



RECHERCHE SUR LES NORMES

Évaluation du débit de pointe dans un climat changeant : recommandations pour le Code canadien sur le calcul des ponts routiers

mars 2024

Auteurs

Tricia Stadnyk, P.Eng., PhD., HydroS Engineering Ltd.

John van der Eerden, M.Eng., P.Eng., Associated Engineering Group Ltd.

Comité consultatif du projet

Alexander Wilson, CBCL

Jean-Luc Martel, École de technologie supérieure

Jeremy Fyke, Environnement et Changement climatique Canada

Kevin Williams, Atlantic Industries

Luc Chouinard, Université McGill

Michael Vieira, Manitoba Hydro

Saidur Rahman, Ville of Toronto

Rocío Morales Rayas, Groupe CSA

Mark Braiter, Groupe CSA (chargé de projet)

Remerciements

Les auteurs aimeraient remercier tous les participants à l'entrevue et les professionnels qui ont pris le temps de fournir leurs commentaires et leur rétroaction sur ce travail. Vos idées, vos préoccupations régionales et votre expérience ont été inestimables pour les recommandations finales. Nous reconnaissons également la contribution de MM. Andrew Tefs et Scott Pokorny de Strategic Systems Engineering pour le développement conceptuel et les contributions à l'analyse documentaire.

Clause de non-responsabilité

Cette étude a été produite par les auteurs et appartient à l'Association canadienne de normalisation. Elle vise à fournir des renseignements de nature générale sur le sujet traité. Les opinions exprimées dans cette publication sont celles des auteurs et des participants à l'étude. Les auteurs et l'Association canadienne de normalisation ne sauraient être tenues responsables d'aucune perte ni d'aucun dommage pouvant résulter de l'utilisation du contenu de cette publication.

Avant-propos

Dans le cadre de la conception de ponts, l'analyse hydrologique et hydraulique dépend des estimations du débit dans les bassins hydrographiques, les rivières et les accès spécifiques au site. Les variations de l'ampleur du débit de pointe dans un contexte de changements climatiques sont inconnues ou mal comprises en raison de la complexité des réactions hydrologiques des bassins hydrographiques et des facteurs climatiques qui y sont liés. Le manque d'uniformité qui en découle dans les analyses de fréquence des crues en fonction du climat que les professionnels utilisent actuellement dans la conception des ponts et des autoroutes canadiens peut contribuer à l'incertitude et au risque. Ce rapport de recherche est passé du besoin reconnu de disposer d'outils normalisés et simplifiés au soutien des professionnels en hydrologie au Canada dans le cadre de l'exécution des évaluations du débit de pointe dans un contexte de changements climatiques. La pratique actuelle concernant les petits bassins hydrographiques à dominante pluviale recommande l'utilisation d'approches de mise à l'échelle de la température appliquées à l'intensité des précipitations au moyen de la relation de Clausius-Clapeyron. Comme cette approche est bien documentée, les petits bassins hydrographiques à dominante pluviale ne sont pas inclus dans ce rapport. Les recommandations présentées dans ce rapport visent à soutenir les prochaines éditions de la norme CSA S6, *Code canadien sur le calcul des ponts routiers* [1], et à contribuer à faire progresser une méthode ou une approche commune dans l'exécution d'études hydrologiques et d'analyses de fréquence des crues relativement à la conception de ponts au Canada. Toutefois, ces recommandations sont également susceptibles d'être appliquées à des études similaires lorsque des études sur les débits de pointe dans un climat changeant sont nécessaires, comme des évaluations des risques d'inondation.

