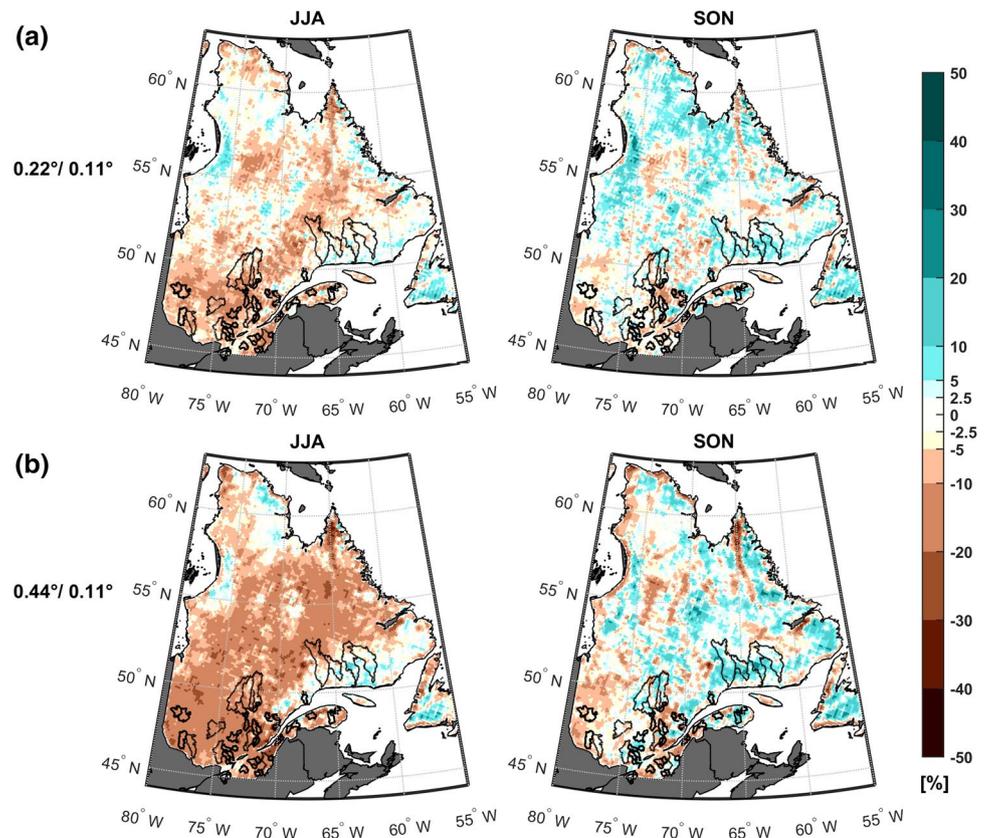


Fig. 6 Ratio of annual seasonal mean temperature variances between CRCM5 simulations with different resolutions for the summer (JJA) and fall (SON) seasons over the 1981–2010 time period. The upper panels **a** show the comparisons between datasets at 0.22° and 0.11° resolutions. The lower panels **b** show the comparisons between datasets at 0.44° and 0.11° resolutions

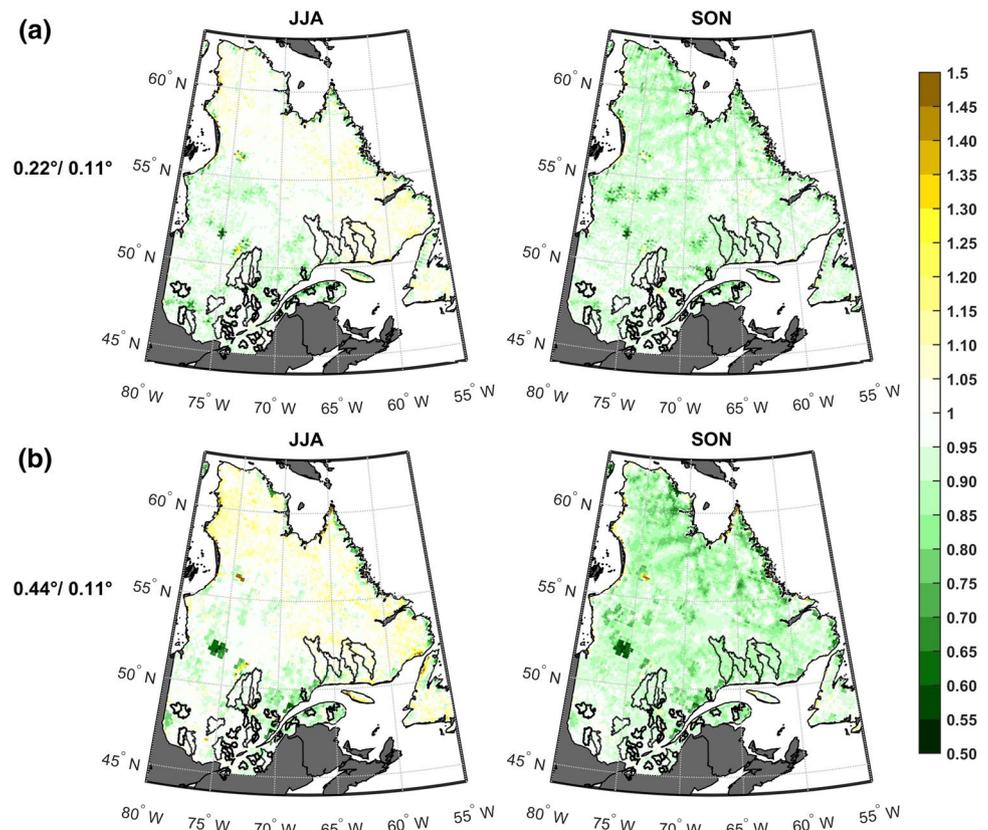
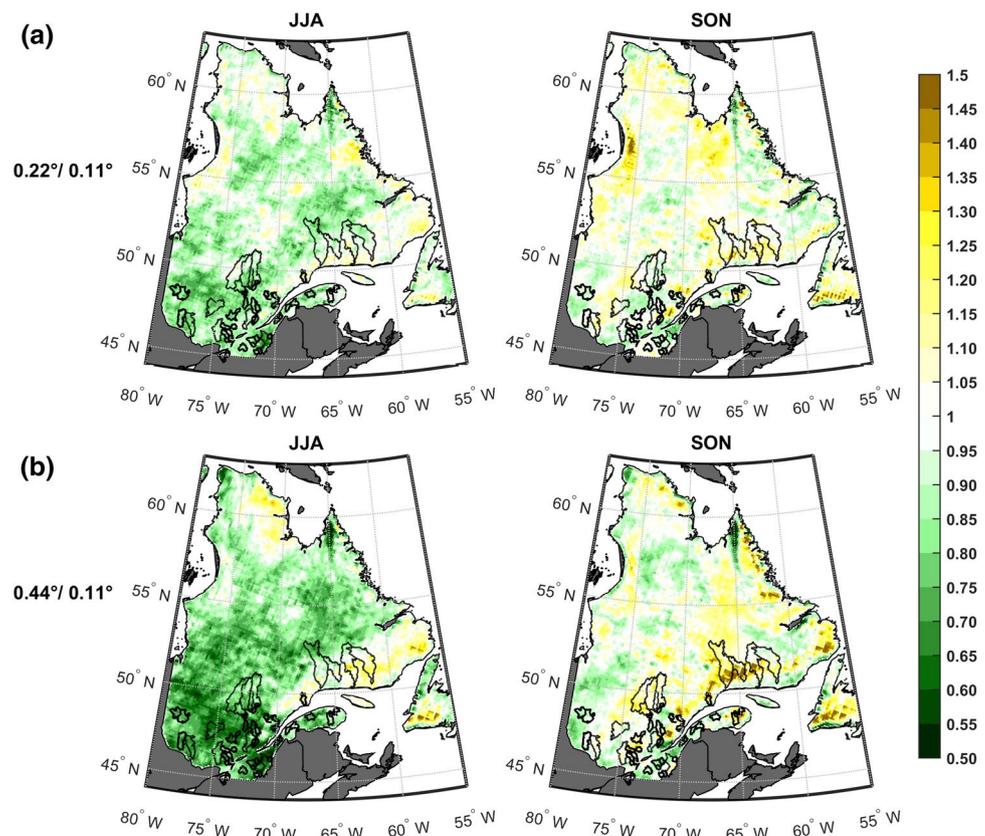


Fig. 7 Ratio of annual seasonal mean precipitation variances between CRCM5 simulations with different resolutions for the summer (JJA) and fall (SON) seasons over the 1981–2010 time period. The upper panels **a** show the comparisons between datasets at 0.22° and 0.11° resolutions. The lower panels **b** show the comparisons between datasets at 0.44° and 0.11° resolutions



the fall months in both comparisons. The variance differences reach values of up to 20–25% in the 0.44° and 0.11° resolutions comparison (lower panel b) and smaller variance differences (5–15%) in the 0.22° and 0.11° resolutions comparison. During summer months, a different trend is observed. The 0.22° and 0.44° resolution simulations show larger variances in the northeast, and smaller ones in the southwest, when compared to the 0.11° resolution simulation. Yet, slightly larger differences are observed between the 0.44° and the 0.11° resolution temperature data (see Fig. 6 lower panel b). Note the persistent outlier pixels corresponding to reservoirs and lakes which are not resolved similarly in all CRCM resolutions.

Seasonal similarities are observed in both comparisons in terms of the precipitation simulations variance ratio. During the summer season, the 0.22° and 0.44° resolution simulations show smaller variances in the south and center of the province when compared with the simulation at finer resolution. Yet, the variance differences increase when the 0.44° resolution simulation is considered (for up to 50%). During the fall months, smaller differences in variance are generally observed for both comparisons. Overall, differences in variance are slightly larger between the 0.44° and the 0.11° resolutions comparison (lower panel b) than between the 0.22° and the 0.11° resolution datasets (upper panel a) over the

province, and specifically in the studied basins, the observed differences are approximately 10 and 25%. Additional comparisons (0.44°/0.22°) are given in Online Resource 2.

4.2 Hydrological modelling

Figure 8 presents the calibration and validation performances of MOHYSE for the 50 basins. The KGE criterion was re-calculated over the complete simulated streamflows to evaluate the performance of the basins with the selected OF. The left panel a) displays the distributions (boxplots) of the KGE values measuring the basins performance over the full time series (blue boxplots) and the performance during the summer–fall months (red boxplots). Each boxplot is then constituted of 50 KGE values, one for each basin. On the right panel b), the KGE obtained in calibration is compared against the KGE obtained during validation for each basin. When the calibration produces better results than the validation, markers are displayed under the reference line, and when the validation outperforms the calibration, markers are displayed over the reference line.

Overall, according to the qualitative performance presented in Sect. 3, it is clear from Fig. 8 that MOHYSE performs well for both calibration and validation periods. Yet, differences are observed between the full time series and

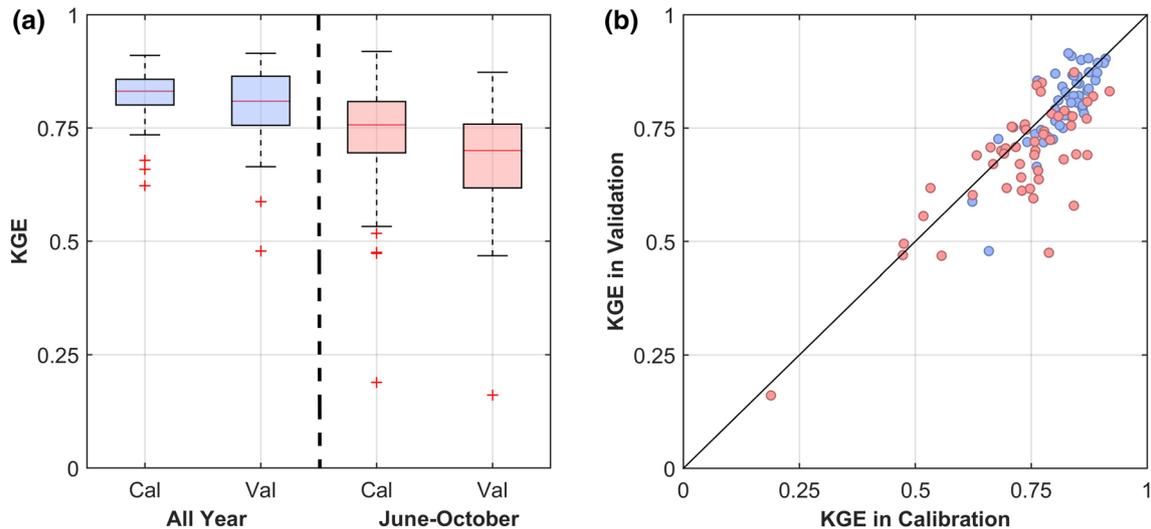


Fig. 8 KGE values for the calibration and validation years are presented for the full time series (blue) and the June–October months (red). Panel **a** presents the boxplots of the calibration and validation

the June–October evaluations. On the left panel **a**), the red boxplots show that MOHYSE has lower performance during the summer–fall months when compared with the full time series evaluations. However, it should be recalled that these catchments are snowmelt-dominated, and thus are naturally expected to have lower KGE values in rainfall-dominated periods (i.e., June–October). On the right panel **b**), in line with the results of the left panel **a**), MOHYSE clearly shows generally good and consistent performances during both the calibration and validation periods for each basin. The results in this panel also show the decreasing KGE values during the June–October streamflow simulations, as expected. The specific basins with bad performances also correspond to the outliers observed in the distributions of panel **a**). Overall, median KGE values of approximately 0.65 are observed during the summer–fall validation, while in the full time series results, they are over 0.75. Thus, following the Crochemore et al. (2015) and Huang et al. (2016) qualitative evaluation criteria based on full time series evaluations, MOHYSE presents a good performance.

4.3 RCM-driven streamflow simulations

Figure 9 shows the seasonal comparisons of streamflows simulated with CRCM5 outputs at different spatial resolutions, using the Normalized Root Mean Squared Error (NRMSE). The figure is divided into four sections. Each section shows one season, namely, winter (December, January and February), spring (March, April and May), summer (June, July and August) and fall (September, October and November) from left to right. For each season, the two

for both evaluations. On panel **b**), the KGE in calibration is compared against the KGE in validation for each basin

defined comparisons are presented, i.e., the $0.22^{\circ}/0.11^{\circ}$ and the $0.44^{\circ}/0.11^{\circ}$.

In Fig. 9, smaller differences are observed in the streamflow simulation comparison between the 0.22° and the 0.11° resolutions (dark green) than between the 0.44° and the 0.11° resolutions (light green). These results are observed consistently during the four seasons. During the summer months (June, July and August) the largest differences (higher median NRMSE values) and wider boxplots are clearly observed. Generally, during each of the four seasons, it is observed that the larger the difference in the RCM spatial resolution, the larger the difference between streamflows.

In Fig. 10, the relative biases between the flood values for the different return periods estimated from the simulated summer–fall peak streamflows are presented. The four flood indicators show a clear relative bias increase in the summer–fall flood return periods, along with a refinement in spatial resolution. In other words, the $0.22^{\circ}/0.11^{\circ}$ boxplots present smaller differences than the $0.44^{\circ}/0.11^{\circ}$ boxplots. This behaviour is observed in the distributions of the four flood indicators, where the comparisons between the 0.22° and the 0.11° resolution return periods (dark blue) show nearly no bias, with median values closer to zero. Moreover, a slightly increasing difference between floods is observed with increasing return periods, especially observed in the comparison of the 0.22° against the 0.11° resolution, where the range of values slightly widens with increasing return periods. This is further discussed in Sect. 5.3.

Figure 11 displays the relative biases between the flood indicators for the different return periods divided into two groups. The first group consists of catchments smaller than 1000 km^2 (named *s*) and the second group consists of

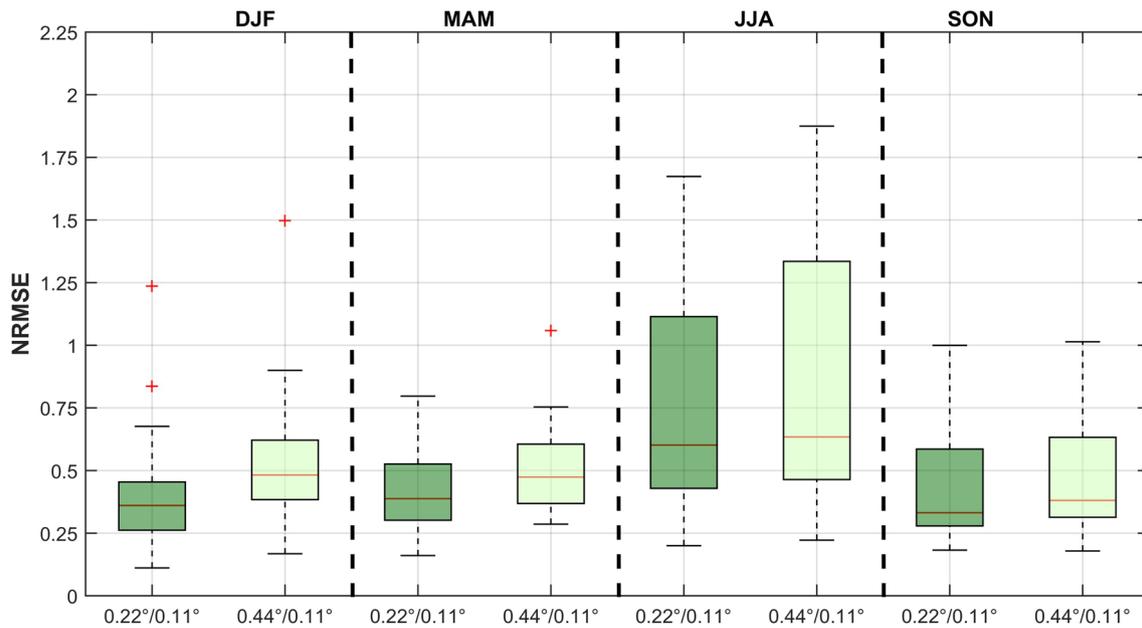


Fig. 9 Seasonal NRMSE values of the comparisons between streamflows generated with RCM outputs at different spatial resolutions. The winter (DJF), spring (MAM), summer (JJA) and fall (SON) sea-

sons are presented from left to right. For each season, the 0.22°/0.11° (dark green) and the 0.44°/0.11° (light green) comparisons are presented

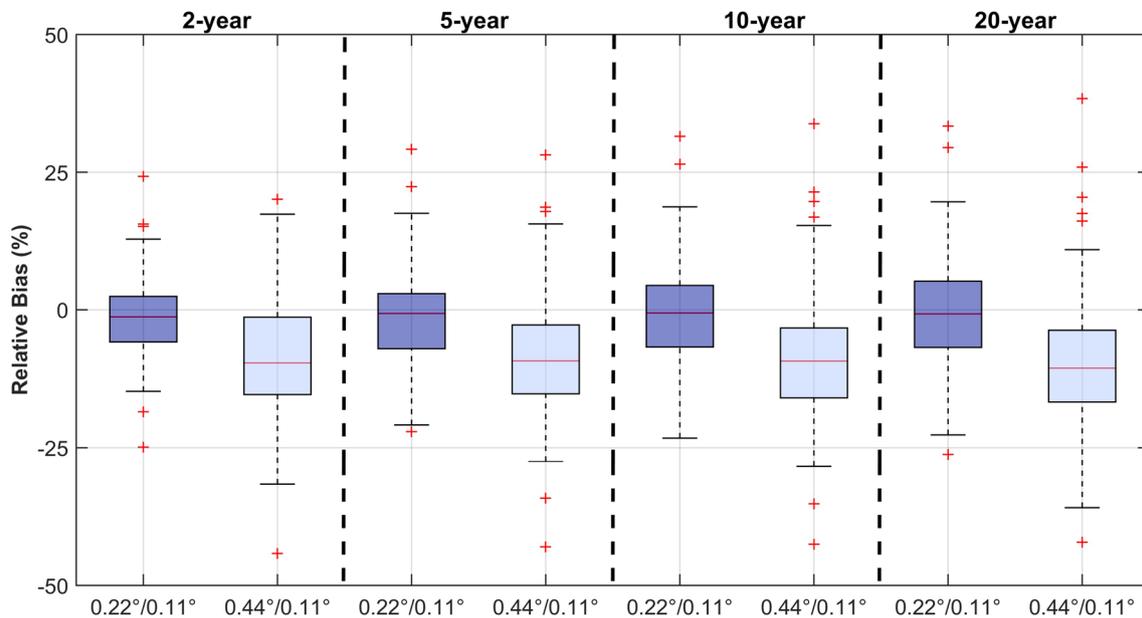


Fig. 10 Relative biases (%) between the summer-fall flood indicators (2-, 5-, 10- and 20-year return periods) from the different CRCM5 resolutions. The 2-year, 5-year, 10-year and 20-year return

periods are presented from left to right. For each return period, the 0.22°/0.11° (dark blue) and the 0.44°/0.11° comparisons (light blue) are presented

catchments larger than 3000 km² (named *L*). Overall, the group of smaller catchments show larger differences than the group of larger catchments. This is true for both comparisons the 0.22°/0.11° and the 0.44°/0.11°. The observed

differences also show an increase with longer return periods (i.e., from 2-year to 20-year return period), especially in the 0.44°/0.11° comparisons.

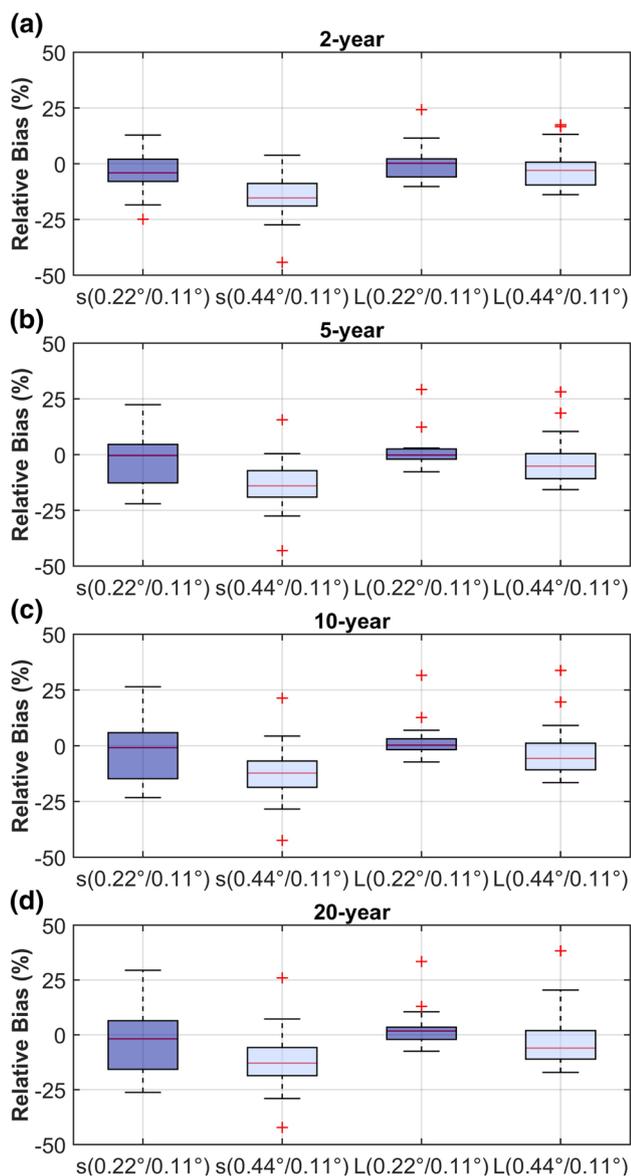


Fig. 11 Relative biases (%) between the summer–fall flood indicators (2-, 5-, 10- and 20-year return periods) from the different CRCM5 resolutions grouped by small (s) and large (L) basins. The first panel **a** presents the comparisons of 2-year return periods, the second panel **b** the comparisons of 5-year return periods, the third panel **c** the comparisons of 10-year return periods and the fourth panel **d** the comparisons of the 20-year return periods. The 0.22°/0.11° (dark blue) and the 0.44°/0.11° comparisons (light blue) are presented for each indicator

5 Discussion and conclusions

5.1 Effects of RCM spatial resolution on RCM outputs

Seasonal intercomparisons of datasets with different spatial resolutions were performed for temperature and precipitation

outputs. In an attempt to isolate the spatial resolution as the studied variable, all datasets issued from the CRCM5 shared the same configuration, except for their grids of 0.44°, 0.22° and 0.11° resolutions. The CRCM5 temperature comparisons (Fig. 4) present a clear picture of the spatial resolution effects. It is observed that in some regions of the province, the spatial resolution effect resulted in up to a 3 °C difference. Although not as important as precipitations for flood event simulations, large biases in temperature can influence water balance through the evaporation rate during the summer. It is therefore important to take into account that in otherwise identical CRCM5 simulations, driven by the exact same reanalysis, spatial resolution can have such a large impact on temperature.

The CRCM5 precipitation outputs were also affected by the spatial resolution (see Fig. 5). The seasonal relative biases of precipitation exposed a clear increase in the relative biases when the spatial resolution was increased, especially during the summer months. The 0.22° and 0.44° resolution precipitations presented a consistently dryer bias than the dataset at finer resolution. For the 0.22°/0.11° comparisons, relative biases between 10 and 20%, were observed while the 0.44°/0.11° comparison presented values reaching up to a 40% difference in the south of the province, meaning that summer precipitation decreased with decreasing spatial resolution. This could possibly be explained by a more intense evaporation/precipitation cycle due to a better resolution of land and lake elements in the 0.11° simulation. This is in line with a recently accepted paper evaluating the influence of horizontal resolution on atmospheric conditions that can lead to freezing rain (St-Pierre et al. 2018). However, no systematic behaviour was observed during the fall, as dry and humid patches varied all over the province. Despite of the methodological differences, the wet bias observed in high resolution CRCM5 simulation is in line with the analyses presented by Whan and Zwiers (2016) and Martynov et al. (2013), where the CRCM5 presented larger amounts of precipitation when compared with another RCM and reanalyses over some North American regions.

Concerning the variance ratio, the effects were different for each climate variable. The CRCM5 temperatures showed decreases from approximately 10–15% with decreasing spatial resolution during the summer and fall seasons (Fig. 6). For the CRCM5-simulated precipitation, the variance ratios were especially affected in the southern part of the province (Fig. 7), where larger ratios are observed. This was particularly observed during the summer months, during which the variability decreases by up to 50% in some regions of the province, from the finer to the larger resolutions. Overall, the variance of precipitation simulations was more sensitive to spatial resolution than the variance of temperature. These effects were observed during the summer season, which was of the most interest in this study. The observed decreases in

precipitation variances could be very important for future trends of flood events as the decreases in variance could suggest a possible decrease in extreme rainfall events during the seasons. Consequently, there could be decreases in the occurrence of summer–fall flood events, which adds uncertainty to studies of hydrological extremes when using different spatial resolutions. This decrease in variability when decreasing resolution could also be explained in part by the RCM spatial resolution improvements in the 0.11° simulations related to land/lake features and orographic effects, but this remains to be validated.

5.2 Streamflow simulations sensitivity to RCM-spatial resolution

In this work, the streamflow simulation analyses present evidence of the impact of the RCM-spatial resolution on the hydrological modelling results. These results were expected, considering the systematic effects observed in the precipitation and temperature simulations that were used to feed the hydrological model. The combination of warmer temperatures observed in Fig. 4 and of the decreases in precipitation amounts presented in Fig. 5 favored the differences between streamflow simulations. These results, concerning the RCM outputs, are in line with a recent study presented by Lucas-Picher et al. (2016), in which an increase in precipitation was found in the finer CRCM5 simulations during the summer months (June, July and August). Curry et al. (2016a, b) also found similar trends when comparing precipitation datasets issued from the fourth version of the CRCM over three river basins, where the finer RCM simulations presented better simulations of precipitation extremes when compared to observations. On the other hand, it is important to recall that the few basins that presented bad performances during the calibration and validation process of the present study can bring additional uncertainties to our results.

5.3 Flood indicators

From Fig. 10, the analysis of flood indicators revealed that the CRCM5 spatial resolution impacted the probability of occurrence of flooding events. The relative biases were shown to gradually increase with longer return periods. In essence, this means that for the 20-year return period (i.e., the lowest probability of occurrence) the difference between summer–fall peak flows was larger than for a 2-year return period, a less-extreme flood. This result agrees with the analyses presented by Lobligeois et al. (2014), in which finer precipitation simulations were found to significantly impact flood simulations over catchments with highly variable precipitation patterns.

It is also interesting to note that there was a systematic bias present in the 0.44°/0.11° comparison in Fig. 10. It can

be seen that the 0.44° simulation has a 10–15% negative bias compared to the 0.11° simulation for all return periods. In contrast, the 0.22° and 0.11° comparison shows that there is some variability, but that the median bias is practically inexistent. This might mean that for the simulation of summer flood events, resolutions finer than 0.22° do not necessarily provide more usable information. However, it is expected that future RCM development will allow the resolution of more physical processes than is currently possible with available computing resources. This will necessarily entail much finer resolutions, which is expected to improve the simulation quality. It will then be important to distinguish the improvements that are due to spatial resolution from those that are due to the improved process representation.

5.4 Streamflow simulations and catchment size

The RCM spatial resolution impact is likely to be different, depending on the size of the catchment. This has already been pointed out in the literature, where some studies show that streamflow modelling impacts or improvements are related to catchment characteristics such as size and spatial rainfall variability (Lobligeois et al. 2014; Zhao et al. 2013). Thus, it was expected that small basins would be more sensitive to the increasing spatial resolution, as regional climate patterns are unable to adequately represent detailed trends due to the size of the RCM grid. In other words, fewer grid points fall within a smaller area than within a larger area. For this reason, the analysis presented in Fig. 11 was carried out to explore the sensitivity of flood simulations to the CRCM5 spatial resolution according to catchment size. The figure confirms that the small catchments have larger relative biases due to the climate data's spatial resolution. Moreover, the observed effects systematically increased with longer return periods, meaning that larger impacts were observed in the “most” extreme flood events (i.e., 20-year return period).

5.5 Concluding remarks

This study has explored the uncertainty in flood simulations due to the CRCM5 spatial resolution. It was shown that there is a clear impact between the simulations produced with identical RCMs but different spatial resolution. This study was not meant to inform on the quality of the simulations with respect to the observations, but simply to evaluate the differences between the simulations at different resolutions. It was shown that there is a clear effect of spatial resolution, possibly due to differences in land/lake features and improved topography. Knowing that hydrologists use RCM simulations to estimate risk in future climates, it is imperative that this source of uncertainty be studied and detailed for the development of future RCMs.

While the study's objectives were attained, more work is still needed as improved and finer climate datasets and approaches are constantly produced. The obtained results and the methodological limitations of this work bring out additional research possibilities, such as the evaluation of other RCM climate variables, the addition of convection-permitting simulations, the use of different hydrological models, the evaluation of other flood indicators, and the analysis of finer RCM outputs.

Acknowledgements The author would like to thank the Ouranos Consortium on Regional Climatology and Adaptation for the CRCM5 simulations provided, as well as the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) and the Ministère de l'Économie, de la Science et de l'Innovation for partial funding of this project.

References

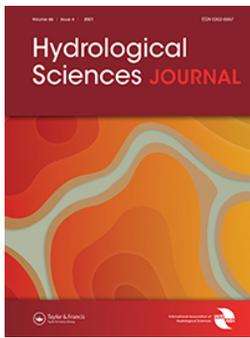
- Alexandru A, Elia RD, Laprise R, Separovic L, Biner S (2009) Sensitivity study of regional climate model simulations to large-scale nudging parameters. *Mon Weather Rev* 137:1666–1686. <https://doi.org/10.1175/2008mwr2620.1>
- Alfieri L, Burek P, Feyen L, Forzieri G (2015) Global warming increases the frequency of river floods in Europe. *Hydrol Earth Syst Sci* 19:2247–2260. <https://doi.org/10.5194/hess-19-2247-2015>
- Arnell NW, Lloyd-Hughes B (2014) The global-scale impacts of climate change on water resources and flooding under new climate and socio-economic scenarios. *Clim Change* 122:127–140. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0948-4>
- Arsenault R, Brissette F (2016) Multi-model averaging for continuous streamflow prediction in ungauged basins. *Hydrol Sci J* 61:2443–2454
- Arsenault R, Poulin A, Côté P, Brissette F (2014) Comparison of stochastic optimization algorithms in hydrological model calibration. *J Hydrol Eng* 19:1374–1384
- Arsenault R, Gatién P, Renaud B, Brissette F, Martel J-L (2015) A comparative analysis of 9 multi-model averaging approaches in hydrological continuous streamflow simulation. *J Hydrol* 529:754–767. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.09.001>
- Beck HE, Dijk AIJMV, Roo AD, Miralles DG, McVicar TR, Schellekens J, Bruijnzeel LA (2016) Global-scale regionalization of hydrologic model parameters. *Water Resour Res* 52:3599–3622. <https://doi.org/10.1002/2015wr018247>
- Beven K (2016) Facets of uncertainty: epistemic uncertainty, non-stationarity, likelihood, hypothesis testing, and communication. *Hydrol Sci J* 61:1652–1665. <https://doi.org/10.1080/0262667.2015.1031761>
- Biner S, Caya D, Laprise R, Spacek L (2000) Nesting of RCMs by imposing large scales. *World Meteorol Organ Publ* 2000:7.3
- Chan SC, Kendon EJ, Fowler HJ, Blenkinsop S, Ferro CAT, Stephenson DB (2013) Does increasing the spatial resolution of a regional climate model improve the simulated daily precipitation? *Clim Dyn* 41:1475–1495. <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1568-9>
- Chebana F, Ouarda TBMJ (2011) Multivariate quantiles in hydrological frequency analysis. *Environmetrics* 22:63–78. <https://doi.org/10.1002/env.1027>
- Chen J, Brissette FP, Leconte R (2011) Uncertainty of downscaling method in quantifying the impact of climate change on hydrology. *J Hydrol* 401:190–202
- Côté J, Gravel S, Méthot A, Patoine A, Roch M, Staniforth A (1998) The operational CMC–MRB global environmental multiscale (GEM) model. Part I: design considerations and formulation. *Mon Weather Rev* 126:1373–1395. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1998\)126%3c1373:tocmge%3e2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1998)126%3c1373:tocmge%3e2.0.co;2)
- Crochemore L et al (2015) Comparing expert judgement and numerical criteria for hydrograph evaluation. *Hydrol Sci J* 60:402–423. <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.903331>
- Curry CL, Tencer B, Whan K, Weaver AJ, Giguère M, Wiebe E (2016a) Searching for added value in simulating climate extremes with a high-resolution regional climate model over western Canada. *Atmos Ocean* 54:364–384
- Curry CL, Tencer B, Whan K, Weaver AJ, Giguère M, Wiebe E (2016b) Searching for added value in simulating climate extremes with a high-resolution regional climate model over Western Canada. II: basin-scale results. *Atmos Ocean* 54:385–402
- Dankers R, Feyen L (2008) Climate change impact on flood hazard in Europe: an assessment based on high-resolution climate simulations. *J Geophys Res Atmos* (1984–2012). <https://doi.org/10.1029/2007jd009719>
- Dankers R, Christensen OB, Feyen L, Kalas M, de Roo A (2007) Evaluation of very high-resolution climate model data for simulating flood hazards in the Upper Danube Basin. *J Hydrol* 347:319–331. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.09.055>
- Dankers R et al (2014) First look at changes in flood hazard in the Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project ensemble. *Proc Natl Acad Sci* 111:3257–3261. <https://doi.org/10.1073/pnas.1302078110>
- Das J, Umamahesh NV (2018) Assessment of uncertainty in estimating future flood return levels under climate change. *Nat Hazards* 93:109–124. <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3291-2>
- Ekström M, Gilleland E (2017) Assessing convection permitting resolutions of WRF for the purpose of water resource impact assessment and vulnerability work: a southeast Australian case study. *Water Resour Res* 53:726–743. <https://doi.org/10.1002/2016WR019545>
- Essou GRC, Brissette F, Lucas-Picher P (2017) Impacts of combining reanalyses and weather station data on the accuracy of discharge modelling. *J Hydrol* 545:120–131. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.12.021>
- Falloon P, Challinor A, Dessai S, Hoang L, Johnson J, Koehler A-K (2014) Ensembles and uncertainty in climate change impacts. *Front Environ Sci* 2:33
- Fortin V, Turcotte R (2006) Le modèle hydrologique MOHYSE Note de cours pour SCA7420. Département des sciences de la terre et de l'atmosphère, Université du Québec à Montréal, Québec
- Giuntoli I, Vidal J, Prudhomme C, Hannah D (2015) Future hydrological extremes: the uncertainty from multiple global climate and global hydrological models. *Earth Syst Dyn* 6:267–285
- Graham LP, Andréasson J, Carlsson B (2007) Assessing climate change impacts on hydrology from an ensemble of regional climate models, model scales and linking methods—a case study on the Lule River basin. *Clim Change* 81:293–307. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9215-2>
- Gupta HV, Kling H, Yilmaz KK, Martinez GF (2009) Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: implications for improving hydrological modelling. *J Hydrol* 377:80–91
- Hagemann S et al (2013) Climate change impact on available water resources obtained using multiple global climate and hydrology models. *Earth Syst Dyn* 4:129–144
- Hansen N, Ostermeier A (1997) Convergence properties of evolution strategies with the derandomized covariance matrix adaptation: the CMA-ES. *Eufit* 97:650–654