Les résultats présentés dans ce rapport sont tirés de l'expérience personnelle des auteurs, d'une analyse documentaire approfondie des estimations du débit de pointe dans un contexte de changements climatiques et d'entrevues avec des professionnels et des chercheurs clés de partout au Canada. Bien que l'analyse documentaire porte sur les outils et les processus utilisés pour la régionalisation et l'analyse de fréquence des crues, à la fois dans les publications universitaires (évaluées par les pairs) et dans les rapports des professionnels, les entrevues visent à mettre en évidence les leçons tirées de la mise en œuvre de l'estimation du débit de pointe par les experts. Ensemble, ils guident la création d'un cadre pour convertir ces connaissances en un ensemble de procédures et d'outils qui sont susceptibles d'être utilisés par les professionnels pour estimer les débits de pointe aux sites près des ponts partout au Canada. Il devrait être noté que, même si cette étude établit le cadre et les recommandations pour ces procédures et ces outils, elle ne comprend pas l'élaboration de tels outils. Cette entreprise ambitieuse serait l'objectif d'un programme de mise en œuvre ultérieur.

Table des matières

Glossaire	6
Sommaire	7
1 Introduction	9
1.1 Comprendre le problème	9
1.2 Justification de la prise en compte de l'estimation du débit de pointe dans le Code	10
2 Étude de l'estimation du débit de pointe à l'échelle du Canada	11
2.1 Compréhension de l'état des changements climatiques à l'échelle du Canada	11
2.1.1 Compréhension de l'état des changements climatiques à l'échelle du Canada	11
2.1.2 Évaluation des changements climatiques au Canada	12
2.1.3 Pratique exemplaire en matière d'évaluation de l'impact des changements climatiques	13
2.1.4 Analyse de fréquence des crues	19
2.1.5 Considération de la non-stationnarité des changements climatiques	20
2.1.6 Pratique exemplaire en matière d'estimation du débit de pointe au Canada	21
2.1.7 Prise en compte de l'incertitude	22
2.2 Activités de recherche pertinentes partout au Canada	22
2.2.1 Programme d'identification et de cartographie des aléas d'inondation	22
2.2.2 Boîte à outils d'analyse de fréquence régionale FloodNet	23
2.2.3 Ensembles climatiques à échelle réduite et à biais corrigé	23
2.2.4 Cadre de travail indépendant des modèles	24
2.3 Entrevues avec les professionnels et les organismes	24
3 Vers un jeu de données national sur les courbes de limite	26
3.1 Approche recommandée pour élaborer un jeu de données national sur les courbes de limite	28
3.1.1 Définition de la portée de l'étude	28
3.1.2 Sélection de l'ensemble de modèles climatiques	29

3.1.3 Correction de biais pour les données climatiques	30
3.1.4 Réduction d'échelle pour les données des modèles climatiques mondiaux	31
3.1.5 Sélection du modèle hydrologique	31
3.1.6 Configuration des modèles hydrologiques	32
3.1.7 Étalonnage et validation des modèles hydrologiques	32
3.1.8 Simulations de modèles fondées sur le modèle climatique mondial	33
3.1.9 Analyse de fréquence des crues	33
3.1.10 Élaboration des courbes de limite et des facteurs de changement delta	34
3.1.11 Application des courbes de limite et des facteurs de changement delta	36
3.2 Contrôle de la qualité des bases de données et diffusion	37
3.3 Éléments recommandés de l'approche	38
3.3.1 Portée de l'étude	38
3.3.2 Ensemble climatique	38
3.3.4 Réduction d'échelle et correction de biais	38
3.3.5 Sélection des modèles hydrologiques	39
3.3.6 Hydrological Model Setup	39
3.3.7 Étalonnage et validation des modèles hydrologiques	39
3.3.8 Horizons temporels pour l'augmentation de la température moyenne mondiale	39
3.3.9 Exécution des simulations	39
3.3.10 Élaboration des courbes de limite	40
3.3.11 Estimation des facteurs de changement delta	40
3.3.12 Application des facteurs de changement delta par les professionnels	40
3.3.13 Contrôle des révisions	41
3.3.14 Contrôle et diffusion des données	41
3.4 Limites et autres considérations	41
4 Conclusions	42
4.1 Avantages pour les professionnels et les propriétaires	43
References	45

Glossaire

AFC – Analyse de fréquence des crues, qui consiste à associer une probabilité d'occurrence à un seuil de débit de cours d'eau précis.