- Hawkins E, Osborne TM, Ho CK, Challinor AJ (2013) Calibration and bias correction of climate projections for crop modelling: an idealised case study over Europe. *Agric For Meteorol* 170:19–31
- Hertwig E, von Storch J-S, Handorf D, Dethloff K, Fast I, Krismer T (2015) Effect of horizontal resolution on ECHAM6-AMIP performance. *Clim Dyn* 45:185–211. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2396-x>
- Huang S et al (2016) Evaluation of an ensemble of regional hydrological models in 12 large-scale river basins worldwide. *Clim Change* 141:381–397. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1841-8>
- Irambona C, Music B, Nadeau DF, Mahdi TF, Strachan IB (2016) Impacts of boreal hydroelectric reservoirs on seasonal climate and precipitation recycling as simulated by the CRCM5: a case study of the La Grande River watershed, Canada. *Theor Appl Climatol* 131:1529–1544. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-2010-8>
- Kain JS, Fritsch JM (1990) A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization. *J Atmos Sci* 47:2784–2802. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1990\)047%3c2784:aodepm%3e2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1990)047%3c2784:aodepm%3e2.0.co;2)
- Kendon EJ et al (2017) Do convection-permitting regional climate models improve projections of future precipitation change? *Bull Am Meteorol Soc* 98:79–93. <https://doi.org/10.1175/bams-d-15-0004.1>
- Klavans JM, Poppick A, Sun S, Moyer EJ (2017) The influence of model resolution on temperature variability. *Clim Dyn* 48:3035–3045. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3249-6>
- Kling H, Fuchs M, Paulin M (2012) Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *J Hydrol* 424–425:264–277. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.01.011>
- Kundzewicz ZW et al (2014) Flood risk and climate change: global and regional perspectives. *Hydrol Sci J* 59:1–28. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.857411>
- Kundzewicz ZW et al (2017) Differences in flood hazard projections in Europe—their causes and consequences for decision making. *Hydrol Sci J* 62:1–14. <https://doi.org/10.1080/0262667.2016.1241398>
- Kundzewicz ZW, Krysanova V, Benestad RE, Hov Ø, Piniewski M, Otto IM (2018) Uncertainty in climate change impacts on water resources. *Environ Sci Policy* 79:1–8. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.10.008>
- Kuo H-L (1965) On formation and intensification of tropical cyclones through latent heat release by cumulus convection. *J Atmos Sci* 22:40–63
- Loaiciga HA, Leipnik RB (1999) Analysis of extreme hydrologic events with Gumbel distributions: marginal and additive cases. *Stoch Environ Res Risk Assess* 13:251–259. <https://doi.org/10.1007/s004770050042>
- Lobligeois F, Andréassian V, Perrin C, Tabary P, Loumagne C (2014) When does higher spatial resolution rainfall information improve streamflow simulation? An evaluation using 3620 flood events. *Hydrol Earth Syst Sci* 18:575–594. <https://doi.org/10.5194/hess-18-575-2014>
- Lucas-Picher P, Cattiaux J, Bougie A, Laprise R (2015a) How does large-scale nudging in a regional climate model contribute to improving the simulation of weather regimes and seasonal extremes over North America? *Clim Dyn* 46:929–948. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2623-0>
- Lucas-Picher P, Riboust P, Somot S, Laprise R (2015b) Reconstruction of the Spring 2011 Richelieu River flood by two regional climate models and a hydrological model. *J Hydrometeorol* 16:36–54. <https://doi.org/10.1175/jhm-d-14-0116.1>
- Lucas-Picher P, Laprise R, Winger K (2016) Evidence of added value in North American regional climate model hindcast simulations using ever-increasing horizontal resolutions. *Clim Dyn*. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3227-z>
- Mahajan S, Evans KJ, Branstetter M, Anantharaj V, Leifeld JK (2015) Fidelity of precipitation extremes in high resolution global climate simulations. *Proced Comput Sci* 51:2178–2187. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.05.492>
- Marques FJ, Coelho CA, de Carvalho M (2015) On the distribution of linear combinations of independent Gumbel random variables. *Stat Comput* 25:683–701. <https://doi.org/10.1007/s1122-014-9453-5>
- Martynov A, Laprise R, Sushama L, Winger K, Šeparović L, Dugas B (2013) Reanalysis-driven climate simulation over CORDEX North America domain using the Canadian Regional Climate Model, version 5: model performance evaluation. *Clim Dyn* 41:2973–3005. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1778-9>
- Mearns LO, Bukovsky M, Pryor SC, Magaña V (2018) Downscaling of climate information. In: Lloyd EA, Winsberg E (eds) *Climate modelling: philosophical and conceptual issues*. Springer, Cham, pp 199–269. https://doi.org/10.1007/978-3-319-65058-6_8
- Mendoza PA et al (2016) Effects of different regional climate model resolution and forcing scales on projected hydrologic changes. *J Hydrol* 541:1003–1019. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.08.010>
- Miguez-Macho G, Stenchikov GL, Robock A (2004) Spectral nudging to eliminate the effects of domain position and geometry in regional climate model simulations. *J Geophys Res Atmos* 109:D13
- Minville M, Brissette F, Leconte R (2008) Uncertainty of the impact of climate change on the hydrology of a nordic watershed. *J Hydrol* 358:70–83
- Naz BS, Kao S-C, Ashfaq M, Rastogi D, Mei R, Bowling LC (2016) Regional hydrologic response to climate change in the conterminous United States using high-resolution hydroclimate simulations. *Glob Planet Change* 143:100–117. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.06.003>
- Oyerinde G, Hountondji F, Lawin A, Odofin A, Afouda A, Diekrüger B (2017) Improving hydro-climatic projections with bias-correction in Sahelian Niger Basin, West Africa. *Climate* 5:8
- Prein AF, Gobiet A, Suklitsch M, Truhetz H, Awan NK, Keuler K, Georgievski G (2013) Added value of convection permitting seasonal simulations. *Clim Dyn* 41:2655–2677. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1744-6>
- Prein AF et al (2015) A review on regional convection-permitting climate modeling: demonstrations, prospects, and challenges. *Rev Geophys* 53:323–361. <https://doi.org/10.1002/2014rg000475>
- Riboust P, Brissette F (2015) Climate change impacts and uncertainties on spring flooding of Lake Champlain and the Richelieu River JAWRA. *J Am Water Resour Assoc* 51:776–793
- Roudier P, Andersson JCM, Donnelly C, Feyen L, Greuell W, Ludwig F (2016) Projections of future floods and hydrological droughts in Europe under a + 2 °C global warming. *Clim Change* 135:341–355. <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1570-4>
- Roy P, Gachon P, Laprise R (2014) Sensitivity of seasonal precipitation extremes to model configuration of the Canadian Regional Climate Model over eastern Canada using historical simulations. *Clim Dyn* 43:2431–2453
- Sanchez-Gomez E, Somot S, Déqué M (2009) Ability of an ensemble of regional climate models to reproduce weather regimes over Europe-Atlantic during the period 1961–2000. *Clim Dyn* 33:723–736. <https://doi.org/10.1007/s00382-008-0502-7>
- Sandvik MI, Sorteberg A, Rasmussen R (2018) Sensitivity of historical orographically enhanced extreme precipitation events to idealized temperature perturbations. *Clim Dyn* 50:143–157. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3593-1>
- Šeparović L, de Elía R, Laprise R (2012) Impact of spectral nudging and domain size in studies of RCM response to parameter

- modification. *Clim Dyn* 38:1325–1343. <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1072-7>
- Separovic L et al (2013) Present climate and climate change over North America as simulated by the fifth-generation Canadian regional climate model. *Clim Dyn* 41:3167–3201. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1737-5>
- Storch HV, Langenberg H, Feser F (2000) A spectral nudging technique for dynamical downscaling purposes. *Mon Weather Rev* 128:3664–3673. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2000\)128%3c3664:asntfd%3e2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2000)128%3c3664:asntfd%3e2.0.co;2)
- St-Pierre M, Thériault JM, Paquin D (2018) Influence of the model horizontal resolution on atmospheric conditions leading to freezing rain in regional climate simulations. *Atmos Ocean* 2019:1
- Terai CR, Caldwell PM, Klein SA, Tang Q, Branstetter ML (2017) The atmospheric hydrologic cycle in the ACME v0.3 model. *Clim Dyn*. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3803-x>
- Teufel B et al (2017) Investigation of the 2013 Alberta flood from weather and climate perspectives. *Clim Dyn* 48:2881–2899. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3239-8>
- Teutschbein C, Seibert J (2010) Regional climate models for hydrological impact studies at the catchment scale: a review of recent modeling strategies. *Geogr Compass* 4:834–860
- Thirel G et al (2015) Hydrology under change: an evaluation protocol to investigate how hydrological models deal with changing catchments. *Hydrol Sci J* 60:1184–1199. <https://doi.org/10.1080/0262667.2014.967248>
- Trudel M, Doucet-Généreux P-L, Leconte R (2017) Assessing river low-flow uncertainties related to hydrological model calibration and structure under climate change conditions. *Climate* 5:19
- Veijalainen N, Lotsari E, Alho P, Vehviläinen B, Käyhkö J (2010) National scale assessment of climate change impacts on flooding in Finland. *J Hydrol* 391:333–350
- Velázquez J, Anctil F, Perrin C (2010) Performance and reliability of multimodel hydrological ensemble simulations based on seventeen lumped models and a thousand catchments. *Hydrol Earth Syst Sci* 14:2303–2317
- Vetter T et al (2017) Evaluation of sources of uncertainty in projected hydrological changes under climate change in 12 large-scale river basins. *Clim Change* 141:419–433. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1794-y>
- Wasko C, Sharma A (2017) Global assessment of flood and storm extremes with increased temperatures. *Sci Rep* 7:7945. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-08481-1>
- Wehner MF, Smith RL, Bala G, Duffy P (2010) The effect of horizontal resolution on simulation of very extreme US precipitation events in a global atmosphere model. *Clim Dyn* 34:241–247. <https://doi.org/10.1007/s00382-009-0656-y>
- Wehner MF et al (2014) The effect of horizontal resolution on simulation quality in the community atmospheric model, CAM5.1. *J Adv Model Earth Syst* 6:980–997. <https://doi.org/10.1002/2013ms000276>
- Wehner M, Arnold J, Knutson T, Kunkel K, LeGrande A (2017) Droughts, floods, and hydrology
- Whan K, Zwiers F (2016) Evaluation of extreme rainfall and temperature over North America in CanRCM4 and CRCM5. *Clim Dyn* 46:3821–3843. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2807-7>
- Wilby RL (2005) Uncertainty in water resource model parameters used for climate change impact assessment. *Hydrol Process* 19:3201–3219
- Wilby RL, Harris I (2006) A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: low-flow scenarios for the River Thames, UK. *Water Resour Res* 42:2
- Yue S, Ouarda TBMJ, Bobée B, Legendre P, Bruneau P (1999) The Gumbel mixed model for flood frequency analysis. *J Hydrol* 226:88–100. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00168-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00168-7)
- Zeng X-M, Wang M, Zhang Y, Wang Y, Zheng Y (2016) Assessing the effects of spatial resolution on regional climate model simulated summer temperature and precipitation in China: a case study. *Adv Meteorol* 2016:12. <https://doi.org/10.1155/2016/7639567>
- Zhao F, Zhang L, Chiew FHS, Vaze J, Cheng L (2013) The effect of spatial rainfall variability on water balance modelling for south-eastern Australian catchments. *J Hydrol* 493:16–29. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.04.028>

Publisher's Note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Annexe B – Article de Dallaire et al. (2021)



Uncertainty of potential evapotranspiration modelling in climate change impact studies on low flows in North America

Gabrielle Dallaire, Annie Poulin, Richard Arsenault & François Brissette

To cite this article: Gabrielle Dallaire, Annie Poulin, Richard Arsenault & François Brissette (2021) Uncertainty of potential evapotranspiration modelling in climate change impact studies on low flows in North America, Hydrological Sciences Journal, 66:4, 689-702, DOI: [10.1080/02626667.2021.1888955](https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1888955)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1888955>



Published online: 19 Mar 2021.



Submit your article to this journal [↗](#)



Article views: 106



View related articles [↗](#)



View Crossmark data [↗](#)

Uncertainty of potential evapotranspiration modelling in climate change impact studies on low flows in North America

Gabrielle Dallaire , Annie Poulin , Richard Arsenault  and François Brissette 

Department of Construction Engineering, École De Technologie Supérieure, Montréal, (Québec), Canada

ABSTRACT

This study investigates the uncertainty in hydroclimatic modelling chain components on future changes in potential evapotranspiration, specially on low flows, at the watershed scale. A large domain covering 2080 watersheds located in Canada, the United States and Mexico is studied. The outputs from eight global climate models are post-processed using two methods to produce climate scenarios that drive 10 temperature- and radiation-based potential evapotranspiration (PET) formulas and three lumped conceptual hydrological models, under representative concentration pathways (RCP) 4.5 and 8.5 and for the future periods 2041–2070 and 2071–2100. All simulated results show an increase in PET and a decrease in low flows, computed through three statistical metrics. Based on the results, we advise the use of multiple hydrological model–PET formula combinations when investigating the impact of climate change on low flows. This study provides an assessment of the contribution of potential evapotranspiration formulas to uncertainty throughout the modelling chain.

ARTICLE HISTORY

Received 26 August 2020
Accepted 7 January 2021

EDITOR

A. Fiori

ASSOCIATE EDITOR

N. Malamos

KEYWORDS

evapotranspiration;
hydrological modelling;
climate change; low flows;
uncertainty

1 Introduction

In the context of climate change, an increase in the frequency and intensity of extreme hydrological events, such as droughts, is expected according to the last report from the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC 2014) and to recent studies (e.g. Zhao *et al.* 2020). More severe and extended low-flow periods will affect the quantity and quality of water resources. These events especially impact water management, water availability and public safety.

Changes in the water cycle are expected to occur due to climate change, and key processes such as evapotranspiration (ET) will be affected (Ancil *et al.* 2012, Ricard and Ancil 2019). ET plays an important role in the hydrology of watersheds, in particular under warm and dry conditions involved in low-flow periods. Together with the lack of precipitation, ET impacts the water quantities available for runoff and thus directly influences the streamflow.

ET is the volume of water returned to the atmosphere and results from a combination of plant transpiration with water and soil evaporation. It is limited by actual atmospheric conditions (relative humidity, incoming radiation, wind speed, air temperature) and soil water availability. Potential evapotranspiration (PET) is the maximum volume of water apt to return to the atmosphere without considering any constraint on water availability (Oudin 2004, McMahon *et al.* 2016). As ET is a rather complex process and thus expensive to measure, empirical formulas are used to estimate PET, which can then be used in hydrological modelling to estimate actual evapotranspiration (AET) through PET and water availability computation at each time step. PET is either an input to hydrological models or is determined inside these models as

a function of meteorological input data. The PET process often absorbs errors during hydrological calibration in order to close the water balance and to obtain efficient simulated outflows (Beven 2001, Minville *et al.* 2014).

PET methods are generally separated into five groups (Xu and Singh 2002, Ancil *et al.* 2012): (1) water balance, (2) mass transfer, (3) combinatorial, (4) radiation-based and (5) temperature-based formulas. Oudin *et al.* (2005a, 2005b) studied 308 watersheds located in the United States, France and Australia. They concluded that simpler methods (radiation-based and temperature-based) are as effective as more complex methods (combinatorial) and that the performance of hydrological models can even be improved with simpler methods. But these studies were carried out under historical climate conditions and therefore did not take climate change into account.

While most PET formulas can perform similarly well under historical conditions, they have different climate sensitivities and therefore generate uncertainty regarding water availability under changed climate conditions, which needs to be assessed. Kingston *et al.* (2009) investigated the impact of a 2°C increase on PET change at global scale using six PET formulas and outputs from five global climate models (GCMs). All of the PET formulas predicted an increase in PET, but with differences among the results reaching more than 100% – up to 700% in some cases.

When carrying climate change impact studies in a hydrological modelling context, the key problem is to understand the sensitivity of PET in the uncertainty cascade from the hydroclimatic modelling chain (Kirchner 2006).

Seiller and Ancil (2016) provided some answers by analysing the sensitivity of 24 PET formulations (combinatorial,

temperature-based and radiation-based) using a 20-member ensemble of hydrological models on two contrasting watersheds in Canada and Germany. They found that the conditional calibration of the hydrological model to a PET formulation reduced the impact of PET as the parameter set compensated for differences in PET to close the mass balance. However, for both watersheds, the PET formulas clearly influence the streamflow projections under changed climate conditions and generate a large spread of responses reflecting their contribution to uncertainty along the hydroclimatic modelling chain. Seiller and Anctil (2016) conclude their paper with ideas for future research, namely regarding three elements that could lead to deeper understanding of PET's role in hydrological impact studies:

- (1) Perform a study on a larger scale, with a variety of different watersheds, to attempt to generalise the results;
- (2) Modify land-use and physical properties, rather than just the meteorological forcing data, during modelling; and
- (3) Integrate their framework into a larger study, including upstream elements such as climate models and bias correction methods that could give a better sense of PET sensitivity in the overall climate change impact assessment.

In this study, we attempt to extend Seiller and Anctil's (2016) work by targeting points 1 and 3. Point number 2, while interesting from a scientific point of view, is much more complex to implement and is not compatible with an approach using lumped modelling.

At mid latitudes, ET represents on average half of annual precipitation depth, and in tropical and more

arid environments, this proportion can reach values close to 100%. Consequently, the main objective of this study is to evaluate the contribution of PET formulas to uncertainty in the full modelling chain of low flows in the context of climate change, in Canadian, US and Mexican watersheds. Secondary objectives include better assessing the risks during low-flow periods and evaluating the trends in hydrological indices such as low flows in the changing climate.

2 Study area and data

Water availability greatly varies in North America depending on the local climate and topography. While most of Canada has access to good-quality water in large quantities, several North American regions are subject to water stresses. Since PET is directly related to watershed climatic conditions, this study makes use of a large quantity of watersheds from different climatic zones, thus increasing the robustness of the results.

The study area encompasses 2080 watersheds of North America, including 235 watersheds in Canada, 1825 watersheds in the United States and 20 watersheds in Mexico. The locations of the watersheds are presented in Fig. 1.

The data required for this study are the watershed area, daily precipitation, daily maximum and minimum temperatures and daily outflows. The reference period for the data is from 1 January 1950 to 31 December 2010. Hydrometeorological data come from the « Hydrometeorological Sandbox – École de technologie supérieure » (HYSETS) database (Arsenault *et al.* 2020). Some details of the watershed characteristics are listed in Table 1, such as average total annual precipitation (mm),

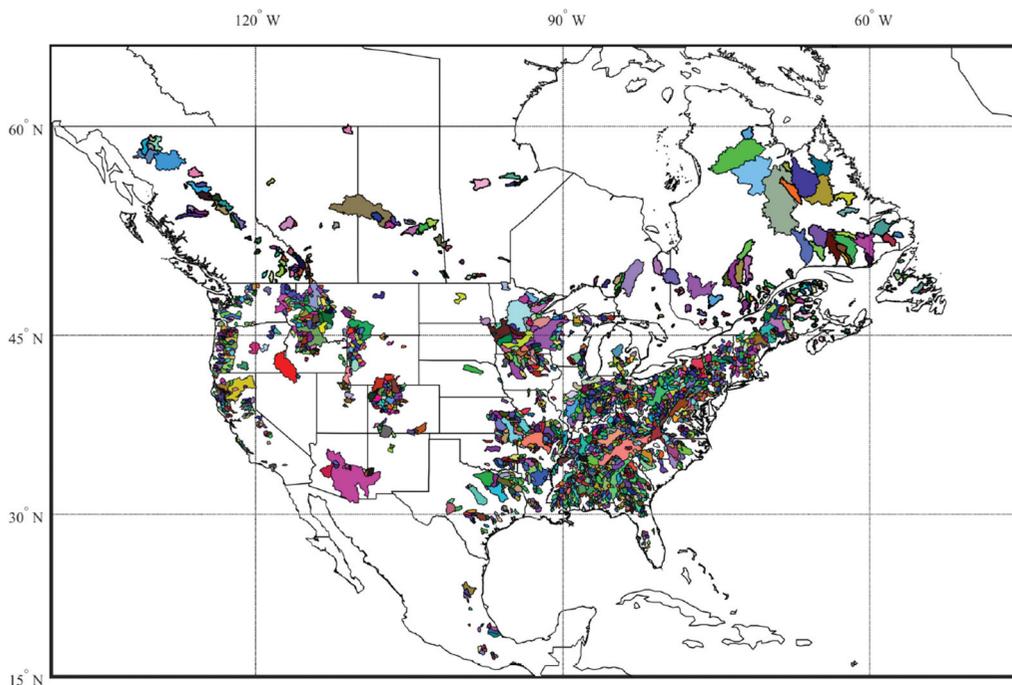


Figure 1. Location of the 2080 watersheds in North America.

Table 1. Statistics from the 2080 watersheds in this study.

	Area (km ²)	Precipitation (mm)	Temperature (°C)	Streamflow (m ³ /s)	Longitude (°)	Latitude (°)
Minimum	303	270	-7.3	0.065	-132.2334	16.9867
25 th percentile	808	900	4.7	10.73	-105.8281	35.8094
Median	1480	1098	9.9	21.17	-87.8997	40.1265
75 th percentile	3773	1287	14.5	52.19	-81.8977	44.2949
Maximum	162 580	4336	22.7	1888	-54.1609	59.7833

average annual temperature (°C) and average annual streamflow (m³/s).

3 Methodology

The methods used in this study at each step of the hydroclimatic modelling chain are presented in this section. Figure 2 presents a flowchart of the methodology. First, the hydrological models used to simulate low flows in each watershed are described along with the different PET formulas implemented in the modelling chain. Subsequently, the climate models and bias correction methods that were used are presented, followed by the PET and low-flow metrics that were analysed in current and future climates.

3.1 Potential evapotranspiration formulas

The simplest PET formulas are from the temperature-based and radiation-based categories, since they require less input data than in the case of the combinatorial formulas. The use of simple PET formulas requiring less data allows us to take into account a large number of watersheds, that are not all equipped with measuring instruments, to feed more complex formulas. In this study, 10 PET formulas are used: five from the temperature-based category and five from the radiation-based category. Temperature-based methods depend on temperature to calculate PET, while radiation-based methods use the principle of energy conservation to calculate PET (Xu and Singh 2002).

The inputs for the temperature-based formulas are maximum and minimum temperatures; sometimes Julian day and latitude are also required, to determine daylight duration. In addition to temperature, radiation-based formulas need information on extraterrestrial radiation. While temperature can be

easily measured, the same cannot be said for the radiation reaching the Earth. Consequently, extraterrestrial radiation is calculated from the solar declination which depends on the latitude and Julian day. PET formulas used in this study are defined in Table 2. Formulas 1–5 are temperature based and formulas 6–10 are radiation based.

In these formulas, DL represents daylight duration (h/d), determined using the date and the latitude; T_m represents the daily mean air temperature (°C); ω represents the sunset angle (rad), determined from the date; T_{max} and T_{min} are the daily maximum and minimum air temperatures, respectively (°C); R_e represents the extraterrestrial radiation (MJ/m²d), determined from the date and latitude; and λ is the slope of the vapour pressure curve, determined using T_m and ρ , which is the water density (kg/L). PET values are in mm/d.

3.2 Hydrological modelling

To quantify the uncertainty of the hydroclimatic modelling chain components, it is necessary to use more than one hydrological model. Given the number of watersheds taken into account, data availability, computational time and data storage needed, lumped models were preferred to distributed models in this study. Lumped models have flexible structures, so they are able to adapt to different hydroclimatic conditions through empirical and parameterised equations. Smith *et al.* (2012) demonstrated that lumped models can have generally similar performance to distributed models for the simulation of streamflows at the outlet of watersheds. The two hydrological models used in this study are GR4J (Génie Rural à 4 Paramètres – Journalier) and HMETS (Hydrological Model of the École de technologie supérieure). Both models give daily flows. While these models are both lumped and conceptual, they differ in their complexity and their internal

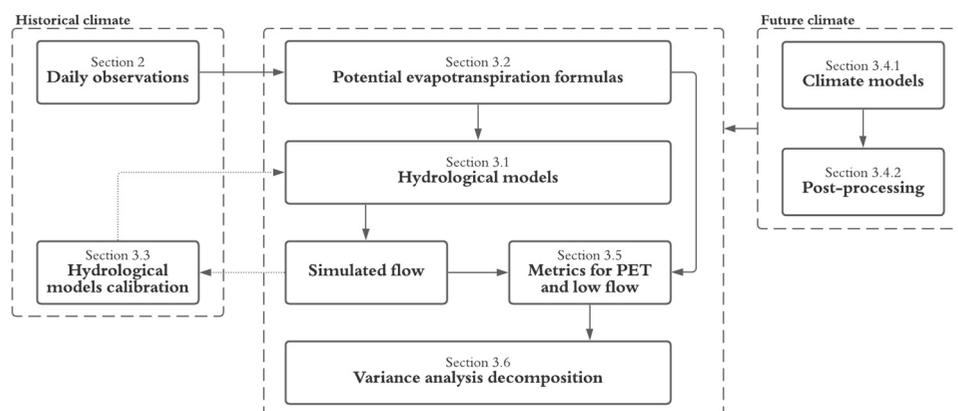


Figure 2. Flowchart of the project methodology.

Table 2. Definition of the 10 PET formulas.

Name (reference)	Formulas
1. Blaney and Criddle (BC) (Blaney and Criddle 1950)	$PET_{BC} = 0.825 \left(100 \frac{DL}{365 \times 12}\right) (0.46T_m + 8.13)$
2. Hamon (H) (Hamon 1960)	$PET_H = \left(\frac{DL}{12}\right)^2 \exp\left(\frac{T_m}{16}\right)$
3. Hydro-Quebec (HQ) (Fortin 2000)	$PET_{HQ} = 0.029718(T_{max} - T_{min}) \exp(0.019\left(\frac{2}{5}(T_{max} + T_{min}) + 64\right))$
4. Kharrufa (K) (Kharrufa 1985)	$PET_K = 0.34 \left(100 \frac{DL}{365 \times 12}\right) T_m^{1.3}$
5. Mohye (M) (Fortin and Turcotte 2006)	$PET_M = \frac{4.088}{\pi} \omega * \exp\left(\frac{17.3T_m}{238 + T_m}\right)$
6. Baier and Robertson (BR) (Baier and Robertson 1965)	$PET_{BR} = 0.157T_{max} + 0.158(T_{max} - T_{min}) + 0.019R_e - 5.39$
7. Hargreaves and Samani (HS) (Hargreaves and Samani 1985)	$PET_{HS} = 0.0023 \frac{R_e}{\lambda \rho} \sqrt{(T_{max} - T_{min})(T_m + 17.8)} 1000$
8. Jensen and Haise (JH) (Jensen and Haise 1963)	$PET_{JH} = 1000 \frac{R_e}{\lambda \rho} \frac{T_m}{40}$
9. McGuinness and Bordne (MB) (McGuinness and Bordne 1972)	$PET_{MB} = 1000 \frac{R_e}{\lambda \rho} \frac{T_m + 5}{68}$
10. Oudin (O) (Oudin <i>et al.</i> 2005b)	$PET_o = 1000 \frac{R_e}{\lambda \rho} \frac{T_m + 5}{100}$

structures, as described in the following sections. Both have been used in many hydrological and climate change impact studies (Brigode *et al.* 2013, Seiller and Anctil 2014, Troin *et al.* 2018, Zhao *et al.* 2020).

3.2.1 GR4J hydrological model

The GR4J hydrological model (Perrin *et al.* 2003) is a lumped model with four calibration parameters. Since GR4J does not take into account processes of snow accumulation and melt, CemaNeige (Valéry *et al.* 2014), a snow model with two calibration parameters, is used jointly with GR4J to simulate these snow processes. The internal structure of GR4J is based on two reservoirs: a production reservoir and a routing reservoir. Two unit hydrographs transform the water available for runoff into streamflow. Outflow from the first unit hydrograph (90% of the runoff water) first updates the level of the routing reservoir, which then contributes to streamflow through a relationship based on the reservoir level. Outflow from the second unit hydrograph (the remaining 10%) contributes directly to streamflow. CemaNeige's inputs are the daily mean temperature and daily snowfall amount, and the output is the simulated snowmelt (snow water equivalent). GR4J's inputs are the watershed area, total daily precipitation (including the simulated snowmelt from CemaNeige) and PET. The outputs of GR4J are the daily simulated streamflows.

3.2.2 HMETS hydrological model

The HMETS hydrological model (Martel *et al.* 2017) is also a lumped model, but it has 21 calibration parameters due to its more complex structure relative to GR4J. HMETS' inputs are watershed area, daily temperatures (minimum and maximum), daily precipitation (solid and liquid, in water equivalent) and PET.

HMETS is based on two reservoirs: the vadose zone and the phreatic zone. The vadose zone provides water needed for hypodermic flow and groundwater recharge, depending

on the reservoir water level, while a portion of the phreatic zone water allows groundwater flow. When a reservoir has reached its maximum capacity, water surplus is added to delayed runoff. The watershed streamflow is determined as a function of four horizontal components: (1) surface runoff, (2) delayed runoff, (3) hypodermic flow and (4) groundwater flow. Two unit hydrographs are used to transfer surface water and delayed runoff to streamflow.

3.3 Hydrological model calibration

Hydrological model calibration was performed automatically using the Shuffled Complex Evolution algorithm developed at the University of Arizona (SCEUA) (Duan *et al.* 1994). The maximum number of iterations is set to 10 000 in this study, following Arsenault *et al.* (2013). The calibration objective function is the Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) (Nash and Sutcliffe 1970), described in Equation (1). This objective function is frequently used in hydrology.

NSE measures the level of agreement between observed and simulated streamflows for the calibration period. The NSE value is between $-\infty$ (bad performance) and 1 (perfect performance). An NSE value of 0 means the hydrological model performs as well as the mean observed flow would if it were used as a predictor.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_{sim}^t - Q_{obs}^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_{obs}^t - Q_M)^2} \quad (1)$$

where t is the simulation time step (d), $Q_{sim,t}$ represents the simulated streamflow for day t (m^3/s), $Q_{obs,t}$ represents the observed streamflow for day t (m^3/s), Q_M is the mean of the observed streamflows (m^3/s) and T is the total number of calibration time steps.

Calibration for each watershed is performed on the entire time period of available data. Arsenault *et al.* (2018) conclude

that it is advantageous to calibrate on the longest possible period since in split-sample calibration and validation, data that could improve the calibration quality is omitted from the parameter set. In the context of climate change, model calibration quality impacts robustness and transferability in future conditions, justifying the need to preserve as much information as possible in the parameter set. A 2-year spin up period was used in the calibration process.

3.4 Climate change data

3.4.1 Climate models

Temperature and precipitation outputs from climate model projections are used to feed the hydrological models and PET formulas. The eight GCMs used in this study come from the Coupled Model Intercomparison Project – Phase 5 (CMIP5) ensemble (Taylor *et al.* 2012) and are presented in Table 3. The climate models were selected to cover the range of equilibrium climate sensitivity (ECS) of all the climate models available in the CMIP5 set (IPCC 2014). The ECS is the change in global and annual mean air temperature (°C) with double the atmospheric concentration of carbon dioxide of the pre-industrial period (IPCC 2014). Simulations with representative concentration pathways (RCP) 4.5 and 8.5 are taken into account in this study to analyse the impacts of greenhouse gas emissions scenario. The reference period is from 1 January 1971 to 31 December 2000, and the future periods are from 1 January 2041 to 31 December 2070 (horizon 2050) and 1 January 2071 to 31 December 2100 (horizon 2080).

3.4.2 Post-processing

Post-processing is needed to correct the systematic biases of climate models over the reference period. During post-processing, there is an underlying hypothesis that the biases are stationary, which means that their statistical properties are temporally invariable. This allows the correction of future climate data using the same scale as corrections required in the reference period. Post-processing methods can be separated into two categories: change factor approaches and bias correction approaches (Chen *et al.* 2013). In this study, two post-processing methods are used, to represent the two categories. These are, respectively, daily scaling (DS) and daily bias correction (DBC).

3.4.2.1 Daily scaling.

The DS method (Chen *et al.* 2013) is a quantile-based method, applied at a monthly time scale. Scaling factors are determined for each quantile of the distribution. The scaling factors represent the climate change signal projected by a climate model between the future and reference periods. DS is a change-factor method (delta change) because scaling factors are applied to observed meteorological data (Equations 2 and 3).

$$T_{fut,j} = T_{obs,j} + (T_{GCM,fut,Q} - T_{GCM,ref,Q}) \quad (2)$$

$$P_{fut,j} = P_{obs,j} * (P_{GCM,fut,Q}/P_{GCM,ref,Q}) \quad (3)$$

$T_{obs,j}$ and $P_{obs,j}$ represent observed temperature and precipitation on day j (°C and mm); $T_{fut,j}$ and $P_{fut,j}$ represent corrected

Table 3. Description of the 8 GCMs from CMIP5.

GCM	Year	Meteorological centre	Climate sensitivity	Spatial resolution (°)
CanESM2	2010	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	3.7	2.8 × 2.8
CNRM-CM5	2010	Centre National de Recherches Météorologiques, Centre Européen de Recherche et Formation Avancées en Calcul Scientifique	3.3	1.4 × 1.4
CSIRO-Mk3.6.0	2009	Queensland Climate Change Centre of Excellence and Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation	4.1	1.8 × 1.8
GFDL-ESM2M	2011	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	2.4	2.5 × 2.0
GISS-E2-R	2011	NASA Goddard Institute for Space Studies USA	2.1	2.5 × 2.0
IPSL-CM5A-LR	2010	Institut Pierre Simon Laplace	4.1	3.75 × 1.8
MIROC5	2010	University of Tokyo, National Institute for Environmental Studies and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology	2.7	1.4 × 1.4
MIROC-ESM	2010	University of Tokyo, National Institute for Environmental Studies and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology	4.7	2.8 × 2.8

temperature and precipitation on day j ; $T_{GCM,fut,Q}$ and $P_{GCM,fut,Q}$ represent future temperature and precipitation from a climate model according to the month quantile and $T_{GCM,ref,Q}$ and $P_{GCM,ref,Q}$ represent temperature and precipitation for the reference period from the climate model according to the month quantile.

3.4.2.2 Daily bias correction. The DBC method (Chen *et al.* 2013) combines the daily translation method (DT) (Mpelasoka and Chiew 2009) and the local intensity scaling method (LOCI) (Schmidli *et al.* 2006). First, LOCI is applied to correct the occurrence of precipitation, to maintain the same frequency of rainy days in data from climate models as in the observed data. Next, DT is applied to correct temperature distributions and quantities of precipitation according to the quantiles. The DBC method is a bias correction method because scaling factors are applied to future data from climate models. The DT method is described in Equations (4) and (5). The definitions of variables are the same as those for Equations (2) and (3).

$$T_{fut,j} = T_{GCM,fut,j} + (T_{GCM,ref,Q} - T_{obs,Q}) \quad (4)$$

$$P_{fut,j} = P_{GCM,fut,j} * (P_{GCM,ref,Q}/P_{obs,Q}) \quad (5)$$

3.5 Metrics for PET and low flows

The combinatorial nature of this study generates a lot of data, because of the multiple (1) watersheds, (2) PET formulas, (3) hydrological models, (4) climate models, (5) post-processing methods and (6) greenhouse gas concentration scenarios – all of which are duplicated for the two future periods. To simplify the data analysis, this study focuses on five metrics.

3.5.1 PET metrics

To compare the different PET formulas, the mean annual PET (PET_m) and the maximum value of PET_m (PET_{max}), both in mm/d, are analysed.

3.5.2 Low-flow metrics

Characteristics of low-flow periods are different across North America because of the climate diversity. Nordic watersheds have low flows during winter when solid precipitation builds a snowpack. These winter periods are not investigated in this study since PET values are not significant when temperature is below freezing. Therefore, the chosen metrics are only computed when the daily minimum temperature is above 0°C. Furthermore, as the warm periods are not constant across the continent and subject to change in the future, the low-flow periods are therefore not identified according to fixed dates. For low-flow periods, the three metrics below are taken into account (Cloutier *et al.* 2007, CEHQ 2015). The definition of each metric is followed by a description of its usual function (Cloutier *et al.* 2007).

- (1) 7Q2 is the average low-flow value over 7 consecutive days with a 2-year return period (m^3/s). 7Q2 is the low flow that must be maintained to protect aquatic life

from conventional contaminants (suspended solids, phosphorus and biochemical oxygen demand) and fecal coliforms.

- (2) 7Q10 is the average low-flow value over 7 consecutive days with a 10-year return period (m^3/s). 7Q10 is the low flow that must be maintained to protect aquatic life from toxic contaminants.
- (3) 30Q5 is the average low-flow value over 30 consecutive days with a 5-year return period (m^3/s). 30Q5 is the low flow that must be maintained to protect drinking water supplies, and water consumption by aquatic organisms and by terrestrial wildlife.

The exceedance probability of low flows is based on the Log-Pearson type III law. The first 2 years of simulation are not considered for the calculation of low-flow metrics due to model spin-up time.

3.6 Uncertainty

To investigate the uncertainty in the PET formulas, a variance decomposition analysis (Déqué *et al.* 2007, Troin *et al.* 2018) was used. This statistical analysis evaluates the variance of each component of the hydroclimatic modelling chain and all possible interactions between them. The variance decomposition analysis was performed on all three low-flow metrics (7Q2, 7Q10 and 30Q5).

In this study, the hydroclimatic modelling chain contains five components: the PET formula (E), hydrological model (H), climate model (C), post-processing method (P) and RCP (R). Several component combinations are possible, with 10 possibilities for E, two for H, eight for C, two for P, and two for R, for a total possible number of 640 combinations. This analysis is made independently for each watershed. The variance of one component (for example, PET formula – E) is decomposed as in Equation (6):

$$\begin{aligned} V_E = & E + EH + EC + EP + ER + EHC + EHP \\ & + EHR + ECP + ECR + EPR + EHCP \\ & + EHCR + ECPR + EHCPR \end{aligned} \quad (6)$$

4 Results

4.1 Hydrological model calibration

Both hydrological models were calibrated using each of the 10 PET formulas. The performance of each hydrological model calibration is presented in Fig. 3. For each hydrological model and PET formula combination, the boxplots show the NSE distribution for the 2080 watersheds. The two hydrological models have a similar median NSE performance of 0.77 for GR4J and 0.76 for HMETS.

Although the median performance is similar, HMETS has a more constant performance across PET formulas. HMETS includes a calibration scaling parameter for PET. This parameter helps HMETS better adapt to different PET values, which explains the more constant performance of this model. With only four calibration parameters, GR4J does not have

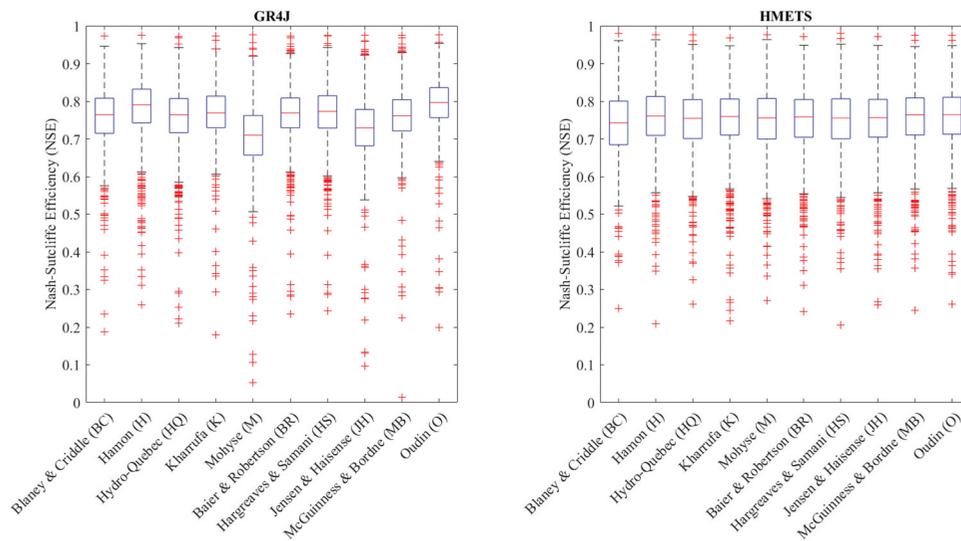


Figure 3. Results of the hydrological model calibrations for the different potential evapotranspiration (PET) formulas.

such a PET scaling parameter, so this model is more responsive to different PET values; instead, it uses a generic overall mass-balance term to simulate inter-watershed transfers that is constant in time. Also, GR4J boxplots in Fig. 3 have more extended outliers.

In Fig. 3, PET formulas are identified as BC (Blaney and Criddle), H (Hamon), HQ (Hydro-Quebec), K (Kharrufa), M (Mohyse), BR (Baier and Robertson), HS (Hargreaves and Samani), JH (Jensen and Haise), MB (McGuinness and Bordne) and O (Oudin).

Further analysis reveals differences among the three countries (not shown). For Canada, the medians are 0.81 for GR4J and 0.79 for HMETs. For the United States, the NSE median is 0.76 for both hydrological models. Finally, the NSE values for Mexican watersheds are systematically weaker for the two hydrological models. GR4J has more difficulty in adapting to the Mexican hydrology, with a median NSE of 0.33, whereas HMETs fares a little better, with a median NSE of 0.51. In

Mexico, the transferability to future conditions is more questionable due to the lower calibration performance for the two hydrological models. The low reliability of hydrological databases explains most of the reduction in performance for the Mexican watersheds.

4.2 Analysis of parameter sensitivity to PET

To evaluate the parameter sensitivity of the hydrological models to PET formulas, parameters of two watersheds were analysed: (1) a nordic watershed located in Quebec (Canada) and (2) a southern watershed located in Florida (United States). These watersheds were chosen as they represent two types of hydroclimatic conditions.

Figure 4 shows the boxplots of the normalised parameter values for the HMETs and GR4J hydrological models. The normalization of the parameters was performed according to

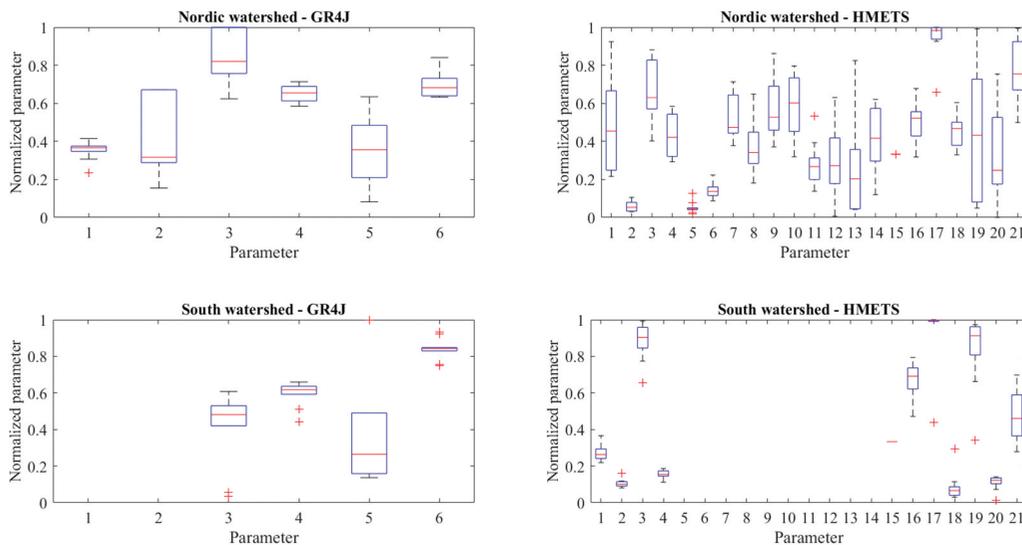


Figure 4. Analysis of parameter sensitivity to potential evapotranspiration (PET) formulas.

the maximum and minimum boundary values of each parameter. For GR4J, parameters 1 and 2 are those of the CemaNeige snow module, and parameters 3, 4, 5 and 6 are those of the main GR4J model. Of course, in the case of the southern watershed, the snow parameters are not included in the analysis since no snow-related processes are present in this watershed (parameters 1 and 2 for GR4J), and parameters 5–14 for HMETs). Figure 4 shows that varying the PET formula influences the values of the parameters. Overall, it can be seen that the parameter values show more variability in the case of the nordic watershed than in the case of the southern watershed. This can likely be explained by: (1) the higher number of parameters and hence the higher possible equifinality in the case of the nordic watershed; (2) the higher dispersion of mean annual PET cycles from the different PET formulas, again in the case of the nordic watershed.

4.3 Impacts and trends in future climate

To evaluate the impacts of climate change on PET and low flows, the hydroclimatic modelling chain described above was applied to each watershed. This resulted in 640 values for each metric, covering the uncertainty of all components of the modelling chain.

The changes between reference period and future periods, for the different metrics, are expressed in terms of relative delta (Δ) (Equation 7):

$$\Delta_i = \frac{V_{i,fut} - V_{i,ref}}{V_{i,ref}} \quad (7)$$

V_i represents the value of metric i and the indices *ref* and *fut* represent, respectively, the reference period (1971–2000) and

the future period (horizon 2050 or horizon 2080). The results shown in the following figures are the median relative delta from simulations using the two hydrological models, the eight climate models and the two post-processing methods.

Figure 5 shows the relative delta of the PET_m metric according to the different PET formulas for the 2071–2100 horizon and RCP 8.5. Every point in the figure represents the centroid of a watershed.

All PET formulas show an increase in ET across North America. This increase is consistent with the projected temperature increase. The intensity of the change is, however, spatially variable and highly dependent on the PET formula. The Kharrufa (K) and Hydro-Quebec (HQ) formulas give particularly large increases in PET. There does not seem to be a correlation between formulas of the same group (temperature-based or radiation-based), but some formulas can be grouped because they have the same behaviour, such as (1) Blaney & Criddle (BC) and Hargreaves & Samani (HS); (2) Hamon (H) and Mohyse (M); or (3) Jensen & Haise (JH), McGuinness & Bordne (MB) and Oudin (O).

For all of the PET formulas, the regions where PET increases are the highest are located in Canada and in the US Rocky Mountains, while the regions where PET increases are the lowest are located in Mexico and in the Southeastern United States. For the PET_{max} metric, the results (not shown) are similar, with the same trends.

Subsequently, Fig. 6 presents the results of relative delta between reference and future periods for the 7Q2 low-flow metric. The future conditions are the same as in Fig. 5, i.e. for the 2080 horizon and RCP 8.5.

When looking at the results according to the broad regions identified from Fig. 5, there is more intra-region variability for the

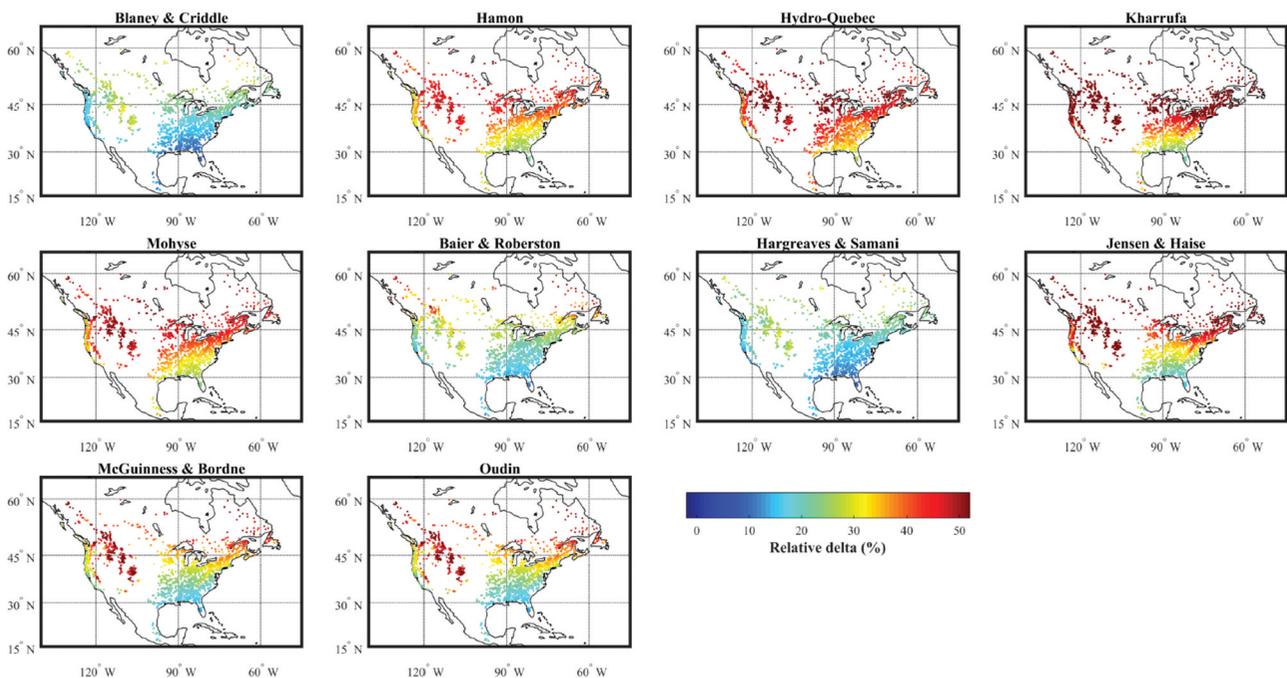


Figure 5. Relative delta between the reference period and the 2080 horizon for the PET_m metric with RCP 8.5.

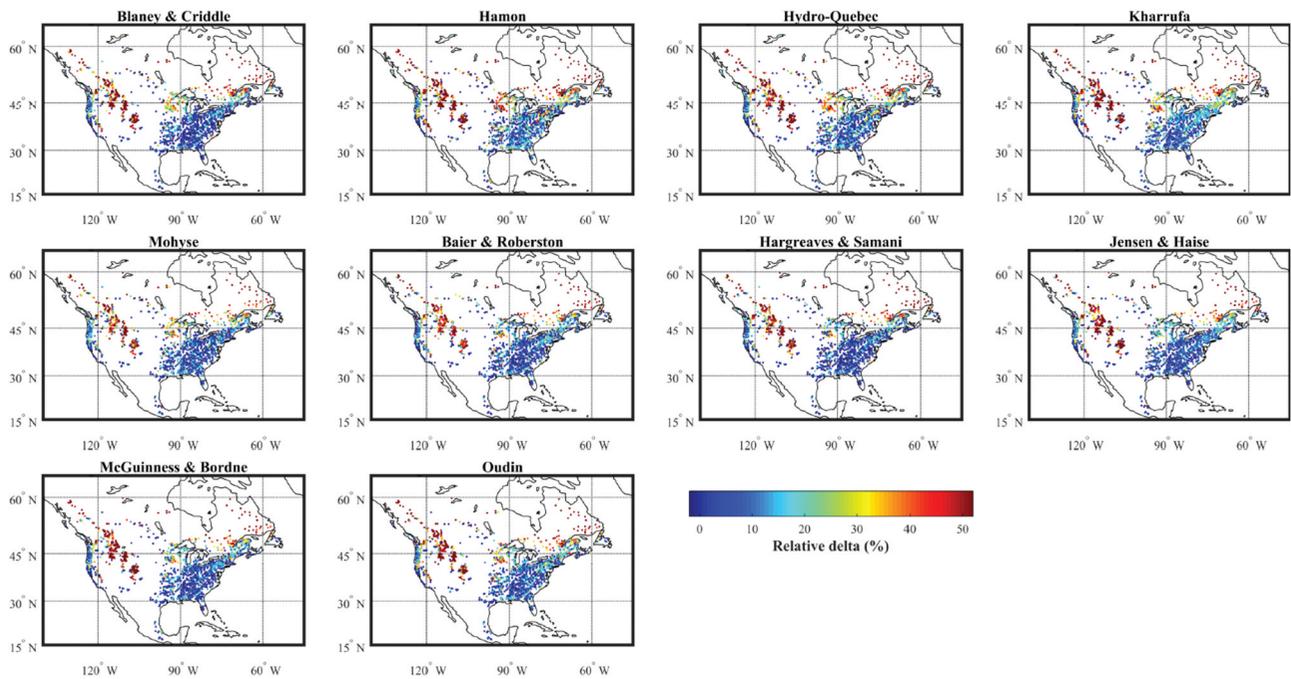


Figure 6. Relative delta between the reference period and the 2080 horizon for the 7Q2 metric with RCP 8.5.

low-flow metrics than for the PET metrics. Contrary to the PET metrics, there is not much difference between the results obtained using the 10 PET formulas (Fig. 6). However, an important component of spatial variability remains, and regions where changes will be more important are again located in Canada and in the US Rocky Mountains, where the largest temperature increase is expected (Joyce *et al.* 2018, Martel 2019). The 7Q2 metric shows a general decreasing trend over the whole territory.

The variability between PET formulas is attenuated by hydrological models. For example, a formula that gets extreme PET

metric values, such as Kharrufa (K), does not necessarily have more extreme values for low-flow metrics. This can likely be explained by the fact that there is not enough water availability to fulfil PET.

Figures 7 and Figures 8 show results for the 7Q10 and 30Q5 low-flow metrics, respectively, for the 2080 horizon and RCP 8.5. The trends of these two metrics are similar to those of the 7Q2 metric, but the intensity of changes is increased. Compared to current conditions, 30Q5 shows greater changes than 7Q2 and 7Q10 metrics.

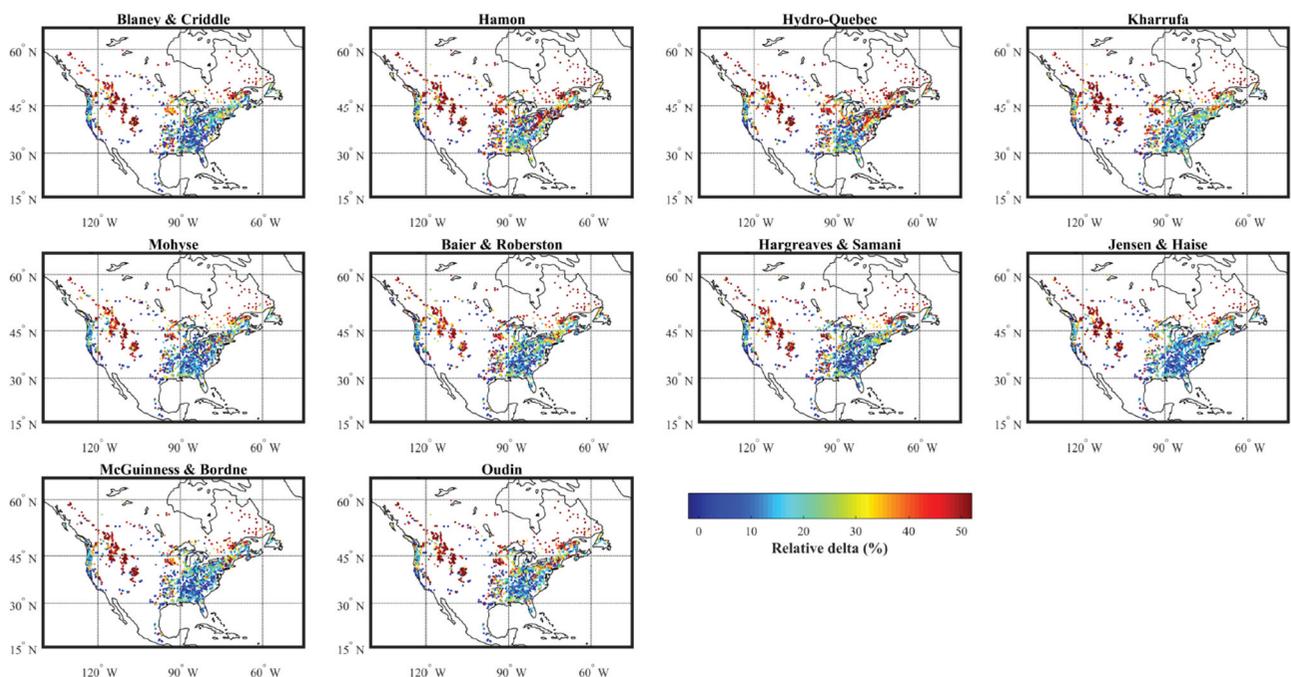


Figure 7. Relative delta between the reference period and the 2080 horizon for the 7Q10 metric with RCP 8.5.

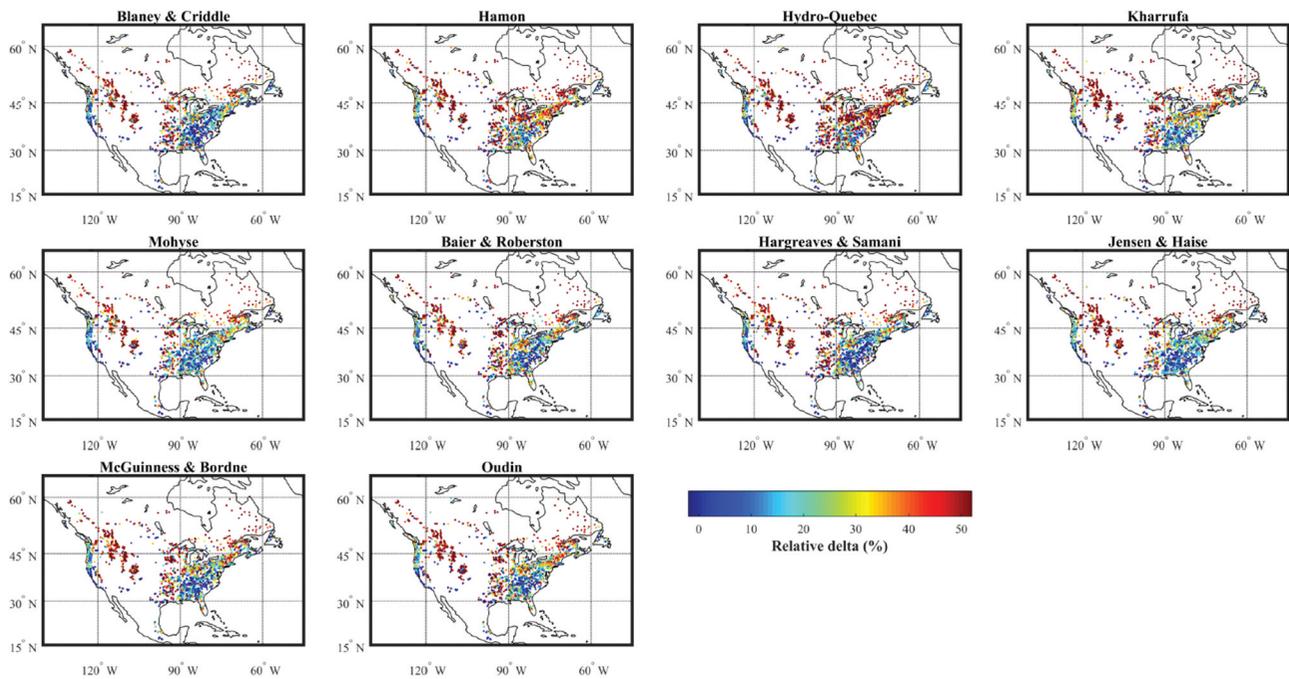


Figure 8. Relative delta between the reference period and the 2080 horizon for the 30Q5 metric with RCP 8.5.

4.4 Uncertainty in hydroclimatic modelling

Variance decomposition analysis was carried out on the entire hydroclimatic modelling chain. This analysis was performed on the three low-flow metrics (in m^3/s).

Figure 9 shows the results of the variance decomposition analysis for each low-flow metric, for the future period from 2071 to 2100 (2080 horizon). Boxplots in Fig. 9 show the variance distribution for the 2080 watersheds and for each component of the hydroclimatic modelling chain. The 2050 horizon results are similar and are not shown.

Results shown in Fig. 9 are the total variance of each component, so they represent the sum of the first-order variance of the component and the variances of each possible

higher-order interaction with other components. This explains why the total variance of the five components sums to more than 100%.

For the 7Q2 metric, the hydrological model (H) has the largest variance, with a median of 69.1%, followed by the PET formula (E) with a median of 56.4%. Variances of climatic components are much smaller, with medians of 6.5% (C), 1.0% (P) and 1.7% (R). Results for the 7Q10 metric are similar, with medians of 67.8% (H), 47.3% (E), 10.7% (C), 2.5% (P) and 3.2% (R). An analysis of the 30Q5 metric shows different results. While the median variance of the PET formula remains similar (48.3%), the hydrological model (H) variance decreases to a median value of 34.0% and variances of climatic components increase, with

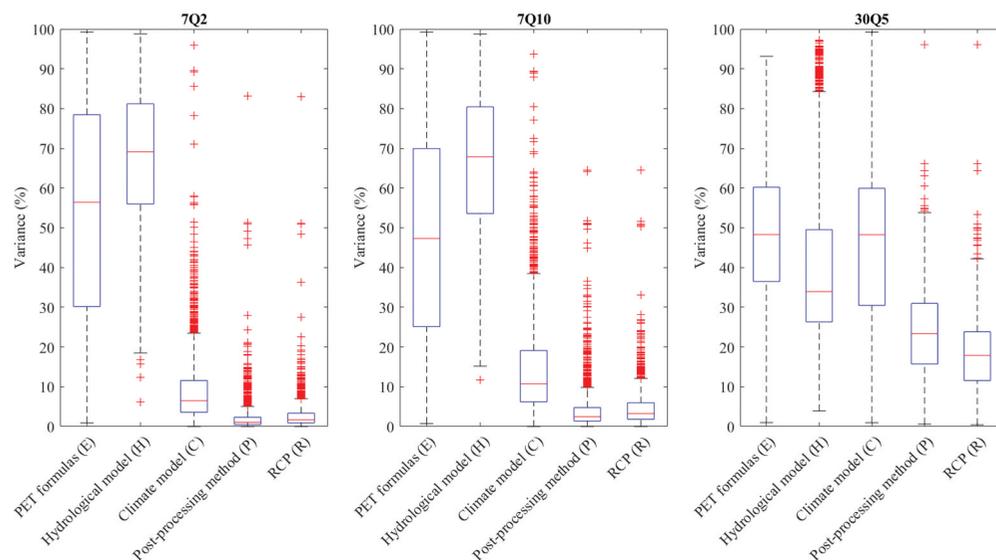


Figure 9. Variance decomposition analysis for the 7Q2, 7Q10 and 30Q5 low-flow metrics (2080 horizon).

medians of 48.8% (C), 23.3% (P) and 17.9% (R). In this case, the climate model is the component with the largest variance. Over a longer period, such as 30 d in this case, it is expected that the climate uncertainty will have a more important role.

An important point is the decomposition of total variances. Figure 10 shows the first- and second-order variances of the 7Q2 metric, for the future period from 2071 to 2100 (2080 horizon). For this metric, while the median total variances are 56.4% for E and 69.1% for H, the decomposition of these percentages reveals subtle yet interesting findings. The PET formula (E) median first-order variance is only 22.7%, and the hydrological model (H) median first-order variance is 32.5%, while the median variance of the second order interaction E–H is 27.6%. The rest of the variance comes from the other interactions with C, P and R. Therefore, the majority of the total PET variance is attributable to the interaction between the PET formula and the hydrological model.

Table 4 shows the percentages of the variance decomposition of the various components for the three low-flow metrics. The interaction between E and H is significant in the total variance. For the 30Q5 metric, the results are lower because of the increased importance of climatic components in the total variance.

5 Discussion

5.1 Uncertainty from hydroclimatic chain components

In accordance with the results of Bae *et al.* (2011), hydrological components (PET formula and hydrological model) bring more uncertainty than do climatic components of the hydroclimatic modelling chain. Indeed, the structural uncertainty of hydrological modelling dominates the climate model uncertainty.

This study shows the advantage of taking into account several models and methods to quantify the uncertainty,

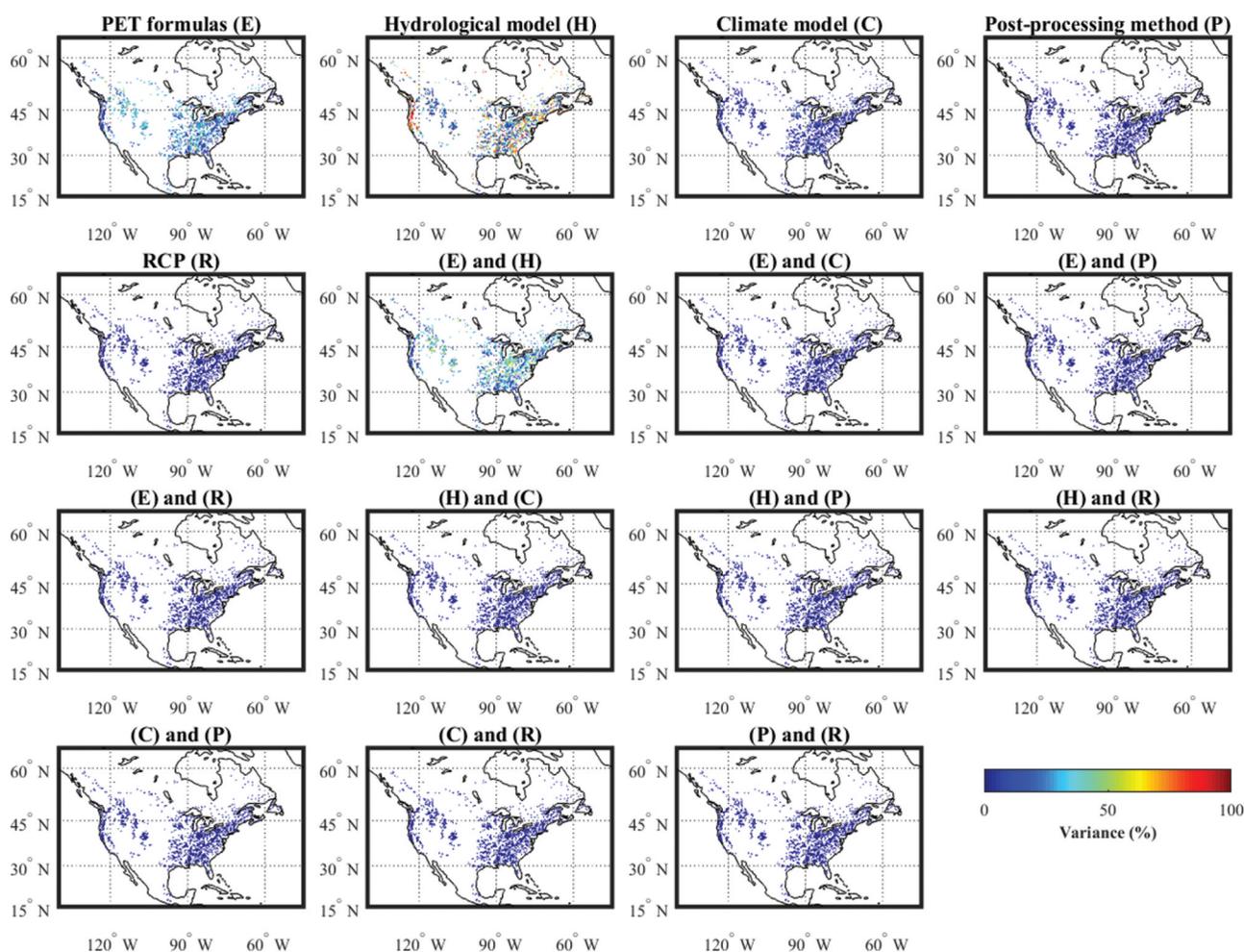


Figure 10. First- and second-order interactions of the variance decomposition analysis of the 7Q2 low-flow metric (2080 horizon).

Table 4. Decomposition variance for PET formulas (E) only, hydrological model (H) only and interaction between E and H.

	PET formulas (E)	Hydrological model (H)	Interaction between E and H
7Q2	22.7%	32.5%	27.6%
7Q10	17.9%	35.9%	21.6%
30Q5	16.4%	5.53%	9.53%

which is consistent with the findings of Kay and Davies (2008), Minville *et al.* (2008), and Giuntoli *et al.* (2015). Although it is relevant to include several elements in each of the components of the hydroclimatic modelling chain, this must be done judiciously to avoid including elements which, by their poor performance or too-divergent behaviour, could generate false uncertainty.

5.2 The evaporation paradox

The results of this study show that increased ET is expected to modify the low-flow behaviour of rivers. However, recent studies have shown that ET levels have diminished even though the atmosphere is more energetic, is hotter and can theoretically contain more water. This has been termed the “Evaporation Paradox,” and was discovered by analysing lysimeter data over multiple regions of the world and verifying that pan evaporation has shown a decreasing trend while temperature trends have been increasing (Chattopadhyay and Hulme 1997, Quintana-Gomez 1998, Moonen *et al.* 2002, Asanuma and Kamimera 2004, Liu *et al.* 2004, Roderick and Farquhar 2004, 2005, Tebakari *et al.* 2005, Burn and Hesch 2007, Cong *et al.* 2009, Breña-Naranjo *et al.* 2017). Some proposed mechanisms to explain these results relate to increases in cloud cover and aerosols that reduce incoming radiation, smaller vapour pressure differentials due to more humid air, and decreasing wind speeds (Cong *et al.* 2009). In the case of this study, the PET methods used in hydrological modelling do not take into account any of these phenomena. It is therefore likely that some biases exist in the absolute changes estimated in low flows in the course of this study. However, it is also important to note that the hydrological models can compensate by having their model parameters adjusted to some extent during calibration to preserve streamflow.

5.3 Limitations

This study has some limitations that influence the results. In North America, the hydroclimatic diversity allows drawing broader conclusions and obtaining a better estimate of the spatial distribution of uncertainty. On the other hand, it can be tricky to implement a method on the entire study area and to generalise from the conclusions with so many differences in hydrology and climate. The choice of a PET formula or a hydrological model can satisfy some conditions for the Canadian climate but may be less well-adapted for southern climates. Taking into account that the global climate is going to change, it is important to think about the transferability of the methods currently used. Working with a large number of watersheds, as is done in the present study, makes it possible to group them together and to distinguish the results by country or to identify spatial patterns according to future climate and PET changes.

The use of only two lumped and conceptual hydrological models is another limitation of this project. Using more hydrological models would increase the reliability of the uncertainty analysis of this component in the hydroclimatic modelling chain. Furthermore, the use of more physical and distributed

models would provide the opportunity to better take into account evaporation and transpiration processes inside the hydrological model and their impacts on simulated streamflows. The choice to use simpler hydrological models mainly results from the large number of watersheds in this study as well as the increased amount of input data necessary to drive distributed and more physically based models.

Only one calibration method for hydrological modelling was used in this study. Since NSE gives high flows more weight than low flows during calibration (Krause *et al.* 2005, Gupta *et al.* 2009), this is probably not the best objective function in this case. It would be beneficial to explore other methods, such as calibrating only during low-flow periods, calibrating during summer time or using another objective function. On the other hand, NSE was used for all calibrations in this study, so they are equal and comparable even if they are not perfect for low-flow periods. The results of the variance decomposition and uncertainty attribution, described above, should therefore not be impacted by this choice. Consequently, the objective function plays a less critical role in the quantification of uncertainty of the other components in the hydroclimatic chain. Also, the results can be compared with other studies that use this objective function, such as that of Seiller and Anctil (2016).

6 Conclusion

This study investigated the effects of uncertainty in the components of the hydroclimatic modelling chain on future simulated PET and low flows. The studied area covers a wide domain, comprising 2080 watersheds spread over Canada, the United States and Mexico.

The hydroclimatic diversity present in the North American territory therefore allows to broaden our conclusions and adds robustness to the results. The following components of the hydroclimatic modelling chain were taken into account: RCPs 4.5 and 8.5, eight global climate models, two post-processing methods, three lumped hydrological models, and 10 (temperature- or radiation-based) PET formulas; furthermore, the future horizons 2050 and 2080 were considered. All of the simulation results agree on a PET increase in all of the studied watersheds, with greater increases in Canada and in the US Rocky Mountains where higher increases in temperature are also expected. The intensity of the change is also highly dependent on the PET formula.

Three low-flow metrics, 7Q2, 7Q10 and 30Q5, were computed based on the future simulated flows and were also analysed. In accordance with simulated PET increases, the computed values of the metrics decrease under future conditions with respect to reference conditions. Spatial patterns remain in the results, but the variability induced by the PET formula is attenuated by hydrological models. All simulated changes are more pronounced under RCP 8.5 than under RCP 4.5, and in horizon 2080 than in horizon 2050.