AFCR – Analyse de fréquence des crues régionale, qui est utilisée pour estimer l'ampleur des crues de diverses périodes de récurrence dans des régions homogènes, par opposition à des sites ou à des jauges uniques.

CMIP – Projet d'intercomparaison des modèles couplés, soit un ensemble de modèles climatiques mondiaux (MCM) provenant de différents instituts de modélisation du climat du monde entier, qui exécutent tous une série de scénarios d'émissions de carbone pour représenter différentes trajectoires des changements climatiques sur un horizon temporel défini.

DS – Dépassements de seuil, méthode statistique d'AFC utilisant des observations supérieures à un seuil donné, appelées dépassements. Les DS sont définis pour désigner les types d'événements comme la fonte des neiges provoquée par les débits de pointe générés par les précipitations.

GEC – Grands ensembles climatiques, qui représentent des ensembles élaborés à partir de multiples modèles climatiques mondiaux et scénarios d'émissions.

GIEC – Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, qui est l'organisme de réglementation international qui contrôle la publication des expériences du CMIP.

IDF – Intensité-durée-fréquence, qui est une approche utilisée pour évaluer le ruissellement dû aux précipitations causées par les tempêtes pluviales en corrélant la quantité de précipitations (intensité) à la longueur des précipitations (durée) pour arriver à la gravité de la tempête (fréquence ou période de récurrence).

MCM – Modèle climatique mondial ou modèle de circulation générale, qui fait référence à la simulation à l'échelle mondiale des variables climatiques utilisées pour l'évaluation des changements climatiques.

MCR – Modèle climatique régional, qui fait référence à la représentation dynamique (à l'aide d'un modèle) à échelle réduite des processus climatiques mondiaux et des variables pour une zone d'intérêt particulière.

MST – Modèle du système terrestre, ou simulation de tous les processus terrestres, y compris les processus biologiques, chimiques, biogéochimiques ainsi que climatiques et hydrologiques. Il est utilisé comme une représentation améliorée des processus de surface dans les MCM.

Personne qualifiée – personne qui possède les connaissances, les compétences, la formation et l'expérience et qui satisfait à d'autres exigences pour exécuter une AFC. Terme utilisé de façon interchangeable avec « professionnel ».

Professionnel – personne qui possède les connaissances, les compétences, la formation et l'expérience et qui satisfait à d'autres exigences pour exécuter une AFC. Terme utilisé de façon interchangeable avec « personne qualifiée ».

RCP – Profils représentatifs d'évolution de concentration, qui proviennent de la cinquième évaluation du projet d'intercomparaison des modèles couplés (CMIP5). Voir également la définition des SSP, qui s'applique à la sixième évaluation (CMIP6).

RE – Rapport d'évaluation, soit le document qui accompagne une publication des expériences du CMIP. (Concerne le RE du GIEC.)

SMILE – Grand ensemble de conditions initiales à modèle unique, qui représente un ensemble élaboré à partir d'un seul MCM, mais avec des conditions initiales et limites pour chaque membre.

SSP – Trajectoires socio-économiques partagées, qui proviennent de la sixième évaluation du projet d'intercomparaison des modèles couplés (CMIP6) représentant différents scénarios de gaz à effet de serre ou d'émissions et l'application d'une gamme d'innovations technologiques de compensation pour atténuer les changements climatiques à l'avenir. Voir également la définition de RCP, qui s'applique à la cinquième version du CMIP.

TMM – Température moyenne mondiale, dont la hausse représente l'augmentation de la température moyenne mondiale au-dessus des niveaux préindustriels (généralement signalée par rapport à la température de 1880).