A variance decomposition analysis was performed to better investigate the contributions of the different components of the hydroclimatic modelling chain to the uncertainty on low-flow metrics. The following main conclusions can be drawn from this analysis:

- (1) In the case of the 7Q2 and 7Q10 metrics, the most important contributions are from the hydrological models and PET formulas (highest total variance) with important interactions between the two components (second-order interaction variance higher than first-order variances);
- (2) In the case of the 30Q5 metric, most of the total variance comes from the climate models, but the contributions of the PET formulas and hydrological models remain important.

Structural uncertainty can therefore dominate climate model uncertainty, and this should be taken into consideration when carrying climate change impact studies on low flows. Using a single hydrological model–PET formula combination can lead to incomplete knowledge of possible future changes. Furthermore, the North American hydroclimatic diversity shows that the choice of methods is important depending on where a low-flow study is to be performed, and that this will be even more important in the future climate. It is recommended that water managers pay attention to such findings when identifying measures for adaptation to climate change. Further investigation should concentrate on improving ET modelling at the watershed scale to better represent the physics of the process, knowing that current practice is mainly limited to using PET formulas based on temperature as the main climate input.

Acknowledgements

The authors thank the École de technologie supérieure (ÉTS) and the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) for their financial support. We also thank Ouranos for providing climatic data used in this study. Furthermore, we thank the reviewers for their comments and suggestions for improving this paper.

Disclosure statement

No potential conflict of interest was reported by the authors.

ORCID

Gabrielle Dallaire  <http://orcid.org/0000-0002-2493-1913>
 Annie Poulin  <http://orcid.org/0000-0001-6368-9544>
 Richard Arsenaault  <http://orcid.org/0000-0003-2834-2750>
 François Brissette  <http://orcid.org/0000-0002-9754-3014>

References

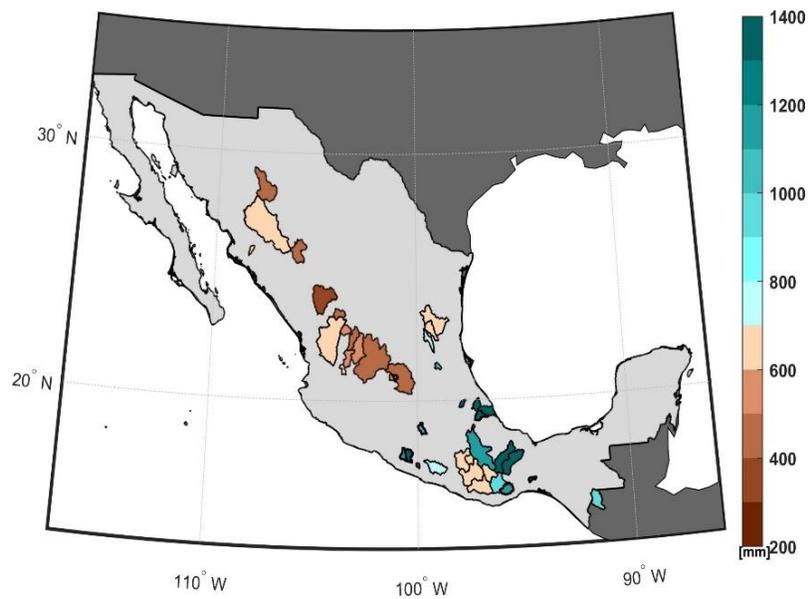
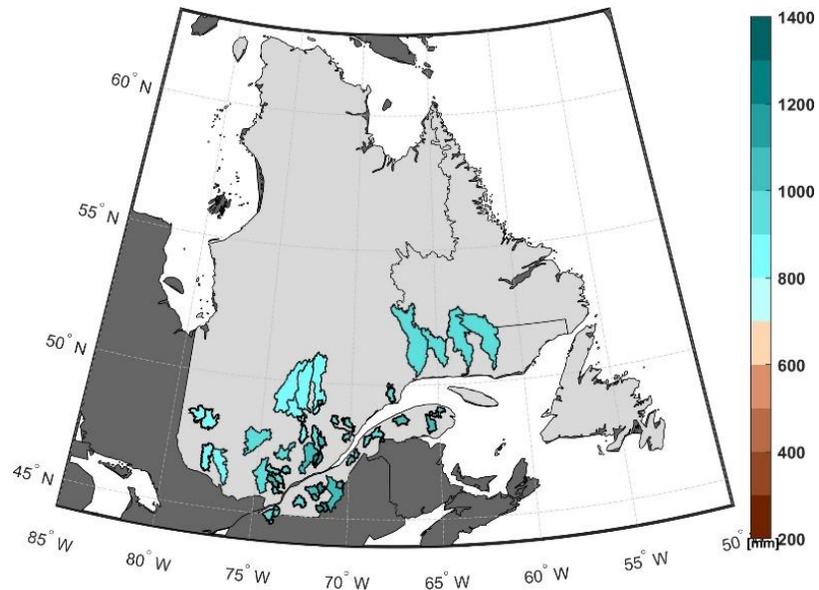
- Anctil, F., Rousselle, J., and Lauzon, N., 2012. *Hydrologie: cheminements de l'eau*. 2e éd. Québec, QC: Presses internationales Polytechnique.
- Arsenaault, R., Brissette, F., and Martel, J.L., 2018. The hazards of split-sample validation in hydrological model calibration. *Journal of Hydrology*, 566, 346–362. doi:10.1016/j.jhydrol.2018.09.027
- Arsenaault, R., et al., 2020. A comprehensive, multisource database for hydrometeorological modeling of 14,425 North American watersheds. *Scientific Data*, 7 (1), 1–12. doi:10.1038/s41597-020-00583-2
- Arsenaault, R., et al., 2013. Comparison of stochastic optimization algorithms in hydrological model calibration. *Journal of Hydrologic Engineering*, 19 (7), 1374–1384. doi:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000938
- Asanuma, J. and Kamimura, H. (2004, March). *Long-term trend of pan evaporation measurements in Japan and its relevance to the variability of the hydrological cycle*. In Symposium on Water Resource and Its Variability in Asia in the 21st Century, Tsukuba, Japan.
- Bae, D.H., Jung, I.W., and Lettenmaier, D.P., 2011. Hydrologic uncertainties in climate change from IPCC AR4 GCM simulations of the Chungju Basin, Korea. *Journal of Hydrology*, 401 (1–2), 90–105. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.02.012
- Baier, W. and Robertson, G.W., 1965. Estimation of latent evaporation from simple weather observations. *Canadian Journal of Plant Science*, 45 (3), 276–284. doi:10.1139/cjss-2017-0112
- Beven, K., 2001. On hypothesis testing in hydrology. *Hydrological Processes*, 15 (9), 1655–1657. doi:10.1002/hyp.436
- Blaney, H.F. and Criddle, W.D., 1950. *Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data*. Washington, DC: US Department of Agriculture, Soil Conservation Service.
- Breña-Naranjo, A., Laverde-Barajas, M.A., and Pedrozo-Acuña, A., 2017. Changes in pan evaporation in Mexico from 1960 to 2010. *International Journal of Climatology*, 37 (1), 204–213. doi:10.1002/joc.4698
- Brigode, P., Oudin, L., and Perrin, C., 2013. Hydrological model parameter instability: A source of additional uncertainty in estimating the hydrological impacts of climate change? *Journal of Hydrology*, 476, 410–425. doi:10.1016/j.jhydrol.2012.11.012
- Burn, D.H. and Hesch, N.M., 2007. Trends in evaporation for the Canadian Prairies. *Journal of Hydrology*, 336 (1–2), 61–73. doi:10.1016/j.jhydrol.2006.12.011
- CEHQ, (2015). *Lignes directrices pour l'estimation des débits d'étiage sur le territoire québécois*. Available from <https://www.cehq.gouv.qc.ca/debit-etiage/methode/index.htm> [Accessed 10 Feb 2019].
- Chattopadhyay, N. and Hulme, M., 1997. Evaporation and potential evapotranspiration in India under conditions of recent and future climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 87 (1), 55–73. doi:10.1016/S0168-1923(97)00006-3
- Chen, J., et al., 2013. Finding appropriate bias correction methods in downscaling precipitation for hydrologic impact studies over North America. *Water Resources Research*, 49 (7), 4187–4205. doi:10.1002/wrcr.20331
- Cloutier, S., Gélineau, M., and Guay, I., 2007. *Calcul et interprétation des objectifs environnementaux de rejet pour les contaminants du milieu aquatique*. 2e éd. Québec, QC: Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs.
- Cong, Z.T., Yang, D.W., and Ni, G.H., 2009. Does evaporation paradox exist in China? *Hydrology and Earth System Sciences*, 13 (3), 357–366. doi:10.5194/hess-13-357-2009
- Déqué, M., et al., 2007. An intercomparison of regional climate simulations for Europe: assessing uncertainties in model projections. *Climatic Change*, 81, 53–70. doi:10.1007/s10584-006-9228-x
- Duan, Q., Sorooshian, S., and Gupta, V.K., 1994. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. *Journal of Hydrology*, 158 (3–4), 265–284. doi:10.1016/0022-1694(94)90057-4
- Fortin, V., 2000. *Le modèle météo-apport HSAMI: historique, théorie et application*. Varennes, QC: Institut de recherche d'Hydro-Québec.
- Fortin, V. and Turcotte, R., 2006. *Le modèle hydrologique MOHYSE*. Montréal: Département des sciences de la terre et de l'atmosphère, Université du Québec à Montréal, Note de cours pour SCA7420.
- Giuntoli, I., et al., 2015. Future hydrological extremes: the uncertainty from multiple global climate and global hydrological models. *Earth System Dynamics*, 6, 267–285. doi:10.5194/esd-6-267-2015
- Gupta, H.V., et al., 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377 (1–2), 80–91. doi:10.1016/j.jhydrol.2009.08.003
- Hamon, W.R., (1960). *Estimating potential evapotranspiration*. (Thèse de doctorat. Massachusetts Institute of Technology, États-Unis).
- Hargreaves, G.H. and Samani, Z.A., 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1 (2), 96–99. doi:10.13031/2013.26773
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2014. *Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press.

- Jensen, M.E. and Haise, H.R., 1963. Estimating evapotranspiration from solar radiation. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 89, 15–41.
- Joyce, L.A., et al., 2018. Historical and projected climate in the Northern Rockies region. *Advances in Global Change Research*, 63, 17–23. doi:10.1007/978-3-319-56928-4_2
- Kay, A.L. and Davies, H.N., 2008. Calculating potential evaporation from climate model data: A source of uncertainty for hydrological climate change impacts. *Journal of Hydrology*, 358 (3–4), 221–239. doi:10.1016/j.jhydrol.2008.06.005
- Kharrufa, N.S., 1985. Simplified equation for evapotranspiration in arid regions. *Beiträge Zur Hydrologie*, 5 (1), 39–47.
- Kingston, D.G., et al., 2009. Uncertainty in the estimation of potential evapotranspiration under climate change. *Geophysical Research Letters*, 36 (20). doi:10.1029/2009GL040267
- Kirchner, J.W., 2006. Getting the right answers for the right reasons: linking measurements, analyses, and models to advance the science of hydrology. *Water Resources Research*, 42 (3). doi:10.1029/2005WR004362
- Krause, P., Boyle, D.P., and Bäse, F., 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, 5, 89–97. doi:10.5194/adgeo-5-89-2005
- Liu, B., et al., 2004. A spatial analysis of pan evaporation trends in China, 1955–2000. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109 (D15). doi:10.1029/2004JD004511
- Martel, J.L., 2019. École de technologie supérieure: Évaluation de l'influence de la variabilité naturelle du climat et des changements climatiques anthropiques sur les extrêmes hydrométéorologiques. (Doctoral dissertation).
- Martel, J.L., et al., 2017. HMETS-A simple and efficient hydrology model for teaching hydrological modelling, flow forecasting and climate change impacts. *International Journal of Engineering Education*, 33 (4), 1307–1316.
- McGuinness, J.L. and Bordne, E.F., 1972. *A comparison of lysimeter-derived potential evapotranspiration with computed values* (No. 1452). Washington, DC: US Dept. of Agriculture.
- McMahon, T.A., Finlayson, B.L., and Peel, M.C., 2016. Historical developments of models for estimating evaporation using standard meteorological data. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 3 (6), 788–818. doi:10.1002/wat2.1172
- Minville, M., Brissette, F., and Leconte, R., 2008. Uncertainty of the impact of climate change on the hydrology of a nordic watershed. *Journal of Hydrology*, 358 (1–2), 70–83. doi:10.1016/j.jhydrol.2008.05.033
- Minville, M., et al., 2014. Improving process representation in conceptual hydrological model calibration using climate simulations. *Water Resources Research*, 50 (6), 5044–5073. doi:10.1002/2013WR013857
- Moonen, A.C., et al., 2002. Climate change in Italy indicated by agrometeorological indices over 122 years. *Agricultural and Forest Meteorology*, 111 (1), 13–27. doi:10.1016/S0168-1923(02)00012-6
- Mpelasoka, F.S. and Chiew, F.H., 2009. Influence of rainfall scenario construction methods on runoff projections. *Journal of Hydrometeorology*, 10 (5), 1168–1183. doi:10.1175/2009JHM1045.1
- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10 (3), 282–290. doi:10.1016/0022-1694(70)90255-6
- Oudin, L. (2004). *Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global*. (Thèse de doctorat. Paris: École Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts (ENGREF)).
- Oudin, L., et al., 2005a. Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall–runoff model?: part 2—Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall–runoff modelling. *Journal of Hydrology*, 303 (1–4), 290–306. doi:10.1016/j.jhydrol.2004.08.026
- Oudin, L., Michel, C., and Anctil, F., 2005b. Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall–runoff model?: part 1—Can rainfall–runoff models effectively handle detailed potential evapotranspiration inputs? *Journal of Hydrology*, 303 (1–4), 275–289. doi:10.1016/j.jhydrol.2004.08.025
- Perrin, C., Michel, C., and Andréassian, V., 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 279 (1–4), 275–289. doi:10.1016/S0022-1694(03)00225-7
- Quintana-Gomez, R.A., 1998. Changes in evaporation patterns detected in northernmost South America. In: *Proc 7th int. meeting on statistical climatology*. Whistler, BC, Canada: Institute of Mathematical Statistics, 97.
- Ricard, S. and Anctil, F., 2019. Forcing the Penman–Montheith formulation with humidity, radiation, and wind speed taken from reanalyses, for hydrologic modeling. *Water*, 11 (6), 1214. doi:10.3390/w11061214
- Roderick, M.L. and Farquhar, G.D., 2004. Changes in Australian pan evaporation from 1970 to 2002. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 24 (9), 1077–1090. doi:10.1002/joc.1061
- Roderick, M.L. and Farquhar, G.D., 2005. Changes in New Zealand pan evaporation since the 1970s. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 25 (15), 2031–2039. doi:10.1002/joc.1262
- Schmidli, J., Frei, C., and Vidale, P.L., 2006. Downscaling from GCM precipitation: a benchmark for dynamical and statistical downscaling methods. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 26 (5), 679–689. doi:10.1002/joc.1287
- Seiller, G. and Anctil, F., 2014. Climate change impacts on the hydrologic regime of a Canadian river: comparing uncertainties arising from climate natural variability and lumped hydrological model structures. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18 (6), 2033–2047. doi:10.5194/hess-18-2033-2014
- Seiller, G. and Anctil, F., 2016. How do potential evapotranspiration formulas influence hydrological projections? *Hydrological Sciences Journal*, 61 (12), 2249–2266. doi:10.1080/02626667.2015.1100302
- Smith, M.B., et al., 2012. Results of the DMIP 2 Oklahoma experiments. *Journal of Hydrology*, 418, 17–48. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.08.056
- Taylor, K.E., Stouffer, R.J., and Meehl, G.A., 2012. An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93 (4), 485–498. doi:10.1175/BAMS-D-11-00094.1
- Tebakari, T., Yoshitani, J., and Suvanpimol, C., 2005. Time-space trend analysis in pan evaporation over kingdom of Thailand. *Journal of Hydrologic Engineering*, 10 (3), 205–215. doi:10.1061/(ASCE)1084-0699(2005)10:3(205)
- Troin, M., et al., 2018. Uncertainty of hydrological model components in climate change studies over two Nordic Quebec Catchments. *Journal of Hydrometeorology*, 19 (1), 27–46. doi:10.1175/JHM-D-17-0002.1
- Valéry, A., Andréassian, V., and Perrin, C., 2014. 'As simple as possible but not simpler': what is useful in a temperature-based snow-accounting routine? Part 2—Sensitivity analysis of the Cemaneige snow accounting routine on 380 catchments. *Journal of Hydrology*, 517, 1176–1187. doi:10.1016/j.jhydrol.2014.04.058
- Xu, C.Y. and Singh, V.P., 2002. Cross comparison of empirical equations for calculating potential evapotranspiration with data from Switzerland. *Water Resources Management*, 16 (3), 197–219. doi:10.1023/A:1020282515975
- Zhao, C., et al., 2020. Frequency change of future extreme summer meteorological and hydrological droughts over North America. *Journal of Hydrology*, 584, 124316. doi:10.1016/j.jhydrol.2019.124316

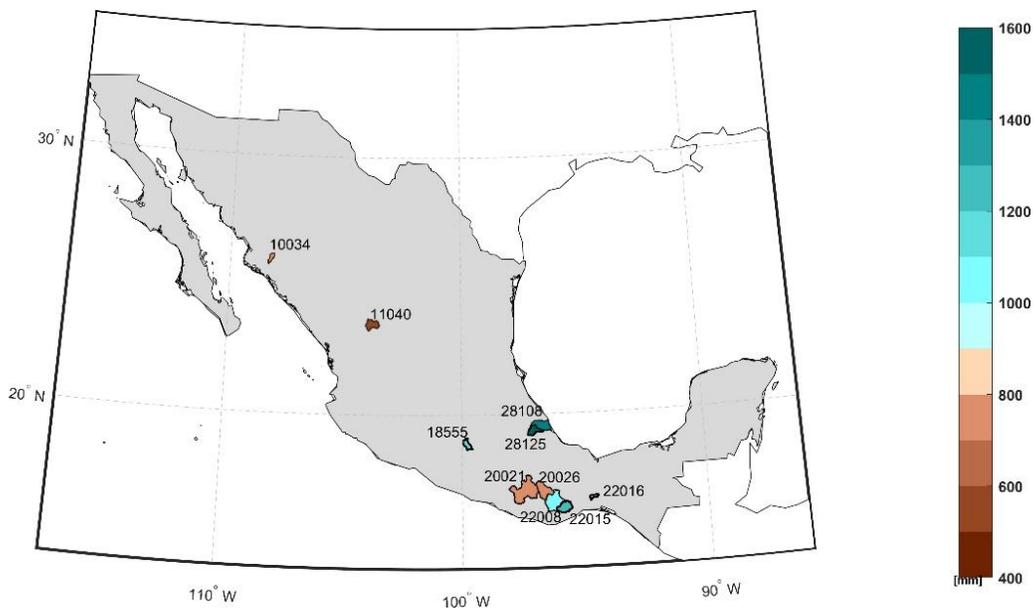
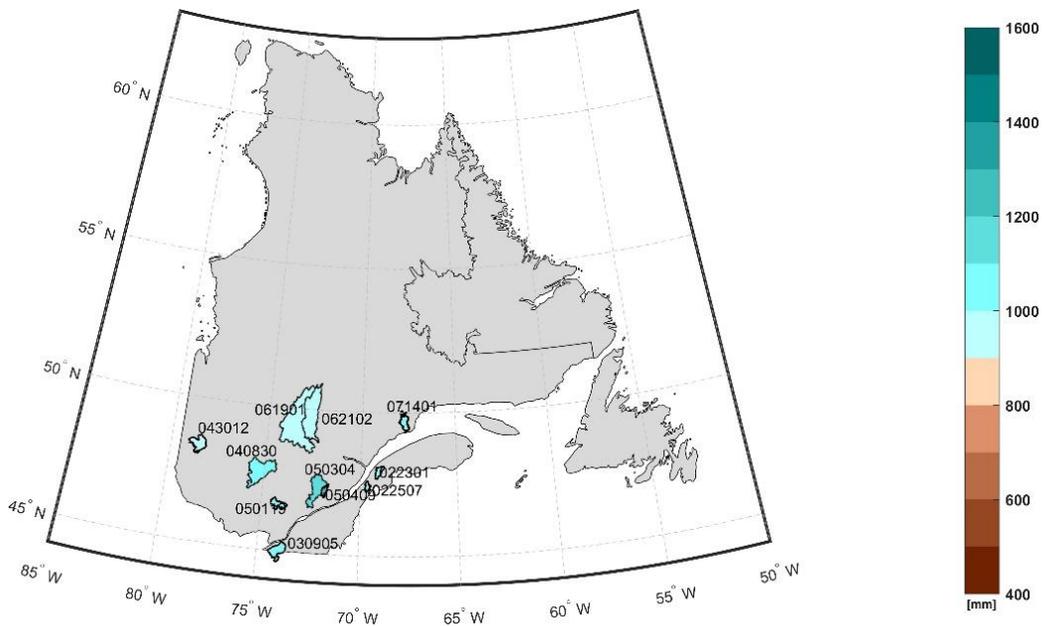
Annexe C – Territoires à l'étude dans le cadre de l'Axe I du projet

Objectif I.1 – Modélisation climatique fine résolution et incertitudes en modélisation hydroclimatique en périodes de crues

Partie 1, incertitude; et Partie 3, pondération des simulations climatiques, 50 bassins au Québec et 46 bassins au Mexique

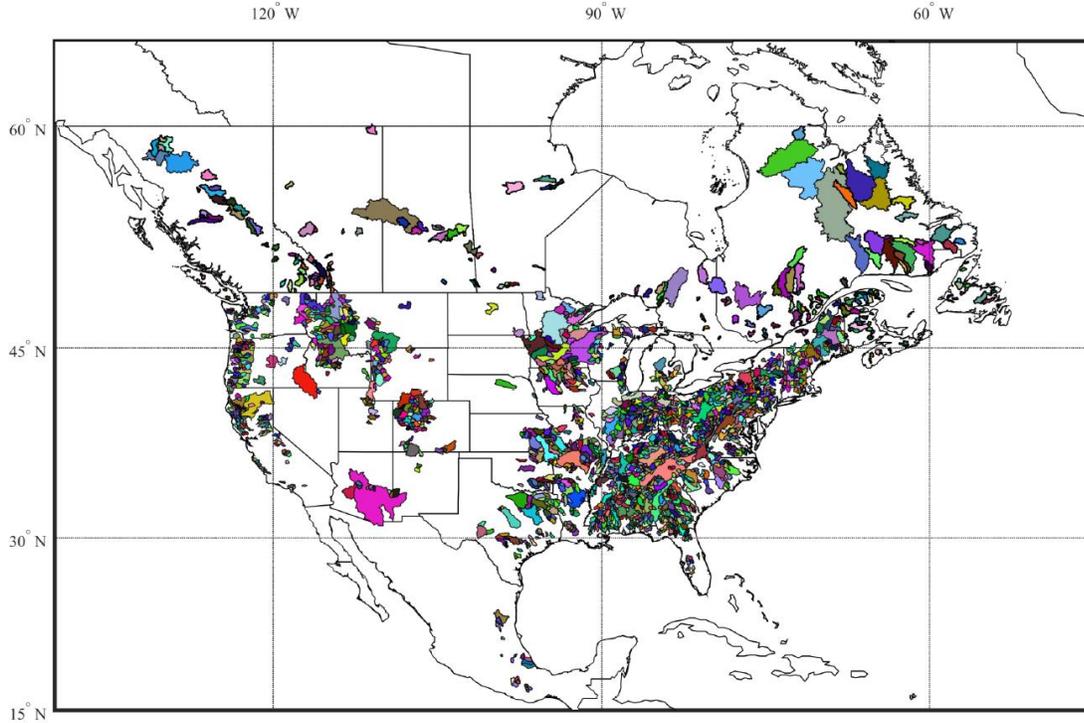


Partie 2, pondération des simulations hydrologiques, 10 bassins au Mexique et 10 bassins au Québec (nombre réduit de bassins étant donné la modélisation hydrologique avec HYDROTEL)



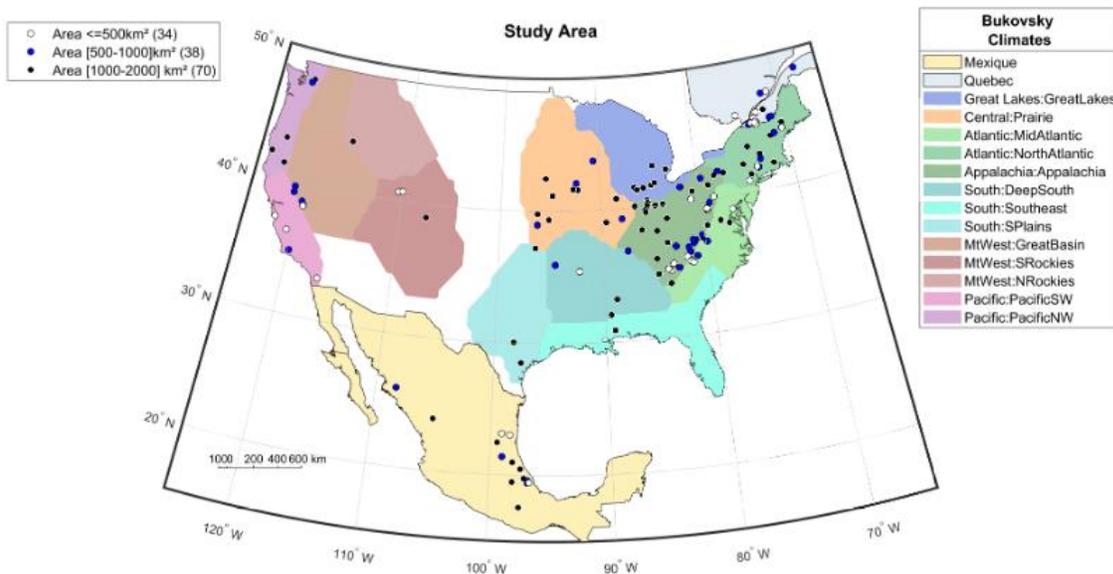
Objectif I.2 – Modélisation hydroclimatique sous-journalière en période de crues

Incertitude associée aux formulations d'évapotranspiration, 2080 bassins au Canada, aux États-Unis et au Mexique



Objectif I.3 – Modélisation hydroclimatique en périodes d'étiages

Modélisation hydrologique sous-journalière, 92 bassins (représentés par les points) au Québec, aux États-Unis et au Mexique



Annexe D – Rapport du projet de maîtrise de Laurence Blondeau-Bouchard

Élaboration d'un outil d'évaluation des sensibilités
territoriales aux événements hydroclimatiques : étude de cas
du bassin versant de la rivière Saint-Régis

par

Laurence BLONDEAU-BOUCHARD

RAPPORT DE PROJET PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE
SUPÉRIEURE COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE
LA MAÎTRISE EN GÉNIE DE L'ENVIRONNEMENT
M. Ing.

MONTRÉAL, LE 6 MAI 2020

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

©Tous droits réservés, Laurence Blondeau-Bouchard, 2020

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre média une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY

CE RAPPORT DE PROJET A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Mathias Glaus, directeur de projet
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

Mme Annie Poulin, codirectrice de projet
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

Frédéric Monette, membre du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

Élaboration d'un outil d'évaluation des sensibilités territoriales aux événements hydroclimatiques : étude de cas du bassin versant de la rivière Saint-Régis

Laurence BLONDEAU-BOUCHARD

RÉSUMÉ

Dans un contexte d'adaptation aux changements climatiques, une partie du défi repose sur l'identification des données jugées pertinentes et la façon dont elles sont organisées et présentées afin d'en extraire une information propice à supporter les acteurs d'un territoire dans leur processus d'aide à la prise de décision. Le résultat de l'approche développée a pris la forme d'un outil matriciel permettant d'identifier, d'une part, les interactions entre une cause potentielle associée à un aléa hydroclimatique et une composante du territoire à l'étude et, d'autre part, la sensibilité de la communauté en regard des différentes composantes affectées par l'aléa. Dans le cadre du projet, la matrice de sensibilité a été développée pour répondre aux besoins du projet de Rés-Alliance du bassin versant de la Saint-Régis. Afin de faire ressortir les sensibilités spécifiques au bassin versant et d'identifier des actions d'adaptation qui peuvent être entreprises au niveau local, l'échelle des six municipalités a été retenue. Une analyse de la sensibilité en regard de chacune des causes potentielles associées à un aléa hydroclimatique basée sur l'analyse de l'information disponible a été réalisée pour chacune des composantes. Afin de s'assurer de la pertinence de l'outil, les constats de l'analyse de sensibilité matricielle ont été comparés avec les résultats des ateliers participatifs tenus pour le projet de la Rés-Alliance. La comparaison des résultats de l'outil matriciel et des ateliers participatifs permet de constater que les sensibilités identifiées par les deux méthodes sont similaires. En augmentant le nombre d'études de cas, la reproductibilité des résultats pourra être vérifiée et/ou améliorée et l'utilisation de la matrice par les acteurs du territoire permettra d'en assurer la pérennité dans le contexte évolutif de l'adaptation aux changements climatiques.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 ÉTAT DES CONNAISSANCES	3
1.1 Données climatiques	3
1.1.1 Les modèles climatiques	3
1.1.2 Les utilisateurs de l'information climatique	6
1.2 Le processus d'adaptation.....	7
1.2.1 Adaptation physique et structurelle	9
1.2.2 Leviers institutionnels.....	10
1.2.3 Information et savoir.....	11
1.3 Approche d'adaptation développée au Québec.....	11
1.3.1 Acteurs de l'adaptation des bassins versants	12
1.3.2 Modèles d'analyse de la vulnérabilité.....	13
1.3.3 Contexte territorial du bassin versant de la Saint-Régis	18
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE	21
2.1 Structure de l'information et indicateurs de sensibilité	21
2.1.1 Choix de l'échelle spatiale	21
2.1.2 Événements hydroclimatiques	22
2.1.3 Composantes territoriales.....	22
2.1.4 Priorisation des sensibilités.....	25
2.1.5 Indicateurs sociaux et économiques.....	27
2.2 Principe de développement de l'outil matriciel	28
2.3 Acquisition des données spécifiques au territoire du bassin versant de la rivière Saint-Régis	28
CHAPITRE 3 RÉSULTATS	31
3.1 Organisation structurelle de l'information.....	31
3.2 Intégration de l'outil matriciel	44
3.3 Identification des sensibilités du territoire.....	47
CHAPITRE 4 DISCUSSION	51
CONCLUSION	55
ANNEXE I ACTIVITÉS RÉALISÉES AVEC LA SCABRIC.....	57
ANNEXE II INFORMATIONS ISSUES DE L'ANALYSE DES VULNÉRABILITÉS DES OUVRAGES URBAINS DES MUNICIPALITÉ	58
ANNEXE III DOCUMENT D'INFORMATION – SERVICES URBAINS – VILLE DE SAINT-MICHEL	74

ANNEXE IV ACTIONS PROPOSÉES PAR LA RÉ-ALLIANCE POUR LE BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE SAINT-RÉGIS (Audet, 2019).....	75
GLOSSAIRE	78
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	80

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1 : Principaux impacts attendus des changements climatiques sur le régime hydrique du Québec méridional.....	6
Tableau 1.2 : Exemples de modèles d'analyse de vulnérabilité aux changements climatiques	14
Tableau 1.3 : Étapes de développement des résultats des analyses de vulnérabilité	17
Tableau 1.4 : Paliers de sensibilité utilisés dans l'analyse de vulnérabilité de l'ADEME	17
Tableau 1.5 : Paliers de sensibilité utilisés dans l'analyse de vulnérabilité du ROBVQ.....	18
Tableau 1.6 : Tendances prévues par l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional pour la région du bassin versant de la rivière Saint-Régis	20
Tableau 2.1 : Événements hydroclimatiques des matrices de sensibilité du bassin versant de la rivière Saint-Régis.....	22
Tableau 2.2 : Facteurs physiques potentiellement amplificateurs de la sensibilité du territoire	23
Tableau 2.3 : Catégories principales des composantes de la structure matricielle	24
Tableau 2.4 : Changements projetés du climat dans le bassin versant de la Saint-Régis	29
Tableau 3.1 : Facteurs physiques amplificateurs spécifiques au bassin versant de la rivière Saint-Régis	32
Tableau 3.2 : Informations issues de l'analyse des sensibilités des ouvrages urbains	33
Tableau 3.3 : Informations issues de l'analyse des sensibilités des services urbains des municipalités du bassin versant de la Saint-Régis	34
Tableau 3.4 : Informations issues de l'analyse des sensibilités des services urbains de la municipalité de Saint-Michel	36
Tableau 3.5 : Informations issues de l'analyse des sensibilités des services économiques de la municipalité de Saint-Michel	40
Tableau 3.6 : Résultats des différentes combinaisons de chiffres pouvant être entrées dans les cases de la matrice	45
Tableau 3.7 : Principales sensibilités relevées par l'outil matriciel.....	47

Tableau 3.8 : Justification des niveaux de probabilité de sensibilité élevés et moyens dans l'outil matriciel.....	48
Tableau 3.9 : Adéquation des constats de l'outil d'analyse et des actions identifiées par la Rés-Alliance.....	50

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1 : Schéma conceptuel de développement des simulations climatiques.....	4
Figure 1.2 : Types d'adaptation aux changements climatiques.....	9
Figure 1.3 : Présentation type des résultats de la matrice « Impact'Climat 2015 » de l'ADEME (adapté de ADEME, 2015).....	15
Figure 1.4 : Présentation type des résultats de la matrice « Outil d'évaluation des risques et des vulnérabilités dans un contexte de changements climatiques » du ROBVQ (adapté de ROBVQ, 2018).....	16
Figure 1.5 : Répartition des six (6) municipalités au sein du bassin versant de la rivière Saint-Régis	19
Figure 2.1 : Légende de priorisation des sensibilités.....	26
Figure 3.1 : Schéma de la structure de la matrice de sensibilité.....	31
Figure 3.2 : Ouvrages urbains tels qu'intégrés dans la matrice de sensibilité	33
Figure 3.3 : Services urbains tels qu'intégrés dans la matrice de sensibilité de Saint-Michel	35
Figure 3.4 : Indicateurs sociaux tels qu'intégrés dans la matrice de sensibilité de Saint-Michel	38
Figure 3.5 : Services économiques tels qu'intégrés dans la matrice de sensibilité de Saint-Michel	39
Figure 3.6 : Indicateurs économiques tels qu'intégrés dans la matrice de sensibilité de Saint-Michel	42
Figure 3.7 : Structure finale de matrice de sensibilité, complétée pour l'étude de cas de Saint-Michel	43
Figure 3.8 : Exemples de services urbains et d'indicateurs sociaux tels que reliés dans la matrice de sensibilité.....	46

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ADEME	: Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
AEE	: Agence européenne pour l'environnement
ASA	: Agence Spatiale Algérie
BNQ	: Bureau de normalisation du Québec
CCI	: Conseil canadien des ingénieurs
CEHQ	: Centre d'expertise hydrique du Québec
CRE	: Conseil régional de l'environnement
DEHA	: Direction de l'expertise hydrique et atmosphérique
DSCC	: Données et scénarios climatiques canadiens
ECCC	: Environnement et Changement Climatique Canada
ÉTS	: École de technologie supérieure
EPA	: <i>United States Environmental Protection Agency</i>
FAO	: Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
GES	: Gaz à effet de serre
GIEC	: Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat
IDDPNQL	: Institut de Développement Durable des Premières Nations du Québec et du Labrador
IDF	: Intensité-durée-fréquence
IDS	: <i>Institute of Development Studies</i>
MAPAQ	: Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec
MCR	: Modèles Climatiques Régionaux
MELCC	: Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques
MGC	: Modèles globaux du climat
MRC	: Municipalité régionale de comté
MTQ	: Ministère des Transports du Québec
OMM	: Organisation météorologique mondiale
ONU	: Organisation des Nations Unies
PACC	: Plan d'action sur les changements climatiques
PDE	: Plans directeurs de l'eau

RADEAU	:	Recherche Participative d'Alternatives Durables pour la gestion de l'EAU en milieu agricole
ROBVQ	:	Regroupement des organismes de bassins versants du Québec
UKCIP	:	<i>United Kingdom Climate Impacts Programme</i>
UPA	:	Union des producteurs agricoles du Québec
UQAM	:	Université du Québec à Montréal
VBA	:	<i>Visual Basic for Applications</i>
ZIP	:	Zones d'intervention prioritaire

INTRODUCTION

Les changements climatiques sont devenus une préoccupation majeure à l'échelle mondiale et s'amplifieront à moyen terme, sans égard à l'efficacité des mesures d'atténuation globales visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre. Les impacts des changements climatiques se manifestent sur l'ensemble de la planète par une modification de la fréquence et de l'intensité des événements climatiques qui entraînent, entre autres, des températures plus élevées, la disparition progressive du couvert de glace aux pôles, la fonte du pergélisol, l'élévation du niveau marin, ou encore l'augmentation de l'intensité des tempêtes, de l'érosion des côtes et des inondations.

Bien que le niveau de connaissance actuel de ce phénomène permette de produire une quantité et une diversité de données et d'informations climatologiques, les intervenants impliqués gestion du territoire ont rarement les outils leur permettant d'évaluer les impacts potentiels, les vulnérabilités ou sensibilités et les possibilités que présentent les changements climatiques. Pour adapter leurs territoires aux impacts actuels et futurs des changements climatiques, les intervenants doivent être en mesure d'utiliser les informations produites sur le climat. Cependant, compte tenu de la complexité des sciences du climat, et ce plus particulièrement dans le domaine de l'hydroclimatologie, les intervenants sont rarement en mesure d'utiliser l'information de façon efficiente dans la gestion intégrée des ressources hydriques, ce qui ralentit la prise de décision en regard de mesures propices à diminuer la vulnérabilité du territoire aux aléas climatiques.

Dès lors, dans un contexte d'adaptation aux changements climatiques, une partie du défi repose sur l'identification des données jugées pertinentes et la façon dont elles sont organisées et présentées afin d'en extraire une information propice à supporter les acteurs d'un territoire dans leur processus d'aide à la prise de décision. En effet, une mise en forme de l'information appropriée au contexte local est à même de garantir que les données sont non seulement utiles, mais aussi utilisables par les intervenants.

Le présent projet de recherche vise à développer une approche qui permette de renforcer la capacité de diagnostic des éléments sensibles d'un territoire et, dès lors, de faciliter l'identification de mesures d'adaptation. Basée sur une approche matricielle des interactions, la démarche s'appuie sur les connaissances du territoire et les informations hydroclimatiques disponibles. Les objectifs spécifiques du projet sont :

- ❖ Structurer l'information associée à la sensibilité d'un territoire à l'étude;
- ❖ Fournir un diagnostic des sensibilités d'un territoire aux événements climatiques;
- ❖ Valider de la démarche en comparant les résultats de l'outil matriciel au travail réalisé dans le cadre des ateliers participatifs de la SCABRIC.

Le rapport aborde dans un premier chapitre l'état des connaissances associées à la mise en place d'un système d'évaluation des sensibilités d'un territoire aux changements climatiques et présente les acteurs du développement et de l'utilisation des données climatiques, les méthodes d'adaptation existantes ainsi que l'approche d'adaptation développée au Québec. Le deuxième chapitre présente la méthodologie adoptée et traite de l'approche utilisée pour établir la structure de la matrice de sensibilité, en incluant le cheminement suivi pour déterminer le format de présentation des résultats, ainsi que le contexte relatif à l'étude de cas des municipalités du bassin versant de la Saint-Régis et des ressources disponibles pour compléter le traitement de l'information présentée dans la matrice. Le troisième chapitre présente les résultats, soit la présentation de la structure finale de la matrice d'analyse des sensibilités, l'intégration de l'outil matriciel et son application dans le cas du bassin versant à l'étude. Le quatrième chapitre aborde la discussion sur l'utilisation de l'outil et les conditions de sa pérennité et sera suivi d'une conclusion.

CHAPITRE 1

ÉTAT DES CONNAISSANCES

Cette section porte sur l'état des connaissances qui permettent de mettre en place un système d'évaluation des sensibilités d'un territoire aux changements climatiques. Le premier volet présente les sources de données climatiques ainsi que les utilisateurs de cette information. Le second volet explore le processus d'adaptation, qui comprend plusieurs types de mesures, notamment les adaptations physiques et structurelles, les leviers institutionnels ainsi que les informations associées. Finalement, les acteurs impliqués dans le processus d'identification des mesures d'adaptation sont présentés, ainsi que l'approche d'adaptation développée au Québec et les caractéristiques territoriales associées au bassin versant de la Saint-Régis.

1.1 Données climatiques

La connaissance de la variabilité du climat, des changements climatiques et des impacts induits est à la base d'un processus d'adaptation. Cette information, d'abord développée grâce à des modèles climatiques, est ensuite relayée aux utilisateurs, qui sont souvent les gestionnaires du territoire, afin de les accompagner dans leur processus de prise de décision quant à l'identification de mesures d'adaptation aux changements climatiques.

1.1.1 Les modèles climatiques

Les modèles climatiques sont des outils numériques basés sur des équations mathématiques et issus de différents efforts internationaux et nationaux. Ces équations, qui visent à représenter des processus du système climatique dans le futur, reposent sur des lois physiques qui régissent la mécanique des fluides, tels que les lois de la conservation de la masse, de l'énergie et du moment cinétique. Elles reproduisent les principaux phénomènes météorologiques, hydrologiques, cryogéniques, lithographiques, océanographiques et biologiques sous l'effet de forces telles que le rayonnement solaire, les aérosols et les émissions anthropiques de gaz à

effet de serre (GES) (Charron, 2016). Toutefois, afin de fournir la représentation la plus exacte du climat, les simulations actuelles nécessitent plusieurs mois de calcul pour obtenir un modèle du climat mondial sur une période de 250 ans (Charron, 2016). Par conséquent, très peu d'organisations de recherche sur les changements climatiques ou groupes d'organisation ont la capacité d'absorber les coûts en infrastructure logicielle et en temps de telles simulations. De nombreux modèles climatiques ont été développés par différents centres climatologiques à l'échelle mondiale, dont plusieurs au Québec par l'organisme Ouranos, consortium québécois en climatologie régionale. Les modèles diffèrent en fonction de plusieurs facteurs, tels que le choix de résolution de leur grille, de champs géophysiques (types de sol, types de végétation, emplacement des plans d'eau et leurs bathymétries, topographie, etc.) et de concentration de gaz à effets de serre, ce qui implique que chaque modèle est unique et générera une simulation climatique légèrement différente. Le schéma conceptuel de développement des simulations climatiques est présenté à la Figure 1.1.

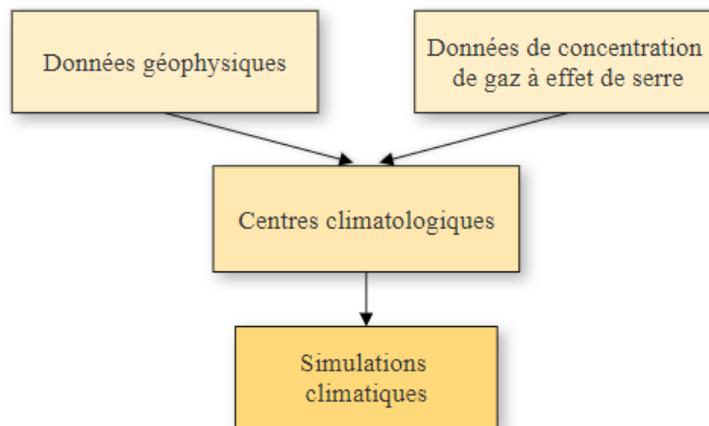


Figure 1.1 : Schéma conceptuel de développement des simulations climatiques

Les modèles climatiques sont répartis en deux groupes principaux en fonction de la taille de leur grille de calcul, aussi appelé domaine :

- ❖ Les modèles globaux du climat (MGC) ou « modèles du système terrestre » (Ouranos, 2015) : Comme leur nom le suggère, les grilles de calcul MGC couvrent la planète entière.

Les MGC actuels ont généralement une résolution horizontale entre 200 et 300 km (Charron, 2016).

- ❖ Les Modèles Climatiques Régionaux (MCR) : Les MCR ont des domaines plus petits qui ne couvrent qu'une partie de la planète. En se concentrant sur zone limitée du globe, il est possible de résoudre les équations du modèle climatique sur une résolution horizontale plus fine (50 km ou moins) qui permet un délai de résolution raisonnable (Charron, 2016).

Les périodes simulées peuvent aller de quelques années à des milliers d'années, tant pour le passé que pour les périodes futures.

Au Québec, l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional de 2015 présente une synthèse de l'état des projections hydrologiques réalisée par le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ), l'actuelle Direction de l'expertise hydrique et atmosphérique (DEHA). À l'horizon 2050, les principaux impacts attendus des changements climatiques sur le régime hydrique du Québec méridional identifiés dans l'*Atlas hydroclimatique du Québec méridional de 2015* (CEHQ, 2015) sont présentés au Tableau 1.1. Deux tendances importantes se profilent :

1. Comme la fonte des neiges devrait se produire plus tôt dans l'année, les crues printanières seront plus hâtives. En général, les débits hivernaux seront plus importants et, par conséquent, les étiages hivernaux seront moins sévères et l'hydraulicité hivernale sera plus forte.
2. Des épisodes de sécheresses estivales sont prévus. Par conséquent, les étiages estivaux seront plus sévères et plus longs et l'hydraulicité estivale sera plus faible.

Tableau 1.1 : Principaux impacts attendus des changements climatiques sur le régime hydrique du Québec méridional

Tendances à l'horizon 2050	Niveau de confiance
Les crues printanières seront plus hâtives	Élevé
Le volume des crues printanières diminuera au sud du Québec méridional	Modéré
La pointe des crues printanières sera moins élevée au sud du Québec méridional	Modéré
La pointe des crues estivales et automnales sera plus élevée sur une large portion du Québec méridional	Modéré
Les étiages estivaux seront plus sévères et plus longs	Élevé
Les étiages hivernaux seront moins sévères	Élevé
L'hydraulicité hivernale sera plus forte	Élevé
L'hydraulicité estivale sera plus faible	Élevé
L'hydraulicité à l'échelle annuelle sera plus forte au nord du Québec méridional et plus faible au sud	Modéré

1.1.2 Les utilisateurs de l'information climatique

À partir des modèles climatiques et des scénarios propres à la région fournis par le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC) ou, dans le cas spécifique du Québec, des portraits climatiques fournis par Ouranos, plusieurs sources de données climatiques sont produites et disponibles, dont les principales sont:

- ❖ les Données et scénarios climatiques canadiens (DSCC);
- ❖ les données climatiques du Code national du bâtiment du Canada;
- ❖ les courbes d'intensité-durée-fréquence (IDF);
- ❖ les cartographies de plaines inondables;
- ❖ l'Institut de prévention des Sinistres Catastrophiques;

Ces données climatiques peuvent ensuite être transmises sous la forme de tableaux de données brutes ou de matrice d'analyse de sensibilités du territoire, selon les besoins des utilisateurs.

Les utilisateurs des données climatiques sont nombreux et possèdent des niveaux de connaissance, d'autorité, de responsabilité, d'objectifs et de capacités différents, ce qui complexifie la production d'information adaptée aux multiples catégories d'intervenants, de gouvernements ou d'organisations impliqués dans l'identification des meilleurs scénarios dans un contexte de changements climatiques. La bonne connaissance des caractéristiques des utilisateurs joue un rôle important dans la détermination du format de présentation des données adapté aux besoins. Ainsi, de mêmes informations hydroclimatiques peuvent être présentées différemment en fonction de l'expertise ou des préférences. Les valeurs culturelles, l'éthique, la langue et la psychologie jouent aussi un rôle déterminant dans le processus d'adaptation et influencent la prise de décision (Ouranos, 2015). C'est pourquoi l'implication des gestionnaires, décideurs et professionnels des secteurs public et privé est importante. En effet, ils peuvent agir en tant que conseillers, fournisseurs d'information et de lignes directrices, éducateurs et même agents de liaison entre les populations locales, les institutions et même les organismes de recherche.

1.2 Le processus d'adaptation

Les changements climatiques affectent tous les pays en modifiant les conditions non seulement propices aux activités économiques, mais également celles auxquelles sont soumises les infrastructures de services aux citoyens. Il apparaît ainsi nécessaire de renforcer la résilience et les capacités d'adaptation face aux aléas climatiques et aux catastrophes naturelles liées au climat. De nombreux organismes internationaux chapeautent les initiatives globales en matière d'adaptation aux changements climatiques, notamment l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et le programme de l'Organisation des Nations Unies (ONU) pour l'environnement, qui, ensemble, ont mis en place le GIEC, ainsi que l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO, 2018). À l'échelle nationale, les organisations impliquées dans la gestion du territoire développent des outils pour améliorer le processus d'adaptation aux aléas du climat. Par exemple, en France, l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) cherche à suivre et à évaluer l'adaptation aux changements climatiques sur ses territoires (ADEME, 2012). Au Royaume-Uni, les *Institute of Development Studies (IDS)* et *United Kingdom Climate Impacts Programme (UKCIP)* développent des

cadres d'application pour les processus d'adaptation aux changements climatiques avec des programmes comme le « Learning to ADAPT » (Villanueva, 2011) ou le « AdaptME Toolkit » (UKCIP, 2011). D'autres, comme l'*United States Environmental Protection Agency (EPA)* et l'Agence européenne pour l'environnement (AEE), ont mis en place des indicateurs pour évaluer les processus d'adaptation (Kadir et al., 2013; Mäkinen et al., 2018). L'élaboration de ces outils vise à encadrer les pratiques locales et accompagner les initiatives des décideurs territoriaux en matière d'adaptation aux changements climatiques.

Au Québec, les impacts les plus répandus se rapportent à la production hydroélectrique, qui est sensible aux variations des ressources hydriques, à l'agriculture, à l'aménagement forestier, aux mines, à la transformation des matières premières et à l'environnement bâti, qui comprend les bâtiments, les infrastructures, les équipements et les réseaux de transport, d'énergie et de télécommunications (Gouv. du Québec, 2012). Les changements climatiques ont des effets économiques, sociaux, environnementaux, mais aussi sur la santé humaine de longue durée. Il est ainsi nécessaire de s'adapter en prenant des actions immédiates et concertées qui permettront d'éviter ou de minimiser les coûts humains et financiers découlant des impacts des changements climatiques. Ouranos (2015) définit l'adaptation aux changements climatiques comme le « domaine de recherche qui étudie et cherche à comprendre comment les systèmes existants, naturels et humains, feront face aux changements climatiques et comment prendre en considération les changements climatiques dans le développement durable de la société ». Le GIEC, quant à lui, définit l'adaptation comme une « modification des systèmes naturels et humains en réaction à des stimuli climatiques qui surviennent ou qui sont prévus, ou leurs répercussions, pour en diminuer les effets nocifs ou pour tirer profit des avantages possibles qu'ils apportent ». Une adaptation efficace ne veut pas dire qu'il n'y aura pas d'impacts négatifs, mais plutôt que les populations exposées seront moins vulnérables à ces impacts que s'il n'y avait pas eu d'adaptation (Gouv. du Québec, 2012). Par conséquent, pour réduire les impacts négatifs des changements climatiques, il faut réduire les vulnérabilités des éléments sensibles de la société et accroître la résilience des composantes de la société aux facteurs de stress d'ordre climatique (Gouv. du Québec, 2012).

Il existe de nombreuses méthodes différentes d'adaptation. Au Québec, les types d'adaptation peuvent être classés en trois grandes catégories, telles que présentées à la Figure 1.2 :

- ❖ adaptation physique et structurelle;
- ❖ leviers institutionnels;
- ❖ information et savoir.

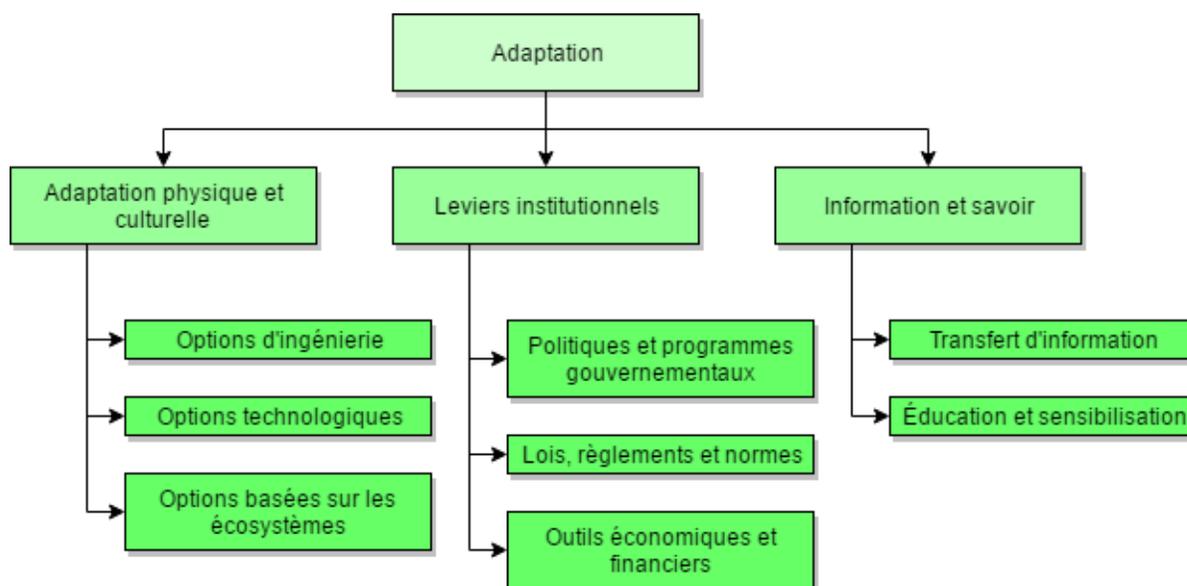


Figure 1.2 : Types d'adaptation aux changements climatiques

1.2.1 Adaptation physique et structurelle

Les mesures d'adaptation physique et structurelle entraînent des modifications tangibles dans les propriétés physiques d'un système afin d'augmenter sa capacité à faire face à la variabilité climatique. Elles peuvent prendre la forme d'options d'ingénierie, de solutions technologiques et de mesures basées sur les écosystèmes (Ouranos, 2015). Les options d'adaptation d'ingénierie ainsi que les options technologiques sont plus étudiées que les options d'adaptation basées sur la biodiversité et les services écologiques. Un intérêt croissant pour ces dernières options d'adaptation est toutefois constaté et fait partie des nouvelles pistes de recherche pour l'avenir (Mimura et coll., 2014).

1.2.2 Leviers institutionnels

Les leviers institutionnels publics et privés créent un environnement favorable à l'adaptation grâce au développement de politiques et de programmes gouvernementaux, de lois, règlements et normes ainsi que des outils économiques et financiers.

La planification de l'adaptation dans les politiques et programmes gouvernementaux se fait sur plusieurs paliers de gouvernements. Au niveau fédéral, le *Cadre stratégique fédéral sur l'adaptation* (ECCC, 2016) vise à intégrer les risques climatiques affectant le bien-être des Canadiens dans les décisions prises au niveau canadien. Au niveau provincial, le *Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques* et la *Stratégie gouvernementale d'adaptation aux changements climatiques 2013-2020* (Gouv. du Québec, 2012), vise à minimiser les impacts des changements climatiques ainsi que leurs conséquences pour la sécurité et la santé de la population et des communautés de même que sur les activités économiques, l'environnement bâti et l'environnement naturel. Finalement, sur le plan régional, plusieurs municipalités, dont Sherbrooke (Enviro-accès, 2013), Montréal (Ville de Montréal, 2019) et Trois-Rivières (SNC-Lavalin, 2013), ont développé ou sont en train de développer, des stratégies d'adaptation municipales.

Les politiques et programmes gouvernementaux s'appuient sur des lois, règlements, normes et guides conçus pour appuyer la mise en œuvre des meilleures pratiques. Il existe déjà des lois au Québec qui intègrent l'adaptation, comme la *Loi affirmant le caractère collectif des ressources en eau et favorisant une meilleure gouvernance de l'eau et des milieux associés* (RLRQ, C-6.2) et visant à renforcer leur protection et la *Loi sur la sécurité des barrages* (RLRQ, S-3.1.01). Des démarches sont aussi amorcées pour inclure l'adaptation aux changements climatiques dans d'autres lois comme la *Loi sur la sécurité civile* (RLRQ, S-2.3), la *Loi sur l'aménagement et l'urbanisme* (RLRQ, A-19.1) et la *Loi sur la qualité de l'environnement* (RLRQ, Q-2). Du côté des normes et guides, plusieurs exemples d'intégration de l'adaptation aux changements climatiques existent. La norme *BNQ 3019-190* du Bureau de normalisation du Québec (BNQ, 2013) propose un aménagement stratégique des aires de

stationnement pour éviter la formation d'îlots de chaleur dans un objectif de protection de santé publique. Le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (MELCC) a aussi développé le *Guide de gestion des eaux pluviales* (Osseyrane et coll., 2014) et le Conseil canadien des ingénieurs (CCI) a instauré le *Protocole d'ingénierie du Comité sur la vulnérabilité de l'ingénierie des infrastructures publiques* (Ingénieurs Canada, 2016) afin d'intégrer les changements climatiques dans leur pratique.

Finalement, les outils économiques et financiers comprennent, entre autres, les assurances, les taxes et les subventions ainsi que l'ajustement ou l'augmentation des prix des ressources (Ouranos, 2015).

1.2.3 Information et savoir

L'information et le savoir, scientifique et traditionnel, doivent être structurés de façon à cibler les besoins spécifiques des acteurs dans différents domaines d'expertise. Les outils développés peuvent aider à identifier les sensibilités ou à élaborer des stratégies d'adaptation aux conditions climatiques projetées. L'éducation et la sensibilisation sont aussi des éléments essentiels de l'adaptation. La prise de conscience est une des premières étapes pour s'adapter aux changements climatiques et passe par la sensibilisation des acteurs concernés par l'adaptation : décideurs, gestionnaires, entrepreneurs, travailleurs et citoyens (Le Goff et coll., 2012). Avoir une meilleure compréhension des impacts, des sensibilités et des risques climatiques actuels et futurs facilite la prise de décision, le développement et la mise en œuvre de stratégies d'adaptation efficaces.

1.3 Approche d'adaptation développée au Québec

Afin de s'assurer de la mise en place d'un processus de transfert de connaissances efficace, il apparaît pertinent de consulter les personnes et organisations qui sont affectées par les changements climatiques et sont responsables de mettre en place les activités d'adaptation. L'information et le savoir, scientifique et traditionnel, doivent ainsi être structurés de façon à cibler les besoins spécifiques des acteurs. Dans le cadre de ce projet de recherche, le bassin

versant de la Saint-Régis a été étudié afin de développer l'analyse de sensibilité aux changements climatiques d'un territoire spécifique et en évaluer éventuellement la performance.

1.3.1 Acteurs de l'adaptation des bassins versants

Au Québec, une partie importante des activités dans la lutte et l'adaptation aux changements climatiques sont réalisées en partenariat avec Ouranos. Le consortium de climatologie régionale, qui sert de point de concertation pour les initiatives québécoises, intègre quelque 250 scientifiques et professionnels issus de différentes disciplines et est une source continue de création de données scientifiques quant à l'adaptation aux changements climatiques et à leurs impacts (PACC, 2012).

Afin d'améliorer la compréhension des besoins et du positionnement des différents acteurs de la gestion du territoire, le projet de communautés de pratique Rés-Alliance a vu le jour en 2017 au Québec (ROBVQ, 2020). Le projet financé par le Fonds vert dans le cadre d'Action-Climat Québec, la Rés-Alliance est un regroupement de huit collectivités qui œuvrent à développer, sur leur territoire, des pratiques en adaptation aux changements climatiques sous la coordination du Regroupement des organismes de bassins versants du Québec (ROBVQ). La démarche d'adaptation proposée par la Rés-Alliance (ROBVQ, 2018) compte cinq (5) étapes, soit :

- 1) engager la communauté;
- 2) définir et caractériser le territoire (cadre et portrait);
- 3) évaluer les vulnérabilités (diagnostic);
- 4) établir un plan d'action sur la base de scénarios probables et possibles;
- 5) mise en œuvre et suivi.

Le ROBVQ, qui chapeaute les activités de concertation des bassins versants, est un organisme à but non lucratif créé en 2001 pour la mise en place d'une gouvernance dans la gestion intégrée de l'eau par bassin versant au Québec (ROBVQ, 2019). Afin d'accompagner les communautés,

l'organisme a développé une matrice d'évaluation des vulnérabilités, ou sensibilités, du territoire. Cette matrice, accompagnée d'un guide méthodologique, est une méthode d'évaluation des sensibilités basée sur une approche par problématique, territoriale et participative qui découle du *Guide sur l'intégration de la variabilité climatique dans les Plans directeurs de l'eau* (ROBVQ, 2018). Basée sur une approche par problématique, elle est divisée en trois sous-matrices, soit la matrice d'analyse de la sensibilité, la matrice d'analyse de l'exposition et la matrice de capacité d'adaptation. Pour l'utiliser, le territoire du système à l'étude doit d'abord être subdivisé en définissant l'unité géographique d'analyse, qui sert de base commune à l'évaluation des sensibilités (zone, municipalité, quartier, tronçon de cours d'eau, etc.). Ensuite, une matrice d'analyse de la sensibilité est complétée afin d'identifier les actifs présents dans chaque unité géographique d'analyse, puis la perturbation de l'usage étudié. L'analyse de sensibilité permet d'évaluer l'impact potentiel de la perturbation sur un actif. L'étape suivante consiste à compléter une matrice d'analyse d'exposition afin d'évaluer le degré d'exposition d'une unité géographique au scénario climatique et hydroclimatique futur en fonction de l'intensité, la durée et la fréquence de la perturbation. Finalement, la matrice d'analyse de la capacité d'adaptation intègre les informations socio-économiques du territoire, telles que la richesse, la technologie, l'éducation, l'information, les compétences, les infrastructures, l'accès aux ressources et les institutions.

1.3.2 Modèles d'analyse de la vulnérabilité

Afin de hiérarchiser les besoins en matière d'adaptation, une évaluation de la vulnérabilité d'un territoire et de sa communauté doit être réalisée. Dans son rapport de 2007, le GIEC définit la vulnérabilité (GIEC, 2007) comme suit :

« Mesure dans laquelle un système est sensible – ou incapable de faire face – aux effets défavorables des changements climatiques, y compris la variabilité du climat et les phénomènes extrêmes. La vulnérabilité est fonction de la nature, de l'ampleur et du rythme de l'évolution et de la variation du climat à laquelle le système considéré est exposé, de la sensibilité de ce système et de sa capacité d'adaptation. »

La vulnérabilité d'un territoire dépend des trois composantes suivantes : la variabilité du climat, la sensibilité du territoire et sa capacité d'adaptation. La variabilité du climat correspond aux aléas climatiques qui pourraient survenir et aux changements probables de l'état moyen et autres variables statistiques (écarts types, phénomènes extrêmes) du climat à toutes les échelles temporelles. La variabilité peut être due à « des processus internes naturels au sein du système climatique ou à des variations des forçages externes anthropiques ou naturels » (GIEC, 2007). La capacité d'adaptation est l'ensemble des capacités et ressources d'une entité lui permettant de mettre en œuvre des mesures d'adaptation ou d'atténuation des impacts efficaces. Finalement, la sensibilité d'un territoire – à ne pas confondre avec la notion de sensibilité du climat – est le degré auquel un système est influencé, positivement ou négativement, par la variabilité climatique.

Il existe plusieurs modèles d'analyse de vulnérabilité aux changements climatiques, dont « Impact'Climat 2015 » de l'ADEME (ADEME, 2015), l'« Outil d'évaluation des risques et des vulnérabilités dans un contexte de changements climatiques » du ROBVQ (ROBVQ, 2018) et la « Matrice de vulnérabilité pour la mise en place d'un plan d'adaptation » de l'Institut de Développement Durable des Premières Nations du Québec et du Labrador (IDDPNQL, 2014). Les caractéristiques de ces différents outils sont présentées au Tableau 1.2.

Tableau 1.2 : Exemples de modèles d'analyse de vulnérabilité aux changements climatiques

Analyse de vulnérabilité	Agence	Niveau du territoire
Impact'Climat 2015	ADEME	Collectivité
Outil d'évaluation des risques et des vulnérabilités dans un contexte de changements climatiques	ROBVQ	Bassin versant
Matrice de vulnérabilité pour la mise en place d'un plan d'adaptation	IDDPNQL	Communauté des Premières Nations

Afin de mettre en évidence les étapes menant au développement d'une analyse de sensibilité, une synthèse des matrices de l'ADEME et du ROBVQ est présentée. La matrice « Impact

Climat 2015 » de l'ADEME (ADEME, 2015) a été conçue en tant qu'outil pour permettre aux collectivités d'entamer une réflexion sur l'adaptation à travers un prédiagnostic de sensibilité. Développé sur Excel®, l'outil permet de visualiser les résultats relatifs aux impacts des changements climatiques et à la sensibilité du territoire, tel que présenté à la Figure 1.3.

		Sensibilité			
		Faible (1)	Moyenne (2)	Forte (3)	Très forte (4)
Exposition	Forte (3)	3	6 Énergie - Baisse de la demande en hiver	9 Eau - Baisse de la disponibilité de la ressource	12
	Moyenne (2)	2	4	6 Forêt - Dépérissement	8 Énergie - Coupures fréquentes
	Faible (1)	1 Tourisme - Modification des paysages	2	3	4

Figure 1.3 : Présentation type des résultats de la matrice « Impact'Climat 2015 » de l'ADEME (adapté de ADEME, 2015)

La matrice « Outil d'évaluation des risques et des sensibilités dans un contexte de changements climatiques » du ROBVQ (ROBVQ, 2018), décrite dans les sections précédentes est aussi un outil sous forme de fichier Excel® visant à estimer les impacts réels et potentiels des perturbations climatiques sur les usages et les actifs qui leur sont associés. Le format type de visualisation des résultats est présenté à la Figure 1.4.

	Élevé	Vulnérabilité globale		
Capacité d'adaptation	↑	Très faible vulnérabilité	Faible vulnérabilité	Vulnérabilité modérée
		Faible vulnérabilité	Vulnérabilité modérée	Haute vulnérabilité
		Vulnérabilité modérée	Haute vulnérabilité	Vulnérabilité très élevée
	Faible	→		
		Principaux groupes d'actifs sensibles	Principales causes	Principales perturbations
		Unité géographique la plus à risque	Unité géographique la plus apte à s'adapter	Unité géographique la plus vulnérable au changement climatique

Figure 1.4 : Présentation type des résultats de la matrice « Outil d'évaluation des risques et des vulnérabilités dans un contexte de changements climatiques » du ROBVQ (adapté de ROBVQ, 2018)

Le Tableau 1.3 compare les étapes de développement des résultats de chacune des analyses de vulnérabilité, ou sensibilité. L'identification du territoire est une caractéristique commune aux deux matrices. En effet, il est essentiel de délimiter les unités géographiques à la bonne échelle spatiale pour cibler des actions significatives pour les différents paliers de gestionnaires du territoire.

Tableau 1.3 : Étapes de développement des résultats des analyses de vulnérabilité

Étape	ADEME	ROBVQ
1	Identification du territoire	
2	Choix des thématiques	Choix de l'actif à évaluer
3	Identification des caractéristiques actuelles du climat et des évolutions tendanciennes passées	Choix de la problématique à évaluer
4	Identification des paramètres climatiques et aléas induits	Évaluation de l'impact actuel de la problématique sur l'actif
5	Définition du niveau d'exposition pour chacun des paramètres climatiques	Évaluation des impacts potentiels des changements climatiques sur la problématique
6	Évaluation de l'impact observé de l'aléa induit	Évaluation de la certitude de la relation entre la perturbation et la cause de la problématique
7	Combinaison de ces éléments pour développer la matrice de vulnérabilité	

Les échelles d'évaluation de la sensibilité permettent de comparer les évaluations qualitatives de la sensibilité du territoire à l'aléa considéré. Ces échelles, utilisées pour l'analyse de risque, comportent habituellement quatre (4) ou cinq (5) paliers. À titre d'exemple, l'ADEME utilise les quatre (4) paliers présentés au Tableau 1.4.

Tableau 1.4 : Paliers de sensibilité utilisés dans l'analyse de vulnérabilité de l'ADEME

Palier	Description
1	Sensibilité faible
2	Sensibilité moyenne
3	Sensibilité forte
4	Sensibilité très forte

Le ROBVQ, qui, de son côté, détermine la sensibilité des actifs à partir de l'impact actuel de la problématique sur ceux-ci, utilise les cinq (5) paliers présentés au Tableau 1.5.

Tableau 1.5 : Paliers de sensibilité utilisés dans l'analyse de vulnérabilité du ROBVQ

Palier	Description
0	L'unité géographique n'est pas impactée
0,5	L'unité géographique est actuellement assez peu impactée
1,0	L'unité géographique est actuellement moyennement impactée
1,5	L'unité géographique est actuellement assez impactée
2,0	L'unité géographique est actuellement très impactée

1.3.3 Contexte territorial du bassin versant de la Saint-Régis

La rivière Saint-Régis est située en Montérégie et rassemble les six municipalités de Saint-Constant, Saint-Isidore, Saint-Rémi, Sainte-Catherine, Delson et Saint-Michel. Son bassin versant a une superficie de 93 km² et est principalement occupé par des activités agricoles (82%) et urbaines (15%) (Google Earth, 2020).

Afin de dresser le portrait hydroclimatique du territoire du bassin versant de la Saint-Régis, une cartographie participative a été réalisée en identifiant les éléments importants pour la sensibilité et l'adaptation du territoire sur le logiciel « Google Earth » et en la bonifiant de couches partagées par la MRC de Roussillon et tirées de l'*Atlas des territoires d'intérêt pour la conservation dans les Basse-Terre du Saint-Laurent* (Jobin et coll., 2018).

Suite aux consultations ayant été tenues au cours de l'année 2017, un portrait préliminaire a été produit à partir des observations fournies par les participants et des données de l'*Atlas hydroclimatique du Québec méridional de 2015* (CEHQ, 2015). La stabilisation des rives, la gestion des eaux pluviales et les inondations sont des problématiques importantes pour le territoire, qui devraient s'amplifier dans le futur. Les analyses présentées dans l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional pour cette région indiquent une tendance à l'augmentation des crues hivernales, des crues printanières moins importantes, des étiages plus

prononcés en périodes estivales et automnales ainsi que des crues soudaines plus probables durant des événements de pluies torrentielles, tel que présenté au Tableau 1.6.