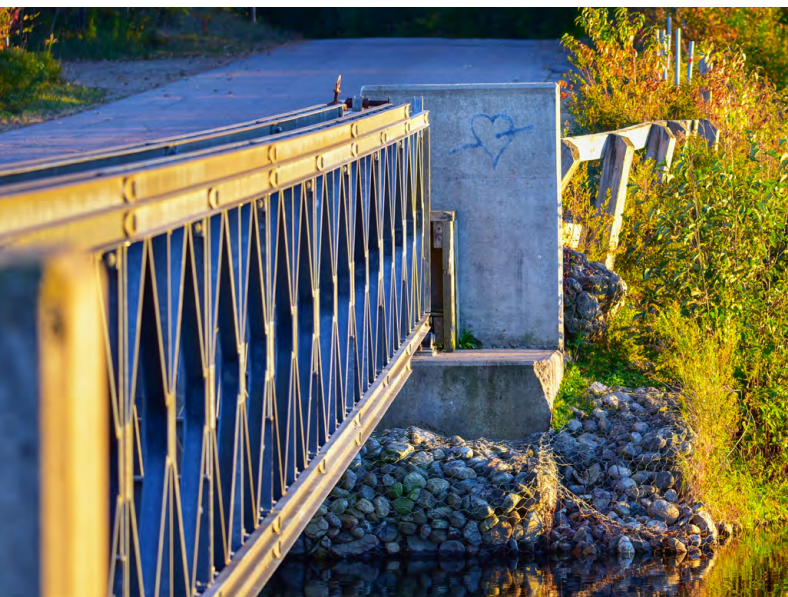
Sommaire

Une des principales causes de défaillance des ponts est due à l'affouillement et à l'érosion autour des piles et des culées de pont. Une protection adéquate contre ces dangers ainsi que la détermination de la largeur de l'ouverture hydraulique requise pour les ponts qui traversent des cours d'eau sont largement dictées par l'estimation du débit de pointe nominal. Ce débit permet aux professionnels de gérer les vitesses et l'accélération du courant à travers le site du pont, de s'assurer du dégagement adéquat des soffites du pont et d'évaluer les débits d'entrée et de débordement. En déterminant une travée de pont et une ouverture hydraulique adéquates, on peut gérer l'affouillement, l'érosion et le débordement. Dans le passé, les estimations du débit de conception dépendaient fortement des documents historiques et s'appuyaient généralement sur la réalisation de l'analyse de fréquence des données historiques sur les débits observés ou d'un substitut de celles-ci. Ces estimations fondées sur les débits historiques sont de moins en moins valides dans un contexte de climat changeant, en particulier pour les infrastructures comme les ponts, qui sont destinées à durer des décennies. Dans le cas des bassins hydrographiques non dominés par les pluies (c.-à-d. les bassins hydrographiques dans lesquels les pointes de crue touchant les ponts ne peuvent pas être reliées directement à des épisodes de pluie individuels), une modélisation hydrologique du bassin hydrographique contributeur est requise pour estimer le débit de pointe dans des conditions futures. Cette approche est susceptible d'exclure l'hypothèse de la stationnarité climatique, qui est une hypothèse clé des évaluations hydrologiques classiques. Cependant, la modélisation hydrologique des bassins hydrographiques pourrait être une entreprise importante, et le niveau d'effort pour construire et analyser un modèle hydrologique de bassin hydrographique axé sur le climat peut ne pas être proportionnel au risque imposé sur le site du pont en question.