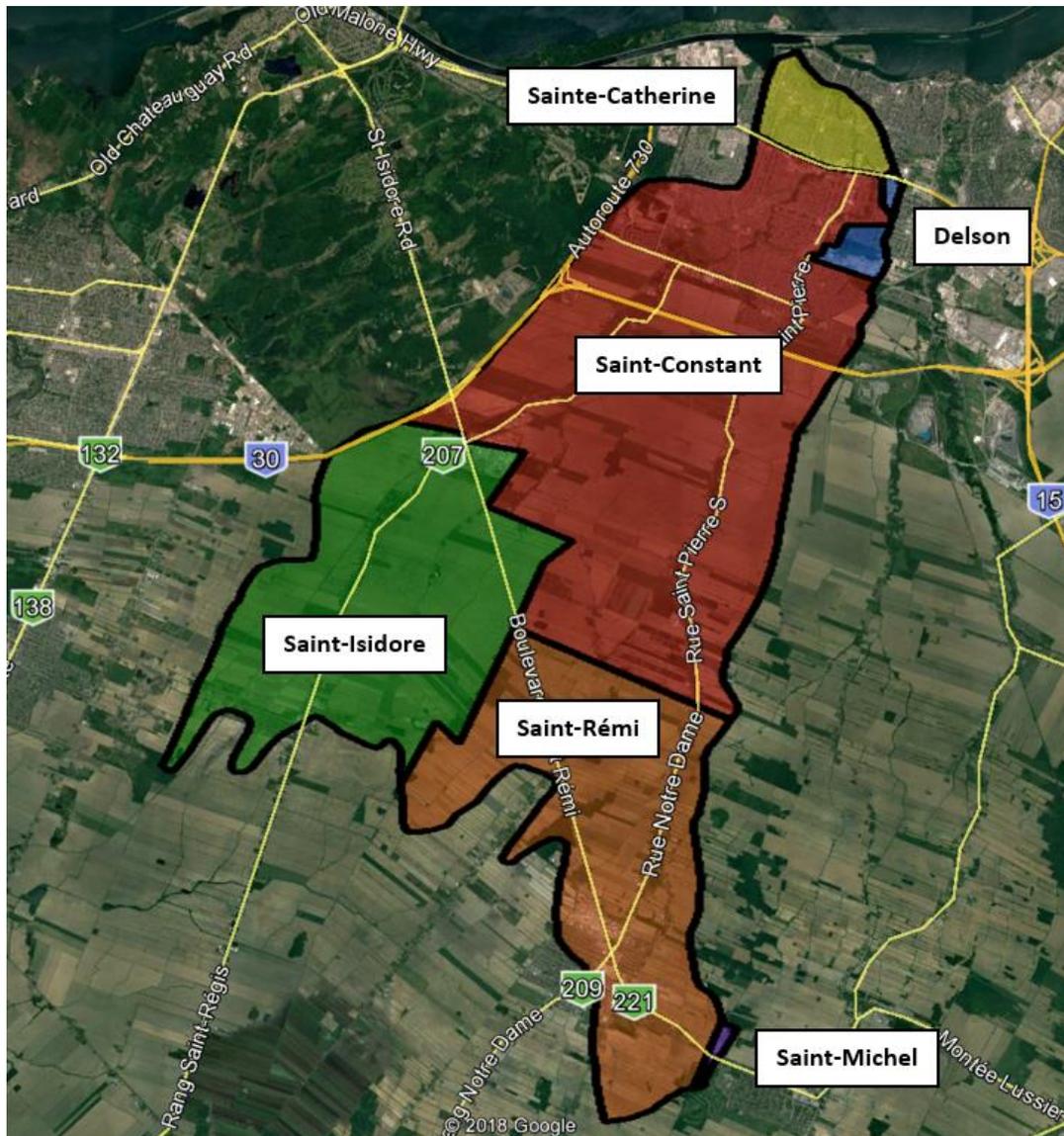


Figure 1.5 : Répartition des six (6) municipalités au sein du bassin versant de la rivière Saint-Régis

Tableau 1.6 : Tendances prévues par l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional pour la région du bassin versant de la rivière Saint-Régis

Changement	Saison
Augmentation probable du débit journalier maximal annuel de récurrence de 20 ans	Été Automne
Augmentation très probable du débit moyen minimum annuel de récurrence 2	Hiver
Augmentation probable du débit moyen minimum annuel de récurrence 5 et 10 ans	
Diminution très probable du débit moyen minimum annuel de récurrence de 2, 5 et 10 ans	Été
Augmentation probable du débit moyen	Hiver Printemps
Diminution probable du débit moyen	Été Automne
Augmentation du nombre d'événements de fortes précipitations	Année
Augmentation probable de la température de 2 à 6°C	Année

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre est divisé en deux parties. La première partie traite de l'approche utilisée pour établir la structure de la matrice de sensibilité et présente le cheminement suivi pour déterminer le format de présentation des résultats. La deuxième partie aborde les détails relatifs à l'étude de cas des municipalités du bassin versant de la rivière Saint-Régis et les ressources disponibles pour compléter le traitement de l'information présentée dans la matrice.

2.1 Structure de l'information et indicateurs de sensibilité

L'approche méthodologique associée à l'élaboration de la structure de l'information repose sur une approche matricielle permettant d'identifier, d'une part, les interactions entre une cause potentielle associée à un aléa hydroclimatique et une composante du territoire à l'étude et, d'autre part, la sensibilité de la communauté en regard des différentes composantes affectées par l'aléa.

2.1.1 Choix de l'échelle spatiale

La notion de sensibilité est un concept dynamique qui varie d'un système à l'autre. Le choix de l'échelle spatiale est un élément déterminant du niveau d'implication des différents paliers d'organisation de la société dans la mise en place d'un plan d'adaptation. En effet, l'analyse des sensibilités à une échelle régionale, locale ou globale permet de cibler l'envergure des mesures d'adaptation et le niveau d'implication des populations touchées. Le choix de l'échelle spatiale peut aussi être influencé par la disponibilité de données pertinentes pour l'évaluation ou de ressources financières ou humaines pour compléter l'analyse. Dans le cadre de ce projet de recherche, la matrice de sensibilité a été développée pour répondre aux besoins de du projet de Rés-Alliance du bassin versant de la Saint-Régis. Par conséquent, afin de faire ressortir les sensibilités spécifiques au bassin versant de la Saint-Régis et d'identifier des actions

d'adaptation qui peuvent être entreprises au niveau local, l'échelle des six municipalités a été retenue.

2.1.2 Événements hydroclimatiques

Les événements hydroclimatiques du bassin versant de la Saint-Régis ont été classés en deux catégories :

- ❖ les événements reliés à une augmentation des débits et précipitations, et par conséquent des risques d'inondation;
- ❖ les événements reliés à une hausse de la température.

Le Tableau 2.1 présente les événements hydroclimatiques considérés dans la démarche d'analyse de la sensibilité des territoires à l'étude.

Tableau 2.1 : Événements hydroclimatiques des matrices de sensibilité du bassin versant de la rivière Saint-Régis

Catégories d'aléas	Événements
Inondation	Augmentation des débits de crue
	Embâcle de glace
	Accumulation d'eau au sol en raison de fortes précipitations
	Érosion riveraine
	Embâcle de sédiments
Hausse de température	Sécheresse
	Canicules

2.1.3 Composantes territoriales

En ce qui concerne le territoire, le développement de la structure matricielle vise à considérer et renseigner la sensibilité des composantes territoriales en considérant d'une part, les facteurs

amplificateurs et, d'autre part, les fonctions suivantes dans le processus de diffusion de l'aléa sur le territoire, soit : (i) les ouvrages urbains; (ii) les services urbains; (iii) les services à caractère économiques. Afin d'amener les utilisateurs de la démarche d'analyse de la sensibilité à dresser un portrait physique du territoire à l'étude, quelques types de facteurs physiques amplificateurs sont intégrés dans la matrice, tels que présentés au Tableau 2.2.

Tableau 2.2 : Facteurs physiques potentiellement amplificateurs de la sensibilité du territoire

Facteurs	Effet potentiel
Nature des sols	Selon la nature des sols, la perméabilité de ceux-ci est différente. Par conséquent, les sols n'absorbent pas l'eau de la même façon.
Type de surface / Couverture des sols	Les sols recouverts d'asphalte ou de béton n'absorbent pratiquement pas l'eau. Par conséquent, cela favorise l'accumulation ou le ruissellement de l'eau. La végétalisation des berges a aussi un impact sur la sensibilité du territoire. En effet, une berge végétalisée est beaucoup moins sujette à l'érosion. Par ailleurs, les surfaces d'asphalte et de béton amplifient le phénomène d'îlots de chaleur qui accentuent les phénomènes de canicules.
Hauteur de la nappe phréatique / Saturation des sols	Plus la nappe phréatique est haute, plus les sols sont saturés et ne peuvent absorber l'eau. Par ailleurs, si la nappe est basse, les puits fournissent moins d'eau pour des activités comme l'agriculture ou les services municipaux (eau potable ou réserve incendie).
Topographie / Pente de l'écoulement	L'absence de pente favorise l'accumulation de l'eau.

Les ouvrages urbains sont définis en tant qu'infrastructures dont l'entretien est géré à l'extérieur de la juridiction municipale (un pont ou un barrage, par exemple) ou en tant que réseau d'infrastructures, qui traverse souvent plusieurs territoires (un réseau routier ou une ligne de transport d'électricité). Les services urbains sont définis en tant que bâtiments ou installations spécifiques, présentes sur le territoire ou le desservant. Ces infrastructures fournissent des services, publics ou privés, aux citoyens. Les services économiques sont définis à partir des zones du territoire où sont réalisées des activités agricoles, industrielles ou de commerce de détail. Dans le cas où ces secteurs seraient affectés par un événement hydroclimatique, une portion plus ou moins importante de la population pourrait être sans emploi, et deviendrait vulnérable. Les « éléments à l'étude » sont délimités en utilisant les

cartes de zonage fournies par les départements d'urbanisme de chacune des municipalités. Les zonages agricoles, industriels, commerciaux et mixtes ont été analysés. Pour chaque « zone » agricole, industrielle, commerciale ou mixte, le territoire est étudié afin de déterminer le niveau de sensibilité de celui-ci aux événements hydroclimatiques. Le Tableau 2.3 présente les catégories de composantes considérées pour chacun des aspects mentionnés.

Tableau 2.3 : Catégories principales des composantes de la structure matricielle

Facteurs amplificateurs	Ouvrages urbains	Services urbains	Services économiques
Nature des sols	Réseaux routiers	Établissements de santé	Industries
Type de surface Couverture du sol	Lignes transport électricité	Tours de télécommunication	Installations agricoles
Hauteur de nappe Saturation des sols	Réseaux de drainage	Usines de traitement des eaux	Commerces
Topographie Pente	Barrages	Centres d'hébergement de soins de longue durée	
	Ponceaux	Centres de la petite enfance	
	Ponts	Établissements correctionnels	
	Gazoducs	Établissements d'éducation	
	Etc.	Postes de police	
		Stations de pompage	
		Puits d'eau potable	
		Casernes de pompier	
		Postes électriques	
		Stations d'essence	
		Énergie éolienne	
		Stations de train de banlieue	
		Autres	

L'analyse de la sensibilité d'une composante en regard de chacune des causes potentielles associées à un aléa hydroclimatique est basée sur l'analyse de l'information disponible, en considérant les sources de connaissances suivantes :

- ❖ personnel des hôtels de ville des municipalités;
- ❖ observations à partir des logiciels Google Map et Google Earth;

- ❖ sites Web des services municipaux du territoire à l'étude;
- ❖ rapports d'études (gouvernements, agences, municipalités, organismes, universités, etc.);
- ❖ professionnels agissants à titre de représentants pour différentes entités (associations d'agriculteurs, comités citoyens, ministères, municipalités, etc.)
- ❖ observations sur la base de visites de terrain ou de plans fournis par le service d'urbanisme des municipalités.

2.1.4 Priorisation des sensibilités

Dans un contexte où les gestionnaires du territoire doivent agir avec des ressources limitées, il est nécessaire de prioriser les interventions en matière d'adaptation. Par conséquent, un système de classement pour favoriser la priorisation des sensibilités a été mis en place. La caractérisation de la sensibilité issue de l'analyse des différentes sources d'information s'appuie sur une double échelle de valeurs qui associe le degré de sensibilité de la composante en regard de chacune des causes d'aléa avec la nature de l'information. Cette double échelle est définie d'une part, selon un code de couleur à quatre niveaux afin d'identifier le degré de sensibilité basé sur le principe de probabilité d'occurrence et, d'autre part, un code numérique de 1 à 4 pour révéler la nature de la source de l'information.

Le code de couleur à 4 niveaux s'inspire des niveaux développés dans les outils d'analyse de l'ADEME (2015) et du ROBVQ (2018). Il vise à définir la probabilité d'occurrence de l'événement :

- ❖ **Gris** : Lorsqu'il ne semble pas probable qu'un événement hydroclimatique induise un aléa sur un ouvrage urbain, service urbain ou service économique, la case située au croisement entre l'événement hydroclimatique et l'élément étudié est grise.
- ❖ **Jaune** : La probabilité qu'un événement hydroclimatique induise un aléa sur un ouvrage urbain, service urbain ou service économique est faible, la case située au croisement entre l'événement hydroclimatique et l'élément étudié est jaune.

- ❖ **Orange** : La probabilité qu'un événement hydroclimatique induise un aléa sur un ouvrage urbain, service urbain ou service économique est moyenne, la case située au croisement entre l'événement hydroclimatique et l'élément étudié est orange.
- ❖ **Rouge** : La probabilité qu'un événement hydroclimatique induise un aléa sur un ouvrage urbain, service urbain ou service économique est élevée, la case située au croisement entre l'événement hydroclimatique et l'élément étudié est rouge.

Par ailleurs, la connaissance (source de l'information) du territoire ou de l'élément par l'utilisateur ayant établi le niveau de probabilité est indiquée à l'aide d'une échelle de 1 à 4 :

1. La probabilité d'occurrences est déterminée à partir de connaissances générales, sans connaître l'emplacement spécifique de l'élément ou l'état de l'ensemble du territoire;
2. La probabilité d'occurrences est déterminée à partir de connaissances générales, mais aussi d'analyses du site à l'étude à l'aide de logiciels de cartographies (Google Map, Google Earth, Street View, etc.) et/ou de photographies;
3. La probabilité d'occurrences est déterminée à partir d'une visite physique du site;
4. La probabilité d'occurrences est déterminée à partir d'information provenant directement d'un propriétaire ou d'un occupant du site à l'étude ou de la consultation d'une étude ou d'un rapport technique sur le terrain en question.

La Figure 2.1 présente une synthèse de la légende de priorisation des sensibilités qui est utilisée dans le cadre de l'approche matricielle développée.

		Risque			
		Absence	Faible	Moyen	Élevé
Légende					
Connaissance du territoire	Générale	1	1	1	1
	Photos et cartes	2	2	2	2
	Visite de terrain	3	3	3	3
	Témoignage, étude, rapport	4	4	4	4

Figure 2.1 : Légende de priorisation des sensibilités

2.1.5 Indicateurs sociaux et économiques

L'analyse des indicateurs sociaux a pour objectif d'identifier les systèmes ou les groupes de populations les plus exposés aux conséquences d'événements hydroclimatiques. Cette démarche vise à identifier les populations qui sont sensibles advenant la défaillance ou la perte de fonctionnalité d'un service urbain ou d'un service économique. Dans le cadre de l'analyse de sensibilité du bassin versant de la Saint-Régis, les catégories retenues s'appuient sur les données de Statistiques Canada (2017) :

- ❖ personnes âgées de plus de 65 ans;
- ❖ personnes âgées de plus de 85 ans;
- ❖ enfants de moins de 14 ans;
- ❖ personnes vivant seules;
- ❖ ménages nombreux (plus de 5 personnes);
- ❖ familles monoparentales;
- ❖ bâtiments construits avant 1960;
- ❖ réparations majeures requises sur les bâtiments;
- ❖ populations ne parlant pas français;
- ❖ secteurs d'emplois.

Pour chacun des indicateurs sociaux identifiés, les données de Statistiques Canada (2017) ont été utilisées afin de comparer la situation de chacune des municipalités aux statistiques de la région administrative de la Montérégie, puis de la province du Québec. Cette comparaison permet d'apprécier la situation sociale de la municipalité par rapport au contexte général du Québec. À partir de ces valeurs, une appréciation de la sensibilité sociale de la population peut être obtenue. Finalement, en reliant les services urbains (colonnes) à un indicateur social (lignes) à l'aide d'un « X », un lien est établi entre la sensibilité du système bâti et l'impact sur ses utilisateurs vulnérables.

Les indicateurs économiques, reliés aux services économiques du territoire, permettent d'obtenir une appréciation du pourcentage de la population qui dépend d'un secteur

économique spécifique. Les indicateurs économiques ont été déterminés à partir des données de Statistiques Canada (2017) sur l'emploi et ont été utilisés afin de comparer la situation de chacune des municipalités aux statistiques de la région administrative de la Montérégie, puis de la province du Québec. Cette comparaison permet d'apprécier la situation de l'emploi de la municipalité par rapport au contexte général du Québec et d'identifier les secteurs d'emploi les plus importants dans la municipalité. Finalement, en reliant les services économiques (colonnes) à un indicateur économique (lignes) à l'aide d'un « X », un lien est établi entre la sensibilité de la zone économique et l'impact sur les emplois de la municipalité.

2.2 Principe de développement de l'outil matriciel

Dans le cadre du développement de la structure de l'information basée sur une approche matricielle, une attention particulière sera portée à l'interface, la portabilité et l'utilisation de l'outil. En effet, dans l'optique d'une utilisation généralisable par l'ensemble des acteurs, les éléments suivants ont été considérés :

- ❖ l'utilisation de la matrice ne requiert pas de connaissances en programmation;
- ❖ en intégrant des fichiers PDF directement dans le document et qui peuvent être ouverts au choix par un lecteur, la présentation des résultats est plus épurée et concise;
- ❖ le format de présentation des résultats doit permettre d'identifier et de prioriser les sensibilités rapidement;
- ❖ l'outil matriciel et ses fichiers PDF peuvent être distribués sous la forme d'un seul fichier;
- ❖ les résultats sont reproductibles et peuvent être comparés pour deux territoires ayant la même échelle spatiale.

2.3 Acquisition des données spécifiques au territoire du bassin versant de la rivière Saint-Régis

Le bassin versant de la Saint-Régis étant non jaugé et de petite taille, il existe peu d'information quantitative quant aux débits de la rivière. Toutefois, l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional fournit de l'information sur les débits actuels et projetés du bassin versant de la rivière Châteauguay, dont l'exutoire est situé à 14 kilomètres de celui de la rivière Saint-Régis.

Le bassin versant de la rivière Châteauguay, qui draine un territoire de près de 2500 km², prend sa source dans le lac Upper Chateauguay situé dans l'État de New York aux États-Unis pour se jeter dans le fleuve Saint-Laurent environ 120 kilomètres plus loin. Bien que le bassin versant de la rivière Châteauguay soit beaucoup plus grand que celui de la rivière Saint-Régis, la direction (augmentation ou diminution des débits) des changements projetés identifiés dans l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional devrait être la même, car les deux bassins sont situés à proximité l'un de l'autre (communication personnelle, 2017). Les changements projetés dans l'Atlas hydroclimatique de la DEHA et du guide sur les scénarios climatiques d'Ouranos sont présentés au Tableau 2.4, ainsi que les conséquences physiques sur le territoire associées à ces changements.

Tableau 2.4 : Changements projetés du climat dans le bassin versant de la Saint-Régis

Changement	Saison	Conséquences physiques
Augmentation probable du débit journalier maximal annuel de récurrence de 20 ans	Été Automne	- Augmentation des débits de crue - Érosion riveraine - Embâcle de sédiments
Augmentation très probable du débit moyen minimum annuel de récurrence 2	Hiver	- Augmentation des débits de crue - Embâcle de glace - Érosion riveraine - Embâcle de sédiments
Augmentation probable du débit moyen minimum annuel de récurrence 5 et 10 ans		
Diminution très probable du débit moyen minimum annuel de récurrence de 2, 5 et 10 ans	Été	Sécheresse
Augmentation probable du débit moyen	Hiver Printemps	- Augmentation des débits de crue - Embâcle de glace - Érosion riveraine - Embâcle de sédiments
Diminution probable du débit moyen	Été Automne	Sécheresse
Augmentation du nombre d'événements de fortes précipitations	Année	Accumulation d'eau au sol
Augmentation probable de la température de 2 à 6°C	Année	- Canicule - Sécheresse

Les données spécifiques au territoire ont notamment été acquises en consultant la documentation disponible via les sites Web (plans d'urbanisme, page des six (6) municipalités, cartographies Google, etc.), en communiquant avec les services municipaux ainsi qu'en assistant à des rencontres organisées par les différents organismes impliqués dans la gestion intégrée des bassins versants du Québec. Les différents organismes, services ou entreprises présents lors des rencontres réalisées dans le cadre du projet Rés-Alliance sont présentés à l'Annexe I.

CHAPITRE 3

RÉSULTATS

Le chapitre présente dans un premier temps la structure de l’outil d’analyse de la sensibilité développé ainsi que les données et les informations associées à l’étude de cas sur le bassin versant de la St-Régis. Les fonctionnalités de l’outil et les principes de sa mise en œuvre seront présentés dans un deuxième temps. Finalement, dans un troisième temps, une analyse comparative des sensibilités identifiées par la démarche d’analyse matricielle avec les actions identifiées dans le cadre du projet Rés-Alliance sera abordée.

3.1 Organisation structurelle de l’information

L’élaboration de l’outil d’analyse de la sensibilité d’un territoire repose sur une organisation de l’information qui reprend une structure de « cause à effet » de l’aléa climatique vers les infrastructures de services aux citoyens. L’acquisition des données spécifique au territoire à l’étude permet dès lors de préciser les différentes catégories d’information. La Figure 3.1 présente le schéma général de la structure de la matrice de sensibilité.

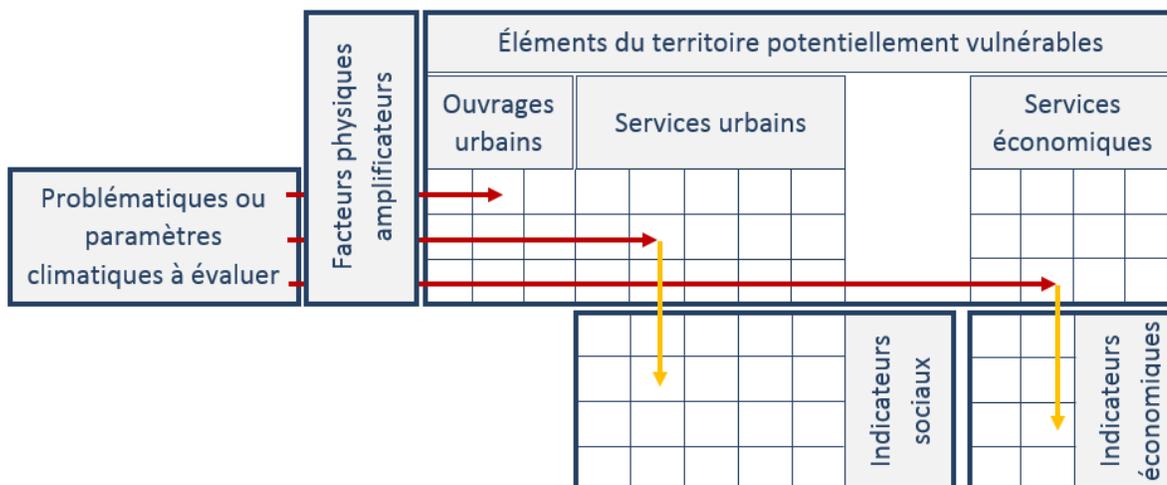


Figure 3.1 : Schéma de la structure de la matrice de sensibilité

Les facteurs physiques amplificateurs spécifiques au bassin versant de la rivière Saint-Régis sont présentés au Tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Facteurs physiques amplificateurs spécifiques au bassin versant de la rivière Saint-Régis

Facteurs	Situation du bassin versant de la rivière Saint-Régis
Nature des sols	Le bassin versant de la Saint-Régis est situé dans la province géologique de la plate-forme du Saint-Laurent et sa géologie est composée de calcaire, shale gris ou noir, dolomie, siltite et grès.
Type de surface / Couverture des sols	Le bassin versant de la Saint-Régis est utilisé à 82% pour des activités agricoles et à 15% pour des activités urbaines.
Hauteur de la nappe phréatique / Saturation des sols	La hauteur de la nappe phréatique n'est pas la même pour l'ensemble du bassin versant. Les hauteurs varient selon l'endroit et le temps de l'année.
Topographie / Pente de l'écoulement	Le point haut (en limite amont) du bassin versant de la Saint-Régis est situé à un niveau de 68 mètres. Le point bas (en limite aval) du bassin versant est situé à un niveau de 16 mètres. La distance entre les deux points est de 18 870 mètres et la pente générale de l'écoulement est de 0,28%.

En ce qui concerne les ouvrages urbains, le Tableau 3.2 présente les informations issues de l'analyse des sensibilités des ouvrages urbains présents sur le territoire de plusieurs municipalités du bassin versant de la Saint-Régis.

Tableau 3.2 : Informations issues de l'analyse des sensibilités des ouvrages urbains

Ouvrage	Information
Gazoducs-Oléoducs	Les gazoducs ou oléoducs, majoritairement sous terre, ne sont pas particulièrement vulnérables dans le cas d'inondations ou de sécheresse.
Lignes électriques	Les lignes de transport d'électricité ne sont pas particulièrement vulnérables dans le cas d'inondations ou de sécheresse.
Ponceaux	Comme il n'y a pas beaucoup d'information sur les ponceaux, il est conservateur d'estimer que ceux-ci peuvent être vulnérables en cas de crue extrême ou d'embâcles de sédiments. Cependant, il est improbable qu'un embâcle de glace se forme dans un ponceau.
Réseau de drainage	Il est raisonnable de considérer qu'un réseau de drainage est toujours vulnérable lors d'une accumulation importante d'eau au sol.
Réseau routier	Les routes principales ne sont pas près d'un cours d'eau, donc ne sont pas vulnérables dans le cas d'une crue, d'embâcles ou d'érosion. Toutefois, il est raisonnable de penser qu'en cas de fortes précipitations, il pourrait y avoir une accumulation d'eau à certains endroits sur les routes principales.

Sur la base des informations collectées sur les ouvrages urbains du territoire, la Figure 3.2 présente la section des ouvrages urbains pour le bassin versant de la rivière Saint-Régis telle qu'intégrée dans la matrice de sensibilité.

Ouvrages urbains					
	Réseaux routiers	Ponceaux	Réseaux de drainage	Lignes de transport d'électricité	Gazoducs/Oléoducs
	1	1	1	1	1
	1	1	1	1	1
	1	1	1	1	1
	1	1	1	1	1
	1	1	1	1	1

Figure 3.2 : Ouvrages urbains tels qu'intégrés dans la matrice de sensibilité

Le Tableau 3.3 présente les informations issues de l'analyse des sensibilités des services urbains qui sont communs à l'ensemble du bassin versant de la rivière Saint-Régis. Les sensibilités spécifiques des services urbains de chacune des municipalités du bassin versant sont présentées à l'Annexe II.

Tableau 3.3 : Informations issues de l'analyse des sensibilités des services urbains des municipalités du bassin versant de la Saint-Régis

Service	Information
Établissement de santé	<p>Dans le cas d'une urgence de santé, les citoyens du bassin versant de la St-Régis sont redirigés vers l'Hôpital Anna-Laberge, à Châteauguay, qui ne semble pas être vulnérable aux inondations ou sécheresse.</p> <p>Source: <i>Communications avec les municipalités du bassin versant pour identifier l'établissement de santé et observations Google Map et Google Earth Pro pour en déterminer la sensibilité</i></p> <p>Code couleur-chiffre: Comme il n'y a pas de sensibilité identifiée, la couleur grise est utilisée pour toutes les cases reliées à cet item. Le chiffre 2 est utilisé pour identifier le niveau de connaissance.</p>
Poste électrique	<p>Le poste électrique qui dessert la Ville de Delson est le « Poste Delson », qui est situé à proximité de la rivière de la Tortue. Il est peu probable que l'augmentation de la crue soit à elle seule assez importante pour faire déborder la rivière jusqu'au Poste Delson. Toutefois, dans le cas où cet événement serait couplé avec un embâcle de glace ou de sédiments, la rivière pourrait sortir de son lit et atteindre le Poste.</p> <p>Source: <i>Observations Google Maps et Google Earth Pro</i></p> <p>Code couleur-chiffre: Comme il y a une faible probabilité de sensibilité pour les événements d'embâcles de glace et de sédiments et de canicule, la couleur jaune est utilisée pour ces événements. Le chiffre 2 est utilisé pour identifier le niveau de connaissance.</p>
Tours de télécommunication	<p>L'information sur les tours de télécommunication n'est pas disponible. Cependant, il est peu probable que les lignes de transport d'électricité puissent être particulièrement sensibles dans le cas d'inondations ou de sécheresse.</p> <p>Source: <i>Connaissances générales</i></p> <p>Code couleur-chiffre: Comme il n'y a pas de sensibilité identifiée, la couleur grise est utilisée pour toutes les cases reliées à cet item. Le chiffre 1 est utilisé pour identifier le niveau de connaissance.</p>

Sur la base des informations collectées sur les services urbains du territoire, la Figure 3.3 présente un extrait de l’outil d’analyse de la sensibilité associé à la section des services urbains pour la municipalité de Saint-Michel.

Services urbains										
	Établissement de santé	Caserne de pompiers	Poste de police	Centre de la petite enfance	Établissement d'éducation	Usines de traitement des eaux	Puits d'eau potable	Tours de télécommunication	Poste électrique	Énergie éolienne
	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	2	2	2	2	2	1	1	1	2	1
	2	2	2	2	2	1	1	1	2	1
	2	2	2	2	2	1	1	1	2	1
	2	2	2	2	2	1	1	1	2	1
	2	2	2	2	2	1	1	1	2	1
	2	2	2	2	2	1	1	1	2	1
	2	2	2	2	2	1	1	1	2	1
	2	2	2	2	2	1	1	1	2	1

Figure 3.3 : Services urbains tels qu’intégrés dans la matrice de sensibilité de Saint-Michel

Le Tableau 3.4 présente les informations issues de l’analyse des sensibilités des services urbains spécifiques à la municipalité de Saint-Michel.

Tableau 3.4 : Informations issues de l'analyse des sensibilités des services urbains de la municipalité de Saint-Michel

Service	Information
<p>Établissement d'éducation</p>	<p>L'École Saint-Michel Archange ne semble pas être vulnérable aux inondations ou sécheresses. Toutefois, plusieurs écoles ne possèdent pas de systèmes de climatisation et leurs occupants sont vulnérables en situation de canicules.</p> <p>Source: <i>Observations Google Map et Google Earth Pro et connaissances générales à partir d'articles de journaux rédigés lors des dernières canicules (Mercure et Morasse, 2017)</i></p> <p>Code couleur-chiffre: Comme il y a une forte probabilité de sensibilité pour les événements de canicule, la couleur rouge est utilisée pour ces événements. Le chiffre 2 est utilisé pour identifier le niveau de connaissance.</p>
<p>Caserne de pompiers</p>	<p>La caserne ne semble pas vulnérable aux inondations ou sécheresses. Toutefois, en considérant que la Ville de Saint-Michel s'alimente en eau par des puits, il est raisonnable de penser que la source d'alimentation pour le service incendie provient également de puits. Par conséquent, en cas de sécheresse, la hauteur des puits devrait baisser et réduire la capacité d'alimentation en eau du service des incendies.</p> <p>Source: <i>Communications avec la municipalité de Saint-Michel pour valider que la ville s'alimente en eau par des puits et observations Google Map et Google Earth Pro</i></p> <p>Code couleur-chiffre: Comme il y a une probabilité moyenne de sensibilité pour les événements de sécheresse, la couleur orange est utilisée pour ces événements. Le chiffre 2 est utilisé pour identifier le niveau de connaissance.</p>
<p>Puits d'eau potable</p>	<p>Les puits d'eau potable sont généralement vulnérables aux sécheresses.</p> <p>Source: <i>Communications avec la municipalité de Saint-Michel pour valider que la ville s'alimente en eau par des puits</i></p> <p>Code couleur-chiffre: Comme il y a une probabilité moyenne de sensibilité pour les événements de sécheresse, la couleur orange est utilisée pour ces événements. Le chiffre 1 est utilisé pour identifier le niveau de connaissance.</p>

La Figure 3.4 présente un exemple de section d'indicateurs sociaux tels qu'intégrés dans l'outil d'analyse de sensibilité de la municipalité de Saint-Michel.

Les interactions « services urbains – indicateurs sociaux » sont identifiées par un « X ». Lorsqu'une sensibilité est identifiée par un « X » au niveau des services, cela permet d'établir un lien entre le niveau de sensibilité des infrastructures et l'effet sur les utilisateurs identifiés. Dès lors, le degré de sensibilité le plus élevé (rouge > orange > jaune > gris) sur l'ensemble des infrastructures avec lesquelles la catégorie sociale est en interaction est rapporté à cette catégorie sociale. À titre d'exemple, dans le cas de la Figure 3.4, un lien est établi entre la catégorie « enfant (moins de 14 ans) » et les infrastructures « établissement de la petite enfance » (colonne 1) et « établissement d'éducation » (colonne 2). Comme la probabilité de sensibilité de l'établissement d'éducation est identifiée comme étant élevée (rouge), un niveau de sensibilité élevé est attribué aux indicateurs sociaux « Enfants (moins de 14 ans) ». Le même raisonnement est applicable à la catégorie « Ménages nombreux (>5 personnes) ».

Afin de mieux identifier les spécificités sociales de chacune des municipalités du bassin versant, les statistiques des municipalités ont été comparées aux valeurs moyennes de la région de la Montérégie ainsi que de la province du Québec. Par exemple, dans le cas de la ville de Saint-Michel, à la Figure 3.4, les statistiques indiquent que la population de la municipalité est plus jeune que dans l'ensemble de la Montérégie et du Québec et que les ménages y sont plus nombreux.

Services urbains										
	Établissement de santé	Casernes de pompiers	Poste de police	Centre de la petite enfance	Établissement d'éducation	Usines de traitement des eaux	Puits d'eau potable	Tours de télécommunication	Poste électrique	Énergie éolienne
	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	2	2	2	2	2	1	1	1	2	1
	2	2	2	2	2	1	1	1	2	1
	2	2	2	2	2	1	1	1	2	1
	2	2	2	2	2	1	1	1	2	1
	2	2	2	2	2	1	1	1	2	1
	2	2	2	2	2	1	1	1	2	1
	2	2	2	2	2	1	1	1	2	1
	2	2	2	2	2	1	1	1	2	1

- Indicateurs sociaux -											
X											Personnes âgées (plus de 65 ans) Saint-Michel : 12,6% Montérégie : 18,0% Québec : 18,3%
X											Personnes âgées (plus de 85 ans) Saint-Michel : 0,8% Montérégie : 2,0% Québec : 2,3%
			X	X							Enfants (moins de 14 ans) Saint-Michel : 19,8% Montérégie : 17,2% Québec : 16,3%
							X				Personnes vivant seules Saint-Michel : 22,0% Montérégie : 29,1% Québec : 33,3%
			X	X							Ménages nombreux (> 5 pers.) Saint-Michel : 11,0% Montérégie : 6,6% Québec : 6,0%
			X	X							Familles monoparentales Saint-Michel : 11,0% Montérégie : 11,1% Québec : 10,7%
	X										Année des bâtiments (<1960) Saint-Michel : 14,8% Montérégie : 18,4% Québec : 25,3%
	X										Réparations majeures requises Saint-Michel : 4,7% logements Montérégie : 5,7% logements Québec : 6,4% logements
							X				Populat. ne parlant pas français Saint-Michel : 0,8% Montérégie : 3,8% Québec : 5,5%

Figure 3.4 : Indicateurs sociaux tels qu'intégrés dans la matrice de sensibilité de Saint-Michel

La Figure 3.5 présente un exemple de section des services économiques tels qu'intégrés dans la matrice de sensibilité de la municipalité de Saint-Michel.

Services économiques							
Zones A1, A3 à A5, A7 et A8 Résidentiel et agricole	Zones A2 et A9 à A12 Résidentiel et agricole	Zone A6 Résidentiel, agricole et commerce	Zone Rié-1 à Rié-10 Résidentiel et agricole	Zone C-1 Commerce	Zone C-3 Commerce	Zone C-1 Commerce	Zones CR-1, CR-3 à CR-9 Commerce
2	2	2	2	2	2	2	2
2	2	2	2	2	2	2	2
2	2	2	2	2	2	2	2
2	2	2	2	2	2	2	2
2	2	2	2	2	2	2	2
2	2	2	2	2	2	2	2
2	2	2	2	2	2	2	2

Figure 3.5 : Services économiques tels qu'intégrés dans la matrice de sensibilité de Saint-Michel

Le Tableau 3.5 présente les informations issues de l'analyse des sensibilités des services urbains spécifiques à la municipalité de Saint-Michel.

Tableau 3.5 : Informations issues de l'analyse des sensibilités des services économiques de la municipalité de Saint-Michel

Service	Information
<p>Zones A2 et A9 à A12</p>	<p>Les zones A2 et A9 à A12 sont des zones résidentielles et agricoles. Les ruisseaux Lasaline et Faille pourraient sortir de leur lit dans le cas d'une augmentation importante des débits combinée ou non avec la présence d'embâcles. De plus, les occupants du territoire indiquent qu'ils doivent composer avec des périodes de sécheresse de plus en plus fréquentes.</p> <p>Source: <i>Observations Google Map et Google Earth Pro et témoignages d'occupants du territoire</i></p> <p>Code couleur-chiffre: Comme il y a une forte probabilité de sensibilité pour les événements de sécheresse et une faible probabilité pour les événements d'augmentation des débits, d'embâcles et d'érosion, les couleurs rouges et jaunes sont utilisées pour ces événements. Le chiffre 2 est utilisé pour identifier le niveau de connaissance.</p>
<p>Zones A1, A3 à A8 et Rid-1 à Rid-10</p>	<p>Les zones A1, A3 à A8 et Rid-1 à Rid-10 sont des zones résidentielles, agricoles et commerces. Elles ne semblent pas vulnérables aux inondations, mais les occupants du territoire indiquent qu'ils doivent composer avec des périodes de sécheresse de plus en plus fréquentes.</p> <p>Source: <i>Observations Google Map et Google Earth Pro et témoignages d'occupants du territoire</i></p> <p>Code couleur-chiffre: Comme il y a une forte probabilité de sensibilité pour les événements de sécheresse, la couleur rouge est utilisée pour ces événements. Le chiffre 2 est utilisé pour identifier le niveau de connaissance.</p>
<p>Zone C-1</p>	<p>La zone C-1 est une zone commerciale. Sa surface n'est pas propice à l'absorption de l'eau dans le cas d'une pluie importante. Il est conservateur de considérer qu'il pourrait y avoir accumulation d'eau.</p> <p>Source: <i>Observations Google Maps et Google Earth Pro</i></p> <p>Code couleur-chiffre: Comme il y a une faible probabilité de sensibilité pour les événements d'accumulation d'eau au sol en raison de fortes précipitations, la couleur jaune est utilisée pour ces événements. Le chiffre 2 est utilisé pour identifier le niveau de connaissance.</p>

Sur la base de la sensibilité des services économiques identifiés pour le territoire, il est dès lors possible d'établir les liens avec les indicateurs économiques selon le même principe que pour les indicateurs sociaux. La Figure 3.6 présente un exemple de section d'indicateurs

économiques de l'outil d'analyse des sensibilités pour la municipalité de Saint-Michel. Les interactions sous la forme de « X » permettent ainsi de lier les services économiques (sous la forme de zones agricoles, commerciales ou mixtes) à des indicateurs économiques. Dans le cas des municipalités du bassin versant de la rivière Saint-Régis, les emplois du secteur de l'agriculture et de la foresterie ainsi que du commerce de détail sont les plus présents. Lorsqu'une sensibilité est identifiée au niveau des services, un « X » permet d'établir un lien entre la sensibilité du territoire (ou de la zone) et l'effet sur un secteur d'emploi spécifique. À titre d'exemple, à la Figure 3.6, un lien est établi entre les zones A1 à A12 et Rid-1 à Rid-10 et le secteur des emplois en agriculture ou foresterie. Comme la probabilité de sensibilité des zones A1 à A12 et Rid-1 à Rid-10 est identifiée comme étant élevée, un niveau de sensibilité élevé est attribué à l'indicateur économique « Emplois en agriculture ou foresterie ».

Afin de mieux identifier les spécificités économiques de chacune des municipalités du bassin versant, les statistiques des municipalités ont été comparées aux valeurs moyennes de la région de la Montérégie ainsi que de la province du Québec. Par exemple, dans le cas de la ville de Saint-Michel, à la Figure 3.6, les statistiques indiquent qu'une proportion importante de la population a un emploi dans le secteur de l'agriculture ou de la foresterie en comparaison avec l'ensemble de la Montérégie et du Québec.

3.2 Intégration de l'outil matriciel

La structure de l'information est présentée sous forme matricielle, en utilisant le logiciel MS-Excel ®. La programmation nécessaire au fonctionnement de la matrice a été réalisée à l'aide de l'implémentation de Microsoft Visual Basic, Visual Basic for Applications (VBA). La plateforme Excel a été choisie parce qu'elle permet la consultation et/ou l'utilisation de la matrice par une majorité de collaborateurs, considérant que la suite Microsoft Office est déployée sur la majorité des appareils électroniques (ordinateurs, tablettes, téléphones intelligents).

Afin de synthétiser la présentation de la matrice sur une seule page et de faciliter l'identification des éléments vulnérables pour l'ensemble de l'unité territoriale à l'étude, les informations justifiant le choix d'un niveau de sensibilité sont intégrables dans des documents « PDF », qui peuvent être ajoutés par l'utilisateur en regard des différents éléments du territoire (ouvrages, services urbains ou services économiques). Ces documents identifiables sous la forme d'icônes vertes aux Figures 3.2 à 3.7, sont associables à chaque colonne de la matrice afin de fournir un texte explicatif, des illustrations ou toute information jugée pertinente pour supporter l'analyse de sensibilité. L'Annexe III présente, à titre d'exemple, le document explicatif fourni pour la colonne « Caserne de pompier » des services urbains de la ville de Saint-Michel. L'outil a été programmé de façon à ce que ces documents explicatifs soient inclus directement dans le fichier Excel, ce qui facilite le partage et la transmission de l'information. En effet, en partageant un seul fichier Excel, tous les documents « PDF » suivent l'analyse de sensibilité matricielle et peuvent ainsi être consultés par l'ensemble des intervenants.

Le code couleur-chiffre, qui permet d'identifier et de prioriser les sensibilités lorsque la matrice est consultée, a été mis en place à l'aide de code VBA. Ainsi, en saisissant deux chiffres de 1 à 4, un à la suite de l'autre dans les cases, un chiffre et une couleur apparaissent dans celles-ci. Le premier nombre saisi dans la case reste visible (niveau de l'information) alors que le second détermine la couleur de la case (niveau de sensibilité), suivant la légende de la Figure 2.1

(Chapitre Méthodologie). Le Tableau 3.6 présente les résultats des différentes combinaisons de chiffres qui peuvent être entrées dans la matrice.

Tableau 3.6 : Résultats des différentes combinaisons de chiffres pouvant être entrées dans les cases de la matrice

Nombre	Résultat	Nombre	Résultat	Nombre	Résultat	Nombre	Résultat
11	1	21	2	31	3	41	4
12	1	22	2	32	3	42	4
13	1	23	2	33	3	43	4
14	1	24	2	34	3	44	4

Ainsi, si le nombre 24 est saisi dans une case, le chiffre 2 s'affichera et la case se colorisera en rouge.

Finalement, une procédure VBA a été écrite afin de mettre en évidence le lien entre les services urbains et les indicateurs sociaux ainsi que les services économiques et les indicateurs économiques. Lorsqu'une sensibilité est identifiée dans une des colonnes de services, si cette dernière est reliée par un « X » à un indicateur, l'indicateur prendra la couleur de la sensibilité. Par exemple, dans la Figure 3.8, une probabilité moyenne de sensibilité est identifiée pour la caserne de pompier. Par conséquent, l'indicateur qui s'y réfère, soit « Bâtiments construits avant 1960 », se colorise en orange. Dans le cas où plusieurs niveaux de sensibilité sont identifiés pour un même service ou plusieurs services avec différents niveaux de sensibilité sont reliés à un même indicateur, l'indicateur prend la couleur du niveau de sensibilité le plus élevé. Donc, dans le cas de la Figure 3.8, les établissements d'éducation présentent des probabilités faibles et élevées de sensibilité, selon la problématique ou le paramètre climatique à évaluer. Dans ce cas, l'indicateur « Enfants de moins de 14 ans », qui y est relié, se colorise en rouge, la couleur représentant la sensibilité la plus importante.

Services urbains								
	Lignes de transport public	Établissement de santé	Caserne de pompiers	Poste de police	Petite enfance		Établissements d'éducation	
					Garderie la Petite Maternelle	CPE du Jardin Fleuri	École Clothilde-Raymond	École Pierre-Bédard
	X	X	X	X	X	X	X	X
	1	2	2	2	2	2	2	2
	1	2	2	2	2	2	2	2
	1	2	2	2	2	2	2	2
	1	2	2	2	2	2	2	2
	1	2	2	2	2	2	2	2
	1	2	2	2	2	2	2	2
	1	2	2	2	2	2	2	2
	1	2	2	2	2	2	2	2

- Indicateurs sociaux -								
	X							
				X	X	X	X	X
		X						
X								

Personnes âgées (plus de 65 ans)
 Saint-Rémi : 17,7%
 Montérégie : 18,0%
 Québec : 18,3%

Enfants (moins de 14 ans)
 Saint-Rémi : 18,2%
 Montérégie : 17,2%
 Québec : 16,3%

Année des bâtiments (<1960)
 Saint-Rémi : 19,1%
 Montérégie : 18,4%
 Québec : 25,3%

Trav. utilisant transp. en comm.
 Saint-Rémi : 1,4%
 Montérégie : 5,7%
 Québec : 7,4%

Figure 3.8 : Exemples de services urbains et d'indicateurs sociaux tels que reliés dans la matrice de sensibilité

L'intégration de ces éléments permet d'opérationnaliser l'interface, la portabilité et l'utilisation de l'outil matriciel afin d'en faciliter le partage, la consultation et l'utilisation par le plus grand nombre d'acteurs d'un territoire.

3.3 Identification des sensibilités du territoire

Afin de s'assurer de la pertinence de l'outil, les constats de l'analyse de sensibilité matricielle ont été comparés avec les résultats des ateliers participatifs tenus par la SCABRIC pour le projet de la Rés-Alliance de 2017 à 2019. Le Tableau 3.7 présente toutes les sensibilités ayant un niveau de probabilité élevé ou moyen relevées par l'outil matriciel.

Tableau 3.7 : Principales sensibilités relevées par l'outil matriciel

Municipalité	Probabilité de sensibilité	Service	Problématique
Toutes	Élevée	Établissements d'éducation	Canicules
		Zones agricoles	Sécheresse
	Moyenne	Ponceaux	Augmentation des débits de crue et embâcle de sédiments
		Puits d'eau potable	Sécheresse
Saint-Constant	Moyenne	Zones commerciales C-204 et -304	Augmentation des débits de crue, érosion riveraine et embâcles de glace et de sédiments
Saint-Isidore Saint-Michel Saint-Rémi	Moyenne	Caserne de pompier	Sécheresse
Sainte-Catherine	Moyenne	Centre de la petite enfance Le Petit Soleil	Augmentation des débits de crue et embâcles de glace et de sédiments
		Zones commerciales et mixtes C-658 et -662 M-558, -560, -660 et -661	Augmentation des débits de crue, érosion riveraine et embâcles de glace et de sédiments
		Zone commerciale C-702	Augmentation des débits de crue et érosion riveraine
		Zone commerciale C-730	Accumulation d'eau au sol en raison de fortes précipitations

L'outil matriciel identifie quatre (4) services sensibles communs à toutes les municipalités, soit les établissements d'éducation, les zones agricoles, les ponceaux et les puits d'eau potable. Le Tableau 3.8 présente les raisons pour lesquelles chacun des services est particulièrement sensible.

Tableau 3.8 : Justification des niveaux de probabilité de sensibilité élevés et moyens dans l'outil matriciel

Service	Problématique	Justification
Établissements d'éducation	Canicules	Les écoles sont vulnérables en situation de chaleur extrême, car la plupart des écoles ne possèdent pas de systèmes de climatisation.
Zones agricoles	Sécheresse	Les sécheresses, telles que celle connue à l'été 2018 accentuent la pression sur les productions des agriculteurs et éleveurs pour qui une telle situation représente d'importantes hausses de coûts et des baisses de rendement.
Ponceaux	Augmentation des débits de crue et embâcle de sédiments	Il n'y a pas beaucoup d'information disponible sur les ponceaux, mais des témoignages d'agriculteurs du bassin versant nous permettent d'affirmer que ceux-ci créent des inondations sur les terrains avoisinants.
Puits d'eau potable	Sécheresse	Les villes de Saint-Isidore, Saint-Michel et Saint-Rémi s'alimentent à partir de puits d'eau potable qui sont vulnérables en cas de sécheresse.

Une des étapes de la démarche d'adaptation proposée par la Rés-Alliance est la planification des actions pour réduire la sensibilité et augmenter la résilience des communautés. À cet effet, le comité consultatif d'adaptation du bassin versant de la Saint-Régis a identifié trois (3) objectifs :

- 1) infiltrer l'eau près d'où elle tombe;
- 2) réduire les effets de l'érosion;
- 3) réutiliser ou recycler l'eau.

Ces trois objectifs visent à réduire les impacts de problématiques d'inondations, d'érosion et de sécheresse. Tel que relevé dans l'outil matriciel, les problématiques de sécheresse et d'inondations sont particulièrement importantes. L'érosion est aussi identifiée comme problématique d'intérêt, mais ayant une sensibilité faible ou, dans certains cas, moyenne, mais dans des zones commerciales spécifiques à Sainte-Catherine et Saint-Constant.

Le Tableau 3.9 présente les sensibilités identifiées par l'outil matriciel et les actions identifiées par la Rés-Alliance qui s'y rapportent. L'ensemble des actions identifiées par la Rés-Alliance sont présentées à l'Annexe IV.

En regard des éléments identifiés dans le Tableau 3.9, toutes les sensibilités identifiées dans l'outil matriciel sont couvertes par les actions de la Rés-Alliance, à l'exception des canicules dans les établissements scolaires. Cette différence peut être expliquée par le fait que les phénomènes de canicules n'entrent pas nécessairement dans la catégorie des phénomènes hydroclimatiques, et donc, n'ont pas fait l'objet d'une analyse spécifique dans le cadre du projet Rés-Alliance. Le projet Rés-Alliance inclut également l'action « intégration systématique du balisage des bandes riveraines aux appels d'offres pour les entretiens de cours d'eau en milieu rural ». Bien que l'outil matriciel n'identifie pas l'érosion riveraine en zone agricole comme étant une probabilité de sensibilité élevée ou moyenne, une sensibilité faible y est relevée pour ces zones. Le niveau de connaissance de ces territoires étant peu élevé dans le cadre de l'analyse réalisée avec l'outil matriciel (niveau 2), il est attendu qu'une meilleure connaissance du territoire permette de déterminer que la probabilité de sensibilité de certaines zones agricoles est moyenne ou élevée.

Tableau 3.9 : Adéquation des constats de l'outil d'analyse et des actions identifiées par la Rés-Alliance

Problématique	Service	Action(s) identifiée(s) par la Rés-Alliance
Canicules	Établissements d'éducation	-
Sécheresse	Zones agricoles	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Accompagnement de 15 producteurs agricoles riverains de Saint-Constant et Saint-Isidore pour intégrer de nouvelles pratiques agroenvironnementales. ❖ S'arrimer avec le projet RADEAU pour mieux comprendre l'utilisation en eau souterraine du milieu agricole du bassin versant de la Saint-Régis.
	Puits d'eau potable Casernes de pompier (Saint-Isidore, Saint-Michel et Saint-Rémi)	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Sensibilisation des urbanistes et responsables des travaux publics aux guides de bonne pratique et outils de récupération de l'eau de pluie. ❖ Mise en place d'un service de distribution et d'installation de barils de récupération de l'eau de pluie dans toutes les municipalités. ❖ Formation dans les écoles sur les techniques simples et concrètes pour réduire le gaspillage d'eau. ❖ Installation de jardins de pluie dans les municipalités des MRC de Roussillon et des Jardins-de-Napierville.
Augmentation des débits de crue et embâcles	Ponceaux (Sainte-Catherine) CPE Le Petit Soleil	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Modélisation de solutions au problème d'inondation par refoulement dans le village de Saint-Isidore. ❖ Analyse coût-avantage de solutions modélisées.
Augmentation des débits de crue, érosion riveraine et embâcles	(Saint-Constant) Zones commerciales C-204 et -304 (Sainte-Catherine) Zones commerciales et mixtes C-658, -662 et -702 M-558, -560, -660 et -661	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Identification des secteurs d'intervention prioritaires pour la stabilisation de la MRC de Roussillon. ❖ Tracés historiques des rivières Saint-Régis et Saint-Pierre à partir d'images aériennes de 1930 à 2018. ❖ Stabilisation des berges de la rivière Saint-Régis à Sainte-Catherine. ❖ Création d'un fonds kilométrage-carboneutre pour financer les projets de plantation de brise-vent ou bandes riveraines.
Accumulation d'eau au sol en raison de fortes précipitations	(Sainte-Catherine) Zone commerciale C-730	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Application du règlement 109 de la MRC de Roussillon et de l'article 21 du règlement ADM-142-06 de la MRC des Jardins-de-Napierville, qui limitent les apports en eau de ruissellement des grandes constructions. ❖ Sensibilisation des petits constructeurs et citoyens qui entreprennent des rénovations afin qu'ils intègrent les pratiques limitant le ruissellement. ❖ Mise en place d'incitatifs pour les petits constructeurs, propriétaires et des citoyens en général pour intégrer les pratiques limitant le ruissellement lors de rénovations. ❖ Sensibilisation des élus à l'implantation de pavés poreux lors de rénovations constructions.

CHAPITRE 4

DISCUSSION

La structuration de l'information joue un rôle fondamental dans les processus de décision et de pérennisation du suivi de la performance des actions mise en œuvre. Dans un contexte d'adaptation, l'information joue ainsi un rôle primordial sur les processus d'identification des actions propices visant à minimiser la sensibilité des communautés face aux aléas climatiques et ainsi faciliter leur adaptation.

Dans ce contexte, l'outil matriciel développé dans le cadre du projet d'évaluation des sensibilités territoriales aux changements climatiques a permis d'exprimer la sensibilité du territoire des différentes municipalités du bassin versant de la St-Régis. La démarche proposée favorise la participation des différents acteurs du territoire impliqués dans la démarche d'analyse et d'identification des mesures d'adaptation. L'outil matriciel vient par ailleurs en complément à l'expression des connaissances des sensibilités du territoire exprimables sous une forme cartographique à l'aide de systèmes d'information géographique (SIG) ou encore des outils générés par les organisations productrices d'information tels que les atlas hydroclimatiques. De par sa structure, l'outil est versatile est vise à s'adapter sur les plans spatial et temporel. Sur le plan spatial, la démarche préconisée dans le cas de l'étude du bassin versant de la St-Régis a été de découper le territoire et de traiter chacune des six municipalités concernées. Ce traitement différencié entre entités administratives permet d'envisager le déploiement de l'outil sur tout territoire intéressé à la démarche. Ceci étant, un des points de réflexion réside dans le choix de l'unité territoriale et la pertinence d'envisager une unité autre que la municipalité. Sur le plan temporel, l'opérationnalisation de la démarche réside dans la capacité à pérenniser l'information par le suivi des mesures d'adaptation et d'analyse de leur effet sur les différentes composantes révélées par la structure matricielle de l'outil.

Dans une perspective de déploiement de la démarche proposée, il apparaît conséquent que la compréhension des interactions entre le climat et les éléments spécifiques du territoire à l'étude requiert la participation des différents acteurs du territoire, afin de s'assurer que :

1. l'acquisition de l'information est réalisée, entre autres, par des individus ayant une connaissance du terrain, ce qui permet une analyse fine des enjeux reliés au territoire;
2. une démarche cohérente soit mise en place afin de faciliter le transfert d'information entre les différents acteurs du territoire;
3. les méthodes de partage d'information soient complémentaires aux guides et autres outils informatifs générés par les structures productrices de cette information.

Dans cette perspective, les ateliers et les comités consultatifs du projet de Rés-Alliance du bassin versant de la Saint-Régis ont d'ailleurs permis de prendre conscience de la difficulté pour les acteurs du territoire de réaliser un diagnostic des sensibilités du territoire qui appréhende les enjeux associés à une occupation multisectorielle. Afin de s'assurer de l'efficacité du processus de transfert de l'information hydroclimatique, deux aspects doivent être considérés : la quantité et la qualité des données.

En ce qui concerne la quantité des données, l'outil matriciel permet de prendre en compte ces besoins d'information et d'identifier spécifiquement les secteurs pour lesquels l'information est manquante ou inadéquate. En effet, une grande quantité de données hydroclimatiques sont générées par les structures productrices d'information et diffusées sous la forme d'outils (atlas hydroclimatique de la DEHA, guide sur les scénarios climatiques d'Ouranos, DSCC, etc.), mais celles-ci ne sont pas réparties de manière égale sur l'ensemble du territoire et dans les différents domaines d'activité (agricoles, forestiers, centres urbains, etc.). À cet égard, le format général de l'outil, qui comprend plusieurs secteurs d'activités sociales et économiques à analyser, amène naturellement l'utilisateur à considérer l'ensemble des domaines d'activités du territoire à l'étude, permettant ainsi d'identifier les secteurs pour lesquels l'information est insuffisante ou manquante. De plus, la structure de présentation de l'information permet aux utilisateurs de formaliser leurs besoins spécifiques et potentiellement collaborer avec des partenaires gouvernementaux ou universitaires. Ces dernières peuvent, à leur tour, s'assurer

que les données soient traitées de manière à répondre adéquatement aux besoins des acteurs du territoire.

Quant à la qualité de l'information, l'outil matriciel facilite le transfert de l'information entre les différents types d'acteurs actifs sur le territoire. En effet, la qualité de l'information varie en fonction des utilisateurs des données climatiques, car ceux-ci ne possèdent pas les mêmes niveaux de connaissance et ont souvent des objectifs et des capacités bien différentes d'un individu ou d'une organisation à une autre. Ainsi, en caractérisant (code de 1 à 4) le niveau de connaissance du territoire des utilisateurs de la matrice, l'outil leur permet de naviguer d'un territoire à un autre, même si les impacts des changements climatiques varient d'une région à une autre, de même que varient l'implication, les connaissances et la capacité d'adaptation des gestionnaires du territoire.

La production d'information adaptée, en termes de quantité et de qualité, joue dès lors un rôle primordial dans l'élaboration de plans d'adaptation qui tiennent compte des spécificités locales ou régionales. Dans ce contexte, l'élaboration d'une démarche évolutive d'évaluation des sensibilités du territoire aux changements climatiques pouvant être utilisée par tous les acteurs du territoire s'est avérée pertinente pour répondre aux objectifs suivants :

- ❖ partager l'expertise des acteurs de tous les secteurs et à tous les niveaux de gouvernance de manière à permettre d'exploiter les données climatiques à leur plein potentiel;
- ❖ accroître la compréhension des impacts potentiels des changements climatiques sur le territoire et, par conséquent, mieux évaluer les besoins;
- ❖ assurer la cohérence entre les objectifs d'adaptation de chacun des acteurs.

En réalisant une analyse de sensibilité indépendante pour chacune des six (6) municipalités du bassin versant, un diagnostic global du bassin versant est obtenu tout en permettant à chacune des municipalités de développer des mesures d'adaptation spécifiques à leur territoire répondant aux préoccupations particulières de leurs citoyens. Cet exercice a permis de vérifier que l'utilisation du logiciel permettait d'obtenir des résultats comparables au travail réalisé dans le cadre des ateliers participatifs de la SCABRIC.

La démarche proposée s'inscrit dans une perspective d'amélioration continue des processus d'évaluation des sensibilités du territoire, d'identification des mesures potentielles d'adaptation et de suivi de leur mise en œuvre afin d'évaluer leur réponse aux sensibilités initiales. À cet égard, les recommandations suivantes visent à pérenniser l'information territoriale :

- ❖ utiliser la démarche d'analyse de la sensibilité pour faire le suivi de l'adaptation du territoire et ajouter à la matrice les éléments qui s'avèreraient manquants (aléas climatiques, services, ouvrages urbains, etc.);
- ❖ documenter les retours d'expérience et diffuser les résultats auprès des communautés de pratique;
- ❖ identifier les besoins spécifiques en nouvelles données hydroclimatiques et les enjeux associés;
- ❖ mobiliser les acteurs du territoire de même que les centres d'expertise (Ouranos, DEHA, etc.).

Dès lors, cette approche itérative, supportée par la démarche mise en place par l'outil matriciel, répond particulièrement bien aux caractéristiques d'un processus d'identification des meilleures mesures d'adaptation aux changements climatiques. En effet, tout comme les aléas climatiques, la sensibilité et les conditions socio-économiques ainsi que la capacité d'adaptation doivent être considérées comme des variables dynamiques qui changent avec le temps. Finalement, dans une perspective de participation citoyenne, la démarche mise en œuvre s'inscrit dans le renforcement des capacités des responsables du territoire à communiquer de façon structurée sur les processus de décision en regard des enjeux d'adaptation face aux changements climatiques.

CONCLUSION

Dans un contexte d'adaptation aux changements climatiques, une partie du défi repose sur l'identification des données jugées pertinentes et la façon dont elles sont organisées et présentées afin d'en extraire une information propice à supporter les acteurs d'un territoire dans leur processus d'aide à la prise de décision. À cet effet, le présent projet de recherche a conduit à développer une approche permettant de renforcer la capacité de diagnostic des éléments sensibles d'un territoire et, dès lors, de faciliter l'identification de mesures d'adaptation.

Le résultat de l'approche développée a pris la forme d'un outil matriciel permettant d'identifier, d'une part, les interactions entre une cause potentielle associée à un aléa hydroclimatique et une composante du territoire à l'étude et, d'autre part, la sensibilité de la communauté en regard des différentes composantes affectées par l'aléa.

Dans le cadre du projet, la matrice de sensibilité a été développée pour répondre aux besoins du projet de Rés-Alliance du bassin versant de la Saint-Régis. Afin de faire ressortir les sensibilités spécifiques au bassin versant de la Saint-Régis et d'identifier des actions d'adaptation qui peuvent être entreprises au niveau local, l'échelle des six municipalités a été retenue. Une analyse de la sensibilité en regard de chacune des causes potentielles associées à un aléa hydroclimatique basée sur l'analyse de l'information disponible a été réalisée pour chacune des composantes.

Dans le cadre du développement, la présentation concise et épurée et l'intégration de fichiers PDF ont visé à opérationnaliser l'outil et faciliter l'échange des informations entre acteurs concernés par l'analyse des sensibilités du territoire à l'étude.

Afin de s'assurer de la pertinence de l'outil, les constats de l'analyse de sensibilité matricielle ont été comparés avec les résultats des ateliers participatifs tenus par la SCABRIC pour le

projet de la Rés-Alliance de 2017 à 2019. L'outil matriciel identifie quatre services sensibles communs à toutes les municipalités, soit les établissements d'éducation, les zones agricoles, les ponceaux et les puits d'eau potable. Toutes les sensibilités identifiées dans l'outil matriciel sont couvertes par les actions de la Rés-Alliance, à l'exception des canicules dans les établissements scolaires. Cette différence peut être expliquée par le fait que les phénomènes de canicules n'entrent pas nécessairement dans la catégorie des phénomènes hydroclimatiques, et donc, n'ont pas fait l'objet d'une analyse spécifique dans le cadre du projet Rés-Alliance. Le projet Rés-Alliance inclut également l'action « intégration systématique du balisage des bandes riveraines aux appels d'offres pour les entretiens de cours d'eau en milieu rural ». Bien que l'outil matriciel n'identifie pas l'érosion riveraine en zone agricole comme étant une probabilité de sensibilité élevée ou moyenne, une sensibilité faible y est relevée pour ces zones. Le niveau de connaissance de ces territoires étant peu élevé dans le cadre de l'analyse réalisée avec l'outil matriciel, il est attendu qu'une meilleure connaissance du territoire permette de déterminer que la probabilité de sensibilité de certaines zones agricoles est moyenne ou élevée. Cet exemple souligne l'importance de s'assurer qu'un outil d'analyse de la sensibilité puisse être utilisé par une vaste gamme d'acteurs, pour permettre de dresser un portrait de la sensibilité basé sur une connaissance accrue du territoire.

La comparaison des résultats de l'outil matriciel et des ateliers participatifs réalisés avec les acteurs du territoire permet de constater que les sensibilités identifiées par les deux méthodes sont similaires. Toutefois, l'outil matriciel cible des services ou des zones d'intervention précises, ce qui est particulièrement utile dans un contexte où les ressources pour mettre en place les mesures d'adaptation sont limitées. Un autre avantage de l'outil matriciel est sa capacité à colliger toute l'information dans un seul fichier, qui peut être consulté et modifié dans le temps. Évidemment, l'utilisation de l'outil ne remplace pas le savoir des acteurs du territoire, mais permet plutôt à ces derniers de partager tout leur savoir dans un cadre adapté au partage de l'information. En augmentant le nombre d'études de cas, la reproductibilité des résultats pourra être vérifiée et/ou améliorée et l'utilisation de la matrice par les acteurs du territoire permettra d'en assurer la pérennité dans le contexte évolutif de l'adaptation aux changements climatiques.

ANNEXE I

ACTIVITÉS RÉALISÉES AVEC LA SCABRIC

Sous la direction de Geneviève Audet de la SCABRIC, un premier cadre d'adaptation aux changements hydroclimatiques a été développé pour le bassin versant de la rivière Saint-Régis, en partenariat avec la Société de conservation et d'aménagement de la rivière Châteauguay (SCABRIC). Une démarche consultative a été entreprise en 2017 afin de dresser le portrait du système à l'étude dans un contexte de changements hydroclimatique. Au cours des rencontres, les participants, tant des experts d'un domaine particulier que des résidents du territoire avec un savoir local, étaient invités à partager leurs savoirs afin de faire ressortir toutes les informations disponibles permettant l'identification des sensibilités et des priorités d'action sur le territoire.

Le comité consultatif était composé de représentants des organismes, services ou entreprises suivants :

- Société de conservation et d'aménagement de la rivière Châteauguay (SCABRIC)
- École de technologie supérieure (ÉTS)
- Service du génie de la Ville de Sainte-Catherine
- Municipalité régionale de comté (MRC) des Jardins-de-Napierville
- Municipalité régionale de comté de Roussillon
- PleineTerre, entreprise de conseil en agriculture, génie agroenvironnemental et rural, biologie, pédologie et gestion de l'eau et du territoire
- Municipalité de Saint-Isidore
- Conseil régional de l'environnement (CRE) de la Montérégie
- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ)
- Service de l'aménagement du territoire et développement économique de la Ville de Sainte-Catherine
- Comité de zones d'intervention prioritaire (ZIP) - Haut-Saint-Laurent
- Union des producteurs agricoles (UPA) - Montérégie

ANNEXE II

INFORMATIONS ISSUES DE L'ANALYSE DES VULNÉRABILITÉS DES
OUVRAGES URBAINS DES MUNICIPALITÉ

Municipalité de Delson	
Service	Information
Caserne de pompier	<p>Équipe Delson : La caserne est située aux abords de la Rivière de la Tortue. Dans le cas d'une crue extrême ou d'embâcles, le niveau de la Rivière de la Tortue pourrait être rehaussé et atteindre la caserne. En cas de sécheresse, comme la Ville de Delson s'alimente à partir de Candiac, qui elle s'alimente directement dans le Fleuve Saint-Laurent, il est raisonnable de penser que l'apport en eau du service d'incendie ne serait pas vulnérable, même en cas de sécheresse.</p> <p>Équipe Candiac : La caserne ne semble pas vulnérable en cas d'inondations ou de sécheresse. Comme la Ville de Candiac s'alimente directement dans le Fleuve Saint-Laurent, il est raisonnable de penser que l'apport en eau du service d'incendie ne serait pas vulnérable en cas de sécheresse.</p> <p>Source: Site Internet de l'usine de filtration de la Ville de Candiac et observations Google Map et Google Earth Pro</p>
Centre de la Petite Enfance	<p>Le Centre de la Petite Enfance Les Chérubins Inc. ne semble pas être vulnérable aux inondations ou sécheresses.</p> <p>Source: Observations Google Map et Google Earth Pro</p>
Établissements d'éducation	<p>École des Cheminots : L'École des Cheminots n'est pas située sur une surface propice à l'absorption de l'eau dans le cas d'une pluie importante. Il est conservateur de considérer qu'il pourrait y avoir accumulation d'eau.</p> <p>École John Adam : L'École John Adam ne semble pas être vulnérable aux inondations ou sécheresses.</p> <p>École Louis-Lafortune : L'École Louis-Lafortune n'est pas située sur une surface propice à l'absorption de l'eau dans le cas d'une pluie importante. Il est conservateur de considérer qu'il pourrait y avoir accumulation d'eau.</p> <p>Les écoles sont vulnérables en situation de chaleur extrême, car la plupart des écoles ne possèdent pas de systèmes de climatisation et, par conséquent, leurs occupants sont vulnérables en situation de canicules.</p> <p>Source: Observations Google Map et Google Earth Pro et connaissances générales à partir d'articles de journaux rédigés lors des dernières canicules (Mercurie et Morasse, 2017)</p>

Municipalité de Delson	
Service	Information
Lignes de transport public	<p>CIT Roussillon – Lignes 30, 35, 37, 115, T36 : Il existe des lignes de transport public (autobus et taxibus). Il est raisonnable de penser qu'en cas de pluie très importante, il pourrait y avoir une accumulation d'eau sur les lignes de transport public, ce qui pourrait interrompre le service ou forcer des détours.</p> <p>Source: <i>Observations Google Map et Google Earth Pro</i></p>
Poste de police	<p>Le poste de police attribué à la Ville de Delson est la régie intermunicipale de la Police de Roussillon, qui ne semble pas être vulnérable aux inondations ou sécheresses.</p> <p>Source: <i>Observations Google Map et Google Earth Pro</i></p>
Station de pompage	<p>Comme l'eau est pompée directement du Fleuve St-Laurent à la hauteur de Candiac, il ne devrait pas y avoir d'impact dans le cas d'une inondation ou d'une sécheresse.</p> <p>Source: <i>Site Internet de l'usine de filtration de la Ville de Candiac et observations Google Map et Google Earth Pro</i></p>
Stations d'essence	<p>Le Couche-Tard et la Super Gaz Station ne semblent pas être vulnérables aux inondations ou sécheresses.</p> <p>Source: <i>Observations Google Map et Google Earth Pro</i></p>
Train de banlieue	<p>Ligne Montréal-Candiac : Les voies ferrées ne sont pas particulièrement vulnérables en cas de pluie très importante. Toutefois, la voie ferrée passe au-dessus de la Rivière de la Tortue. En cas d'augmentation des débits de crue ou d'embâcles dans la rivière, l'intégrité du pont pourrait être compromise, ce qui pourrait interrompre le service.</p> <p>Source: <i>Observations Google Map et Google Earth Pro</i></p>
Usine de traitement des eaux	<p>L'usine de traitement des eaux qui dessert la Ville de Delson est l'usine de filtration de Candiac. Située aux abords du Fleuve Saint-Laurent, l'usine pourrait être vulnérable en cas de fortes crues ou d'érosion riveraine.</p> <p>Source: <i>Site Internet de l'usine de filtration de la Ville de Candiac et observations Google Map et Google Earth Pro</i></p>

Municipalité de Saint-Constant	
Service	Information
Caserne de pompiers	<p>La caserne ne semble pas vulnérable aux inondations ou sécheresse. De plus, comme la Ville de Saint-Constant s'alimente en eau à partir de Candiac, qui s'alimente directement dans le Fleuve Saint-Laurent, il est raisonnable de penser que l'apport en eau du service d'incendie n'est pas vulnérable, même en cas de sécheresse.</p> <p>Source: <i>Site Internet de l'usine de filtration de la Ville de Candiac et observations Google Map et Google Earth Pro</i></p>
Centres de la Petite Enfance	<p>CPE Les Petites Souris : Le Centre de la Petite Enfance Les Petites Souris ne semble pas être vulnérable aux inondations ou sécheresses.</p> <p>Garderie éducative Lumière de ma vie : La Garderie éducative Lumière de ma vie n'est pas située sur une surface propice à l'absorption de l'eau dans le cas d'une pluie importante. Il est conservateur de considérer qu'il pourrait y avoir accumulation d'eau.</p> <p>Source: <i>Observations Google Map et Google Earth Pro</i></p>
CHSLD	<p>CHSLD Jean-Louis Lapierre : Le CHSLD ne semble pas être vulnérable aux inondations ou sécheresse.</p> <p>Source: <i>Observations Google Map et Google Earth Pro</i></p>
Établissements d'éducation	<p>Les écoles de l'Aquarelle, du Tournant, Félix-Leclerc, Jacques-Leber, Piché-Dufrost et Vinet-Souigny ne semblent pas être vulnérables aux inondations ou sécheresses.</p> <p>Les écoles sont vulnérables en situation de chaleur extrême, car la plupart des écoles ne possèdent pas de systèmes de climatisation et, par conséquent, leurs occupants sont vulnérables en situation de canicules.</p> <p>Source: <i>Observations Google Map et Google Earth Pro et connaissances générales à partir d'articles de journaux rédigés lors des dernières canicules (Mercure et Morasse, 2017)</i></p>
Lignes de transport public	<p>CIT Roussillon – Lignes 30, 33-35, 38, 40, T30 : Il existe des lignes de transport public (autobus et taxibus). Il est raisonnable de penser qu'en cas de pluie très importante, il pourrait y avoir une accumulation d'eau sur les lignes de transport public, ce qui pourrait interrompre le service ou forcer des détours.</p> <p>Source: <i>Observations Google Map et Google Earth Pro</i></p>
Poste de police	<p>Le poste de police attribué à la Ville de Saint-Constant est la régie intermunicipale de la Police de Roussillon, qui ne semble pas être vulnérable aux inondations ou sécheresses.</p> <p>Source: <i>Observations Google Map et Google Earth Pro</i></p>
Station de pompage	<p>Comme l'eau est pompée directement du Fleuve St-Laurent à la hauteur de Candiac, il ne devrait pas y avoir d'impact dans le cas d'une inondation ou d'une sécheresse.</p> <p>Source: <i>Site Internet de l'usine de filtration de la Ville de Candiac et observations Google Map et Google Earth Pro</i></p>