Les recherches menées pour ce rapport concernent l'ensemble des approches simplifiées et normalisées qui permettraient aux professionnels d'estimer le débit de pointe dans des conditions futures pour tous les emplacements où se situent des ponts au Canada. Ce rapport constitue la première étape vers une initiative dont le but ambitieux est d'élaborer des facteurs de limite supérieure qui sont susceptibles d'être appliqués à l'analyse de fréquence des documents historiques pour tenir compte des répercussions des changements climatiques. Bien que les mécanismes sous-jacents des crues puissent être modifiés, élaborer des « courbes de limite » et déduire des « facteurs de changement delta » correspondants pourrait être justifié en comparant des débits de pointe issus de scénarios climatiques modélisés historiques et futurs. Les facteurs de changement delta pourraient ensuite être appliqués à d'autres emplacements dans la même région hydrologique pour estimer les débits de pointe dans des conditions futures conservatrices. Ainsi, un professionnel pourrait utiliser des procédures classiques d'estimation du débit de pointe, comme l'analyse de fréquence par station unique ou des approches régionales, et appliquer un facteur de changement delta correspondant à la variation maximale du débit de pointe prévue en fonction d'un scénario d'émissions et d'un horizon temporel précis (collectivement désignés comme des degrés de réchauffement climatique). Les facteurs de changement delta constitueraient la base d'une conception résiliente (c.-à-d. correspondant à une faible probabilité de dépassement) en l'absence d'évaluations hydrologiques détaillées spécifiques au site et dictées par des paramètres climatiques futurs. En retour, cela fournirait un niveau d'uniformité pour effectuer les évaluations des débits de pointe pour la conception de ponts dans un climat changeant, ce qui serait avantageux pour les propriétaires et les professionnels en réduisant les coûts d'ingénierie tout en intégrant l'expertise hydrologique dans les évaluations.

Bien que l'objectif ultime soit d'élaborer un jeu de données géographiques qui permet aux professionnels d'appliquer un facteur de changement delta à l'analyse historique de la fréquence des crues basée sur des conditions naturelles en eau libre pour tenir compte des changements climatiques, le présent rapport se limite à l'étude de faisabilité d'un tel projet ainsi qu'à la formulation de recommandations relatives à une approche et aux limites prévues. La recherche comprenait une revue des études pertinentes et a examiné si celles-ci pourraient être exploitées ou émulées à l'échelle nationale. En raison de l'évolution rapide des études hydrologiques couvrant une variété d'échelles spatiales, de paysages et de conditions hydrologiques, ce rapport a permis de déterminer les approches les plus récentes, les plus fiables et les plus pertinentes, et il comprend des entrevues avec divers organismes et personnes clés responsables de l'estimation des débits de pointe.

Ce rapport conclut qu'un jeu de données national sur les courbes de limite pourrait être élaboré grâce à un effort de modélisation à l'échelle du Canada, qui effectue une évaluation de l'impact des changements climatiques sur l'estimation du débit de pointe. À partir de ces courbes de limite, des facteurs de changement delta pourraient être déterminés pour diverses régions ou divers bassins hydrographiques au Canada. Ils pourraient ainsi être utilisés pour mettre à l'échelle les estimations historiques du débit de pointe provenant de professionnels sur place dans le cadre de la conception de ponts pour tenir compte de l'impact des changements climatiques. L'approche recommandée établit un équilibre entre une rigueur adéquate pour les mesures d'adaptation climatique, comme cela est recommandé par le sixième rapport d'évaluation (AR6) du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), tout en reconnaissant les limites pratiques des ressources, du temps et des contraintes budgétaires des professionnels.



« Une des principales causes de défaillance des ponts est l'affouillement et l'érosion autour des piles et des culées de pont. »

1 Introduction

1.1 Comprendre le problème

Une des principales causes de défaillance des ponts est l'affouillement et l'érosion autour des piles et des culées de pont [1]. Une protection adéquate contre ces dangers et la détermination de la taille d'ouverture hydraulique requise pour les ponts qui traversent des cours d'eau sont largement dictées par l'estimation du débit de pointe nominal, qui a une incidence sur les vitesses et les lignes piézométriques. Dans le passé, le débit de conception était généralement estimé en fonction d'une analyse de fréquence des données historiques du débit d'un cours d'eau ou d'un substitut de ces données. Ces estimations historiques fondées sur le débit d'un cours d'eau sont de moins en moins valides dans un climat changeant. Au Canada, les changements climatiques ont eu une incidence sur la fréquence, l'ampleur et le moment des catastrophes naturelles mettant en cause l'eau et les crues [1], ce qui exige un examen plus approfondi de la fréquence et de l'ampleur changeantes des débits de pointe qui résultent de causes anthropiques et naturelles non stationnaires.