Municipalité de Saint-Constant	
Service	Information
Stations d'essence	<p>Couche-Tard : Le Couche-Tard n'est pas situé sur une surface propice à l'absorption de l'eau dans le cas d'une pluie importante. Il est conservateur de considérer qu'il pourrait y avoir accumulation d'eau.</p> <p>Esso : Le Esso ne semble pas vulnérable aux inondations ou sécheresses.</p> <p>Ultramar : Le Ultramar n'est pas situé sur une surface propice à l'absorption de l'eau dans le cas d'une pluie importante. Il est conservateur de considérer qu'il pourrait y avoir accumulation d'eau.</p> <p>Source: <i>Observations Google Map et Google Earth Pro</i></p>
Train de banlieue	<p>Ligne Montréal-Candiac : Les voies ferrées ne sont pas particulièrement vulnérables en cas de pluie très importante. Toutefois, la voie ferrée passe au-dessus de la Rivière de la Tortue. En cas d'augmentation des débits de crue ou d'embâcles dans la rivière, l'intégrité du pont pourrait être compromise, ce qui pourrait interrompre le service.</p> <p>Source: <i>Observations Google Map et Google Earth Pro</i></p>
Usine de traitement des eaux	<p>L'usine de traitement des eaux qui dessert la Ville de Saint-Constant est l'usine de filtration de Candiac. Située aux abords du Fleuve Saint-Laurent, l'usine pourrait être vulnérable en cas de fortes crues ou d'érosion riveraine.</p> <p>Source: <i>Site Internet de l'usine de filtration de la Ville de Candiac et observations Google Map et Google Earth Pro</i></p>

Municipalité de Saint-Isidore

Service	Information
Caserne de pompiers	<p>La caserne ne semble pas vulnérable aux inondations ou sécheresse. Toutefois, en considérant que la Ville de Saint-Isidore s'alimente en eau par des puits, il est raisonnable de penser que l'apport en eau du service d'incendie provient également de puits. Par conséquent, en cas de sécheresse, la hauteur des puits devrait baisser et réduire la capacité d'alimentation en eau du service des incendies.</p> <p>Source: <i>Communications avec la municipalité de Saint-Isidore pour valider que la ville s'alimente en eau par des puits et observations Google Map et Google Earth Pro</i></p>
Établissements d'éducation	<p>École Langevin : L'école Langevin n'est pas située sur une surface propice à l'absorption de l'eau dans le cas d'une pluie importante. Il est conservateur de considérer qu'il pourrait y avoir une accumulation d'eau.</p> <p>École Saint-Isidore : L'école Saint-Isidore ne semble pas être vulnérable aux inondations ou sécheresses.</p> <p>Les écoles sont vulnérables en situation de chaleur extrême, car la plupart des écoles ne possèdent pas de systèmes de climatisation et, par conséquent, leurs occupants sont vulnérables en situation de canicules.</p> <p>Source: <i>Observations Google Map et Google Earth Pro et connaissances générales à partir d'articles de journaux rédigés lors des dernières canicules (Mercurie et Morasse, 2017)</i></p>
Fosses septiques et bassins	<p>La réceptionniste de la Ville de Saint-Isidore nous a informé que l'eau de la ville provient de puits d'eau potable. Il n'y a pas d'usine de traitement des eaux reliée à la Ville de Saint-Isidore. L'eau se draine dans des fosses septiques et bassins.</p> <p>Source: <i>Communications avec la municipalité de Saint-Isidore</i></p>
Poste de police	<p>Le poste de police attitré à la Ville de Saint-Isidore est le poste de police de Châteauguay, qui n'est pas situé sur une surface propice à l'absorption de l'eau dans le cas d'une pluie importante. Il est conservateur de considérer qu'il pourrait y avoir accumulation d'eau.</p> <p>Source: <i>Observations Google Map et Google Earth Pro</i></p>
Puits d'eau potable	<p>Les puits d'eau potable sont potentiellement vulnérables aux sécheresses.</p> <p>Source: <i>Témoignages d'occupants du territoire</i></p>

Municipalité de Saint-Michel	
Service	Information
Caserne de pompiers	<p>La caserne ne semble pas vulnérable aux inondations ou sécheresses. Toutefois, en considérant que la Ville de Saint-Michel s'alimente en eau par des puits, il est raisonnable de penser que la source d'alimentation pour le service incendie provient également de puits. Par conséquent, en cas de sécheresse, la hauteur des puits devrait baisser et réduire la capacité d'alimentation en eau du service des incendies.</p> <p>Source: <i>Communications avec la municipalité de Saint-Michel pour valider que la ville s'alimente en eau par des puits et observations Google Map et Google Earth Pro</i></p>
Centre de la Petite Enfance	<p>Le Centre de la Petite Enfance du Jardin Fleuri ne semble pas être vulnérables aux inondations ou sécheresses.</p> <p>Source: <i>Observations Google Map et Google Earth Pro</i></p>
Énergie éolienne	<p>Il y a plusieurs éoliennes sur le territoire de la Ville de Saint-Michel, mais elles ne semblent pas être vulnérables aux inondations ou sécheresses.</p> <p>Source: <i>Observations Google Map et Google Earth Pro</i></p>
Établissements d'éducation	<p>L'École Saint-Michel Archange ne semble pas être vulnérables aux inondations ou sécheresses. Toutefois, la plupart des écoles ne possèdent pas de systèmes de climatisation et leurs occupants sont vulnérables en situation de canicules.</p> <p>Source: <i>Observations Google Map et Google Earth Pro et connaissances générales à partir d'articles de journaux rédigés lors des dernières canicules (Mercure et Morasse, 2017)</i></p>
Fosses septiques et bassins	<p>La réceptionniste de la Ville de Saint-Michel nous a informé que l'eau de la ville provient de puits d'eau potable. Il n'y a pas d'usine de traitement des eaux reliée à la Ville de Saint-Michel. L'eau se draine dans des fosses septiques et bassins.</p> <p>Source: <i>Communications avec la municipalité de Saint-Michel</i></p>
Poste de police	<p>Le poste de police attitré à la Ville de Saint-Michel est le commissariat de police de la Sureté du Québec, à Napierville, qui ne semble pas être vulnérable aux inondations ou sécheresses.</p> <p>Source: <i>Observations Google Map et Google Earth Pro</i></p>
Puits d'eau potable	<p>Les puits d'eau potable sont potentiellement vulnérables aux sécheresses.</p> <p>Source: <i>Témoignages d'occupants du territoire</i></p>

Municipalité de Saint-Michel	
Inondation	Augmentation des débits de crue
	Embâcle de glace
	Accumulation d'eau au sol en raison de fortes précipitations
	Érosion riveraine
	Embâcle de sédiments
Hausse de température	Sécheresse
	Canicules

Facteurs physiques			
	Nature des sols		
	Type de surface / Couverture des sols		
	Hauteur de la nappe phréatique / Saturation des sols		
	Topographie / Pente de l'écoulement		

Ouvrages urbains									
	Réseaux routiers		Ponceaux		Réseaux de drainage		Lignes de transport d'électricité		Gazoducs/Oléoducs
1	1	1	1	1	1	1	1	1	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	

Services urbains																			
	Établissement de santé		Caserne de pompiers		Poste de police		Centre de la petite enfance		Établissement d'éducation		Usines de traitement des eaux		Puits d'eau potable		Tours de télécommunication		Poste électrique		Énergie éolienne
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	

X																			
X																			
				X	X														
													X						
				X	X														
				X	X														
	X																		
	X																		
													X						

- Indicateurs sociaux -
Personnes âgées (plus de 65 ans) Saint-Michel : 12,6% Montérégie : 18,0% Québec : 18,3%
Personnes âgées (plus de 85 ans) Saint-Michel : 0,8% Montérégie : 2,0% Québec : 2,3%
Enfants (moins de 14 ans) Saint-Michel : 19,8% Montérégie : 17,2% Québec : 16,3%
Personnes vivant seules Saint-Michel : 22,0% Montérégie : 29,1% Québec : 33,3%
Ménages nombreux (> 5 pers.) Saint-Michel : 11,0% Montérégie : 6,6% Québec : 6,0%
Familles monoparentales Saint-Michel : 11,0% Montérégie : 11,1% Québec : 10,7%
Année des bâtiments (<1960) Saint-Michel : 14,8% Montérégie : 18,4% Québec : 25,3%
Réparations majeures requises Saint-Michel : 4,7% logements Montérégie : 5,7% logements Québec : 6,4% logements
Populat. ne parlant pas français Saint-Michel : 0,8% Montérégie : 3,8% Québec : 5,5%

Services économiques																															
	Zones A1, A3 à A5, A7 et A8		Résidentiel et agricole		Zones A2 et A9 à A12		Résidentiel et agricole		Zone A6		Résidentiel, agricole et commerce		Zone Rid-1 à Rid-10		Résidentiel et agricole		Zone C-1		Commerce		Zone C-3		Commerce		Zone Ci-1		Commerce		Zones CR-1, CR-3 à CR-9		Commerce
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	

X	X	X	X																													
											X	X	X	X																		

- Indicateurs économiques -
Emplois en agriculture ou forest. Saint-Michel : 14,0% des emplois Montérégie : 2,3% des emplois Québec : 2,0% des emplois
Emplois en commerce de détail Saint-Michel : 9,8% des emplois Montérégie : 12,3% des emplois Québec : 11,9% des emplois

Municipalité de Saint-Rémi	
Service	Information
Caserne de pompiers	<p>La caserne de semble pas vulnérable aux inondations ou sécheresses. Toutefois, en considérant que la Ville de Saint-Rémi s'alimente en eau par des puits, il est raisonnable de penser que l'apport en eau du service d'incendie provient également de puits. Par conséquent, en cas de sécheresse, la hauteur des puits devrait baisser et réduire la capacité d'alimentation en eau du service des incendies.</p> <p>Source: <i>Communications avec la municipalité de Saint-Rémi pour valider que la ville s'alimente en eau par des puits et observations Google Map et Google Earth Pro</i></p>
Centre de la Petite Enfance	<p>CPE du Jardin Fleuri : Le Centre de la Petite Enfance du Jardin Fleuri ne semble pas être vulnérable aux inondations ou sécheresse.</p> <p>Garderie de la Petite Maternelle : La Garderie de la Petite Maternelle n'est pas située sur une surface propice à l'absorption de l'eau dans le cas d'une pluie importante. Il est conservateur de considérer qu'il pourrait y avoir accumulation d'eau.</p> <p>Source: <i>Observations Google Map et Google Earth Pro</i></p>
Établissements d'éducation	<p>École Clotilde-Raymond : L'école Clotilde-Raymond n'est pas située sur une surface propice à l'absorption de l'eau dans le cas d'une pluie importante. Il est conservateur de considérer qu'il pourrait y avoir accumulation d'eau.</p> <p>École Pierre-Bédard : L'école Pierre-Bédard n'est pas située sur une surface propice à l'absorption de l'eau dans le cas d'une pluie importante. Il est conservateur de considérer qu'il pourrait y avoir accumulation d'eau.</p> <p>École Saint-Viateur : L'école Saint-Viateur ne semble pas être vulnérable aux inondations ou sécheresses.</p> <p>Les écoles sont vulnérables en situation de chaleur extrême, car la plupart des écoles ne possèdent pas de systèmes de climatisation et, par conséquent, leurs occupants sont vulnérables en situation de canicules.</p> <p>Source: <i>Observations Google Map et Google Earth Pro et connaissances générales à partir d'articles de journaux rédigés lors des dernières canicules (Mercure et Morasse, 2017)</i></p>
Fosses septiques et bassins	<p>La réceptionniste de la Ville de Saint-Rémi nous a informé que l'eau de la ville provient de puits d'eau potable. Il n'y a pas d'usine de traitement des eaux reliée à la Ville de Saint-Rémi. L'eau se draine dans des fosses septiques et bassins.</p> <p>Source: <i>Communications avec la municipalité de Saint-Rémi</i></p>
Lignes de transport public	<p>Transport Collectif Jardins-de-Napierville : Il existe des lignes de transport public (taxibus). Il est raisonnable de penser qu'en cas de pluie très importante, il pourrait y avoir une accumulation d'eau sur les lignes de transport public, ce qui pourrait interrompre le service ou forcer des détours.</p> <p>Source: <i>Observations Google Map et Google Earth Pro</i></p>

Municipalité de Saint-Rémi	
Service	Information
Poste de police	<p>Le poste de police attribué à la Ville de Saint-Rémi est le commissariat de police de la Sûreté du Québec, à Napierville, qui ne semble pas être vulnérable aux inondations ou sécheresses.</p> <p>Source: <i>Observations Google Map et Google Earth Pro</i></p>
Puits d'eau potable	<p>Les puits d'eau potable sont potentiellement vulnérables aux sécheresses.</p> <p>Source: <i>Témoignages d'occupants du territoire</i></p>
Stations d'essence	<p>Le JG Poupart, le Sonic et le Pétro-Canada ne sont pas situés sur une surface propice à l'absorption de l'eau dans le cas d'une pluie importante. Il est conservateur de considérer qu'il pourrait y avoir accumulation d'eau.</p> <p>Source: <i>Observations Google Map et Google Earth Pro</i></p>

Municipalité de Sainte-Catherine	
Service	Information
Caserne de pompier	<p>La caserne ne semble pas vulnérable aux inondations ou sécheresse. De plus, comme la Ville de Sainte-Catherine s'alimente en eau à partir de Candiac, qui s'alimente directement dans le Fleuve Saint-Laurent, il est raisonnable de penser que l'apport en eau du service d'incendie ne serait pas vulnérable, même en cas de sécheresse.</p> <p>Source: <i>Site Internet de l'usine de filtration de la Ville de Candiac et observations Google Map et Google Earth Pro</i></p>
Centres de la Petite Enfance	<p>CPE La Boîte à Bizous : Le Centre de la Petite Enfance La Boîte à bizous ne semble pas être vulnérable aux inondations ou sécheresses.</p> <p>CPE Soleil Souriant : Le Centre de la Petite Enfance Soleil Souriant n'est pas situé sur une surface propice à l'absorption de l'eau dans le cas d'une pluie importante. Il est conservateur de considérer qu'il pourrait y avoir accumulation d'eau.</p> <p>Garderie Les Bouts de Papier : La Garderie Les Bouts de Papier ne semble pas être vulnérable aux inondations ou sécheresses.</p> <p>Garderie Privée Internationale : La Garderie privée Internationale est située aux abords de la Voie Maritime. Dans le cas d'une crue extrême ou d'un embâcle de glace, le niveau de la Voie Maritime pourrait être rehaussé et atteindre la garderie.</p> <p>Halte-Garderie L'Arc-En-Ciel : La Halte-Garderie L'Arc-En-Ciel ne semble pas être vulnérable aux inondations ou sécheresses.</p> <p>La Garderie Le Petit Soleil : La Garderie Le Petit Soleil est située aux abords de la rivière St-Régis. Dans le cas d'une crue extrême ou d'embâcles, le niveau de la rivière pourrait être rehaussé et atteindre la garderie.</p> <p>Source: <i>Observations Google Map et Google Earth Pro</i></p>
CHSLD	<p>CHSLD Sainte-Catherine : Le CHSLD ne semble pas être vulnérable aux inondations ou sécheresse.</p> <p>Source: <i>Observations Google Map et Google Earth Pro</i></p>
Lignes de transport public	<p>CIT Roussillon – Lignes 30-33, 37 : Il existe des lignes de transport public (autobus). Il est raisonnable de penser qu'en cas de pluie très importante, il pourrait y avoir une accumulation d'eau sur les lignes de transport public, ce qui pourrait interrompre le service ou forcer des détours.</p> <p>Source: <i>Observations Google Map et Google Earth Pro</i></p>

Établissements d'éducation	<p>Collège Charles-Lemoyne : Le Collège Charles-Lemoyne ne semble pas être vulnérable aux inondations ou sécheresses.</p> <p>École de l'Odysée : L'École de l'Odysée ne semble pas être vulnérable aux inondations ou sécheresses.</p> <p>École des Bourlingueurs : L'École des Bourlingueurs n'est pas située sur une surface propice à l'absorption de l'eau dans le cas d'une pluie important. Il est conservateur de considérer qu'il pourrait y avoir accumulation d'eau.</p> <p>École des Timoniers : L'École des Timoniers ne semble pas être vulnérable aux inondations ou sécheresses.</p> <p>École Saint-Jean : L'École Saint-Jean ne semble pas être vulnérable aux inondations ou sécheresses.</p> <p>Les écoles sont vulnérables en situation de chaleur extrême, car la plupart des écoles ne possèdent pas de systèmes de climatisation et, par conséquent, leurs occupants sont vulnérables en situation de canicules.</p> <p>Source: <i>Observations Google Map et Google Earth Pro et connaissances générales à partir d'articles de journaux rédigés lors des dernières canicules (Mercure et Morasse, 2017)</i></p>
Poste de police	<p>Le poste de police attitré à la Ville de Sainte-Catherine est la régie intermunicipale de la Police de Roussillon, qui ne semble pas être vulnérable aux inondations ou sécheresses.</p> <p>Source: <i>Observations Google Map et Google Earth Pro</i></p>
Station de pompage	<p>Comme l'eau est pompée directement du Fleuve St-Laurent à la hauteur de Candiac, il ne devrait pas y avoir d'impact dans le cas d'une inondation ou d'une sécheresse.</p> <p>Source: <i>Site Internet de l'usine de filtration de la Ville de Candiac et observations Google Map et Google Earth Pro</i></p>
Stations d'essence	<p>Couche-Tard : Le Couche-Tard ne semble pas être vulnérable aux inondations ou sécheresses.</p> <p>Shell : Le Shell est situé aux abords de la rivière St-Régis. Dans le cas d'une crue extrême ou d'embâcles, le niveau de la rivière pourrait être rehaussé et atteindre la station d'essence. De plus, cette station n'est pas située sur une surface propice à l'absorption de l'eau dans le cas d'une pluie importante. Il est conservateur de considérer qu'il pourrait y avoir accumulation d'eau.</p>
Usine de traitement des eaux	<p>L'usine de traitement des eaux qui dessert la Ville de Sainte-Catherine est l'usine de filtration de Candiac. Située aux abords du Fleuve Saint-Laurent, l'usine pourrait être vulnérable en cas de fortes crues ou d'érosion riveraine.</p> <p>Source: <i>Site Internet de l'usine de filtration de la Ville de Candiac et observations Google Map et Google Earth Pro</i></p>

ANNEXE III

DOCUMENT D'INFORMATION – SERVICES URBAINS – VILLE DE SAINT-MICHEL

Services urbains

Caserne de pompiers

380, rue Blais, Saint-Michel



La caserne ne semble pas vulnérable aux inondations ou sécheresses. Toutefois, en considérant que la Ville de Saint-Michel s'alimente en eau par des puits, il est raisonnable de penser que l'eau des pompiers provient également de puits. Par conséquent, en cas de sécheresse, la hauteur des puits devrait baisser et réduire la capacité d'alimentation en eau du service des incendies.

ANNEXE IV

ACTIONS PROPOSÉES PAR LA RÉ-ALLIANCE POUR LE BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE SAINT-RÉGIS (Audet, 2019)

Afin d'améliorer l'infiltrer de l'eau sur le territoire du bassin versant de la Saint-Régis, les 13 actions suivantes ont été identifiées :

- 1) Accompagnement de 15 producteurs agricoles riverains de Saint-Constant et Saint Isidore pour intégrer de nouvelles pratiques agroenvironnementales reconnues;
- 2) Application du règlement 109 de la MRC de Roussillon et de l'article 21 du règlement ADM-142-06 de la MRC des Jardins-de-Napierville, qui limitent à 15 l/s/ha les apports en eau de ruissellement des constructions possédant une surface d'imperméabilisation supérieure ou égale à 1000 m², par les urbanistes des municipalités du territoire;
- 3) Sensibilisation des urbanistes et responsables des travaux publics aux guides de bonne pratique et outils de récupération de l'eau de pluie;
- 4) Sensibilisation des petits constructeurs et citoyens qui entreprennent des rénovations afin qu'ils intègrent les pratiques limitant le ruissellement;
- 5) Modélisation des solutions possibles au problème d'inondation par refoulement dans le village de Saint-Isidore;
- 6) Analyse coût-avantage des diverses solutions modélisées, en intégrant le concept de perception sociale;
- 7) Mise en place d'un service de distribution et d'installation de barils de récupération de l'eau de pluie dans toutes les municipalités des MRC de Roussillon et des Jardins-de-Napierville;
- 8) Formation dans les écoles sur les techniques simples et concrètes pour réduire le gaspillage d'eau et participation à « J'adopte un cours d'eau »;
- 9) Mise en place d'incitatifs pour les petits constructeurs, propriétaires qui entreprennent des rénovation et citoyens de manière générale pour les aider à intégrer les pratiques limitant le ruissellement;

- 10) Sensibilisation des élus à l'implantation de pavés poreux lors de rénovations constructions;
- 11) Élaboration d'un projet « Sous les pavés » dans le bassin versant de la Saint-Régis;
- 12) Présentations « Par notre propre énergie » avec les réseaux de plusieurs partenaires de la Rés-Alliance de la Saint-Régis;
- 13) Installation de jardins de pluie dans les municipalités des MRC de Roussillon et des Jardins-de-Napierville.

Afin de réduire les effets de l'érosion sur le territoire du bassin versant de la Saint-Régis, les six (6) actions suivantes ont été identifiées :

- 1) Identification des secteurs d'intervention prioritaires pour la stabilisation de la MRC de Roussillon;
- 2) Tracés historiques des rivières Saint-Régis et Saint-Pierre à partir de images aériennes de 1930 à 2018;
- 3) Intégration systématique du balisage des bandes riveraines aux appels d'offres pour les entretiens de cours d'eau en milieu rural;
- 4) Stabilisation des berges de la rivière Saint-Régis à Sainte-Catherine;
- 5) Création d'un fonds kilométrage-carboneutre pour financer les projets de plantation de brise-vent ou bandes riveraines;
- 6) Évaluation de la faisabilité de l'implantation de brise-vent végétaux vivants sur les propriétés au sud de l'Autoroute 30 à Saint-Constant.

Afin de réutiliser ou recycler l'eau sur le territoire du bassin versant de la Saint-Régis, le comité consultatif propose de s'arrimer avec le projet RADEAU pour mieux comprendre l'utilisation en eau souterraine du milieu agricole du bassin versant de la Saint-Régis. Les besoins en eau pourront être documenté dans un contexte de pénurie d'eau exacerbée par les changements climatiques.

Afin de maintenir la mobilisation des participants du comité de la Rés-Alliance du bassin versant de la Saint-Régis, les quatre (4) actions suivantes ont été identifiées :

- 1) Poursuivre les rencontres Rés-Alliance de la Saint-Régis, réaliser des évaluations annuelles, ajuster le plan d'action en conséquence et recruter les nouveaux participants jugés pertinents;
- 2) Augmenter la visibilité de la Rés-Alliance et inspirer d'autres communautés au Québec et ailleurs dans le monde;
- 3) Arrimage avec le projet « AgriClimat – Des fermes adaptées pour le futur »;
- 4) Modélisation des extrêmes climatiques pour développer des outils d'aide à la décision adaptés à la communauté.

GLOSSAIRE

Adaptation :

- Accommodation des systèmes naturels ou des systèmes humains aux stimuli climatiques réels ou prévus à leurs effets, afin d'en atténuer les inconvénients ou d'en exploiter les avantages (Warren & Lemmen, 2014).
- Démarche d'ajustement au climat actuel ou attendu, ainsi qu'à ces conséquences (Ouranos, 2015).
- Modification des systèmes naturels et humains en réaction à des stimuli climatiques qui surviennent ou qui sont prévus, ou à leurs répercussions, pour en diminuer les effets nocifs ou tirer profit des possibilités qu'ils apportent (Gouv. du Canada, 2016).

Bassin versant : Unité géographique représentant le territoire de drainage d'un point donné appelé exutoire (CEHQ, 2015).

Capacité d'adaptation :

- Capacité des communautés et des écosystèmes à s'ajuster pour faire face aux changements climatiques afin de minimiser les effets négatifs et de tirer profit des avantages (Gouv. du Québec, 2012).
- La totalité des possibilités, des ressources et des institutions propres à un pays, une région, une collectivité ou un groupe, servant à mettre en œuvre des mesures efficaces d'adaptation (Warren & Lemmen, 2014).

Changements climatiques :

- Changement de l'état du climat qui peut être identifié par des changements de la moyenne ou de la variabilité de ses propriétés, et qui persiste pendant une période prolongée, typiquement des décennies, voire plus longtemps (Warren & Lemmen, 2014).
- Variation de l'état du climat, qu'on peut déceler par des modifications de la moyenne et/ou de la variabilité de ses propriétés et qui persiste pendant une longue période, généralement pendant des décennies ou plus (Ouranos, 2015).
- Changements dans la moyenne et, ou, la variabilité des paramètres climatiques sur une certaine période, qui peuvent varier de quelques mois à des milliers ou à des millions d'années (Gouv. du Canada, 2016).

Crue : Période de fort débit (CEHQ, 2015).

Étiage : Période de faible débit (CEHQ, 2015).

Hydraulicité : Valeur moyenne de débits sur de longues périodes (CEHQ, 2015).

Modèle climatique :

- Représentation numérique du système climatique basée sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques de ses composantes et leurs processus, aussi bien

d'interaction que de rétroaction, et qui tient compte de la totalité ou d'une partie de ses propriétés connues (Warren & Lemmen, 2014).

- Représentation numérique du système climatique basée sur une représentation des processus atmosphériques et océaniques (CEHQ, 2015).

Québec méridional : Fait référence au Québec hydrologique méridional, un territoire de 726 000 km² couvrant les bassins versants des affluents du fleuve Saint-Laurent, de la rivière des Outaouais, de la rivière Saguenay, de la Gaspésie, de la Côte-Nord ainsi que d'une portion de l'Abitibi-Jamésie (CEHQ, 2015).

Résilience :

- Aptitude d'un système (incluant les écosystèmes), d'une collectivité ou d'une société potentiellement exposés à des aléas à s'adapter, en résistant ou en changeant, en vue d'établir et de maintenir des structures et un niveau de fonctionnement acceptables (Gouv. du Québec, 2012).
- Capacité d'un système social ou écologique d'absorber des perturbations tout en conservant sa structure de base et ses modes de fonctionnement ainsi que sa capacité de s'organiser et de s'adapter au stress et au changement (Warren & Lemmen, 2014).
- Capacité des systèmes sociaux, économiques ou écologiques à faire face aux événements dangereux, tendances ou perturbations, à y réagir et à se réorganiser de façon à conserver leurs fonctions essentielles, leur identité et leur structure, tout en maintenant leurs facultés d'adaptation, d'apprentissage et de transformation (Ouranos, 2015).
- Capacité des personnes et des systèmes d'absorber des effets défavorables et de réagir aux conditions climatiques changeantes (Gouv. du Canada, 2016).

Risque :

- Conséquences éventuelles et incertaines d'un événement sur quelque chose ayant une valeur, compte dument tenu de la diversité des valeurs (Ouranos, 2015).
- Combinaison de la probabilité de l'occurrence et des conséquences d'un événement (Gouv. du Canada, 2016).

Simulation climatique : Exécution d'un modèle climatique selon certains paramètres et conditions initiales donnés (CEHQ, 2015).

Vulnérabilité :

- Condition résultant de facteurs physiques, sociaux, économiques ou environnementaux, qui prédispose les éléments exposés à la manifestation d'un aléa à subir des préjudices ou des dommages (Gouv. du Québec, 2012).
- Mesure dans laquelle un système est sensible aux effets défavorables du changement climatique, y compris la variabilité du climat et les phénomènes extrêmes (Warren & Lemmen, 2014).
- Propension ou prédisposition à subir des dommages (Ouranos, 2015).

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) ADEME. 2012. *Suivre et évaluer l'adaptation aux changements climatiques dans les territoires*. Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie. 28 pages.
- 2) ADEME. Mars 2015. *Matrice de vulnérabilité – Démarche de diagnostic des impacts du changement climatique sur un territoire*. Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie.
- 3) Audet, G. Octobre 2019. *Plan d'action pour l'adaptation du bassin versant de la rivière Saint-Régis*. Document de travail.
- 4) BNQ. Février 2013. *BNQ 3019-190 : Lutte aux îlots de chaleur urbains – Aménagement des aires de stationnement – Guide à l'intention des concepteurs*. Bureau de normalisation du Québec. 86 pages.
- 5) Centre d'expertise hydrique du Québec. 2015. *Atlas hydroclimatique du Québec méridional – Impact des changements climatiques sur les régimes de crue, d'étiage et d'hydraulicité à l'horizon 2050*. CEHQ. 96 pages.
- 6) Charron, I. Mai 2016. *A Guidebook on Climate Scenarios: Using Climate Information to Guide Adaptation Research and Decisions*. Ouranos. 110 pages.
- 7) Communication personnelle. 23 octobre 2017. *Conversation téléphonique avec Simon Ricard, ingénieur à la DEHA*.
- 8) Enviro-access. Juillet 2013. *Plan d'adaptation aux changements climatiques – Ville de Sherbrooke : 2012-2013*. Ville de Sherbrooke – Division de l'environnement. 160 pages.
- 9) Environnement et Changement climatique Canada. 2016. *Cadre stratégique fédéral sur l'adaptation*. Gouvernement du Canada.
- 10) FAO. 2018. *FAO's work on climate change*. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. 40 pages.
- 11) Google Earth Pro. Accédé pour la dernière fois le 29 mars 2020.
- 12) Gouvernement du Québec. 2012. *Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques (PACC)*. Le Québec en Action : Vert 2020. 66 pages.
- 13) GIEC. 2007. *Bilan 2007 des changements climatiques*. Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. 103 pages.
- 14) Gouvernement du Québec. Juin 2012. *Stratégie gouvernementale d'adaptation aux changements climatiques 2013-2020*. Le Québec en Action : Vert 2020. 52 pages.
- 15) IDDPNQL. Avril 2014. *Changements climatiques : Guide de mise en place d'un plan d'adaptation*. Institut de Développement Durable des Premières Nations du Québec et du Labrador. 30 pages.
- 16) Ingénieurs Canada. Juin 2016. *Protocole d'ingénierie du Comité sur la vulnérabilité de l'ingénierie des infrastructures publiques (CVIIP) – Version PLD 10.1*. Ingénieurs Canada. 178 pages.

- 17) Jobin et al. Octobre 2018. *Atlas des territoires d'intérêt pour la conservation dans les Basses-terres du Saint-Laurent*. Plan d'action Saint-Laurent. En ligne. < <https://catalogue.ogsl.ca/dataset/b1e5f6ff-74f0-4912-8591-d66fee189683> >. Consulté le 8 janvier 2020.
- 18) Kadir et al. Août 2013. *Indicators of climate change in California*. California Environmental Protection Agency. 258 pages.
- 19) Le Goff et al. Mai 2012. *Évaluation des vulnérabilités aux changements climatiques de trois projets d'aménagement forestier écosystémique et implications pour le développement d'une stratégie d'adaptation pour l'aménagement forestier au Québec*. Ressources naturelles Canada. 72 pages.
- 20) Mäkinen et al. 2018. *Indicators for adaptation to climate change at national level – Lessons from emerging practice in Europe*. European Environment Agency – European Topic Centre on Climate Change: Impacts, Vulnerability and Adaptation. 68 pages.
- 21) Mercure, P. et Morasse, M-È. 27 septembre 2017. *Chaleur dans les écoles : étudier à plus de 30°C*. La Presse.
- 22) Mimura et al. 2014. *Adaptation Planning and Implementation*. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Pages 869-898.
- 23) Osseyrane et al. Mars 2014. *Guide de gestion des eaux pluviales : Stratégies d'aménagement, principes de conception et pratiques de gestion optimales pour les réseaux de drainage en milieu urbain*. Gouvernement du Québec. 386 pages.
- 24) Ouranos. 2015. *Synthèse des connaissances sur les changements climatiques – Édition 2015*. Ouranos. 417 pages.
- 25) Picard, M.-C. Avril 2014. *Changements climatiques : Guide de mise en place d'un plan d'adaptation*. Institut de développement durable des Premières Nations du Québec et du Labrador. 30 pages.
- 26) RLRQ. Chapitre A-19.1. *Loi sur l'aménagement et l'urbanisme*. À jour au 1^{er} février 2020. Éditeur officiel du Québec.
- 27) RLRQ. Chapitre C-6.2. *Loi affirmant le caractère collectif des ressources en eau et favorisant une meilleure gouvernance de l'eau et des milieux associés*. À jour au 1^{er} février 2020. Éditeur officiel du Québec.
- 28) RLRQ. Chapitre S-2.3. *Loi sur la sécurité civile*. À jour au 1^{er} février 2020. Éditeur officiel du Québec.
- 29) RLRQ. Chapitre S-3.1.01. *Loi sur la sécurité des barrages*. À jour au 1^{er} février 2020. Éditeur officiel du Québec.
- 30) RLRQ. Chapitre Q-2. *Loi sur la qualité de l'environnement*. À jour au 1^{er} février 2020. Éditeur officiel du Québec.
- 31) ROBVQ. *Communautés leaders*. < https://robvq.qc.ca/resalliance/communautes_leaders >. Consulté 18 juin 2017.

- 32) ROBVQ. *Guide sur l'intégration de la variabilité climatique dans les Plans directeurs de l'eau (PDE)*. < https://robvq.qc.ca/guides/changements_climatiques >. Novembre 2014.
- 33) ROBVQ. *Le Regroupement des organismes de bassins versants du Québec*. < <https://robvq.qc.ca/robvq> >. Consulté 17 décembre 2019.
- 34) ROBVQ. Mai 2018. *Matrice de vulnérabilité – Évaluation des risques et des vulnérabilités dans un contexte de changements climatiques*. Regroupement des organismes de bassins versants du Québec.
- 35) ROBVQ. *Qu'est-ce que la Rés-Alliance?* < <https://robvq.qc.ca/resalliance/apropos> >. Consulté 29 mars 2020.
- 36) ROBVQ. Septembre 2018. *Évaluation des vulnérabilités des usages associés à l'eau aux changements climatiques*. Rés-Alliance. 25 pages.
- 37) SNC-Lavalin. Mars 2013. *Plan d'adaptation aux changements climatiques – Ville de Trois-Rivières*. Ville de Trois-Rivières. 107 pages.
- 38) Statistique Canada. 2017. *Delson, V [Subdivision de recensement], Québec et Québec [Province] – Profil du recensement*. Recensement de 2016. Produit n°98-316-X2016001 au catalogue de Statistique Canada. Ottawa. Diffusé le 29 novembre 2017.
- 39) Statistique Canada. 2017. *Saint-Constant, V [Subdivision de recensement], Québec et Roussillon, MRC [Division de recensement] – Profil du recensement*. Recensement de 2016. Produit n°98-316-X2016001 au catalogue de Statistique Canada. Ottawa. Diffusé le 29 novembre 2017.
- 40) Statistique Canada. 2017. *Saint-Isidore, PE [Subdivision de recensement], Québec et Roussillon, MRC [Division de recensement] – Profil du recensement*. Recensement de 2016. Produit n°98-316-X2016001 au catalogue de Statistique Canada. Ottawa. Diffusé le 29 novembre 2017.
- 41) Statistique Canada. 2017. *Saint-Michel, MÉ [Subdivision de recensement], Québec et Les Jardins-de-Napierville, MRC [Division de recensement] – Profil du recensement*. Recensement de 2016. Produit n°98-316-X2016001 au catalogue de Statistique Canada. Ottawa. Diffusé le 29 novembre 2017.
- 42) Statistique Canada. 2017. *Saint-Rémi, V [Subdivision de recensement], Québec et Les Jardins-de-Napierville, MRC [Division de recensement] – Profil du recensement*. Recensement de 2016. Produit n°98-316-X2016001 au catalogue de Statistique Canada. Ottawa. Diffusé le 29 novembre 2017.
- 43) Statistique Canada. 2017. *Sainte-Catherine, V [Subdivision de recensement], Québec et Roussillon, MRC [Division de recensement] – Profil du recensement*. Recensement de 2016. Produit n°98-316-X2016001 au catalogue de Statistique Canada. Ottawa. Diffusé le 29 novembre 2017.
- 44) UKCIP. Novembre 2011. *AdaptME Toolkit: Adaptation monitoring & evaluation*, United Kingdom Climate Impacts Programme. 37 pages.
- 45) Villanueva, S. 2011. *Learning to ADAPT: monitoring and evaluation approaches in climate change adaptation and disaster risk reduction – challenges, gaps and ways forward*. IDS. 49 pages.

- 46) Ville de Montréal. 2019. *Suivi du Plan d'adaptation aux changements climatiques de l'agglomération de Montréal 2015-2020*. Ville de Montréal – Service de l'environnement. 68 pages.
- 47) Warren, F.J. et Lemmen, D.S. 2014. *Vivre avec les changements climatiques au Canada : perspectives des secteurs relatives aux impacts et à l'adaptation*. Gouvernement du Canada. 292 pages.