Le Bureau canadien des conditions d'admission en génie a publié une ligne directrice nationale concernant les principes d'atténuation et d'adaptation aux changements climatiques qui fournit des directives spécifiques à la profession d'ingénieur et qui établit clairement la nécessité d'intégrer les changements climatiques dans les pratiques d'ingénierie et dans la conception technique [2].

La norme CSA S6 actuelle, *Code canadien sur le calcul des ponts routiers* (CCCPR) [1], et les commentaires connexes [3] fournissent des directives limitées pour l'estimation des débits de pointe, indiquant qu'une évaluation hydrologique doit être effectuée en utilisant des méthodes « telles que requises par le propriétaire ». Cette formulation vague peut entraîner une variation de la conception des ponts qui sont destinés à servir pendant 75 à 100 ans et qui seront soumis à des crues d'une ampleur changeante. Des normes plus rigoureuses, semblables à celles en place pour la conception des barrages canadiens [4], sont nécessaires.

Dans un climat futur, les changements temporels et spatiaux que subissent les caractéristiques des précipitations, de la fonte des neiges et de la pluie sur la neige pourraient entraîner des changements dans les mécanismes qui génèrent les crues responsables des débits de pointe à l'emplacement d'un pont, causant ainsi des changements importants dans la fréquence, la gravité et l'occurrence du ruissellement. Pour les petits bassins hydrographiques, où le mécanisme dominant des crues est le résultat du ruissellement généré par les précipitations, les courbes intensité-durée-fréquence (IDF) combinées à la méthode des pluies basée sur les événements sont généralement utilisées pour évaluer le débit de pointe. L'approche actuelle de mise à l'échelle de la température recommandée, décrite dans la norme CSA Plus 4013, *Guide technique : Élaboration, interprétation et utilisation de l'information relative à l'intensité, à la durée et à la fréquence (IDF) des chutes de pluie : guide à l'intention des spécialistes canadiens en matière de ressources en eau* [5], pourrait être utilisée pour estimer les débits de

pointe futurs. Toutefois, pour les bassins hydrographiques plus grands et plus complexes, où les débits de pointe sont régis par des conditions hydrologiques uniques et variables, la modélisation des bassins hydrographiques en amont du site du pont est généralement requise pour estimer les débits de pointe futurs. Des conseils et du soutien supplémentaires sont nécessaires pour les ingénieurs et les géoscientifiques chargés d'estimer ces débits de pointe dans le cadre de la conception des ponts dans un contexte de climat changeant.

1.2 Justification de la prise en compte de l'estimation du débit de pointe dans le Code

Une version mise à jour du CCCPR et des commentaires connexes (CSA S6.1) est en cours d'élaboration, comme cela est décrit dans le rapport de recherche du Groupe CSA, *“Climate Change Provisions for CSA S6:25 Canadian Highway Bridge Design Code: Findings and Recommendations”* [6]. La mise à jour fournira des directives plus claires sur la méthode ou l'approche commune, y compris les mesures particulières requises pour l'analyse hydrologique et l'estimation du débit de pointe à l'emplacement des ponts. Cela pourrait être réalisé grâce à une meilleure compréhension des conditions hydrologiques actuelles (c.-à-d. historiques) et futures, dans le but d'améliorer la résilience des structures de pont au Canada.

Les évaluations hydrologiques tenant compte des changements climatiques sont une étape importante du niveau d'expertise, des ressources et des efforts requis pour estimer le débit de pointe à l'emplacement des ponts. Un grand nombre d'organisations et de professionnels peuvent ne pas avoir l'expertise ou la capacité d'entreprendre une modélisation hydrologique approfondie et fiable ajustée en fonction du climat, de faire l'interprétation et de produire les rapports appropriés dans le cadre d'un projet de pont. De plus, le niveau d'effort requis pour élaborer et analyser un modèle hydrologique lié au climat peut ne pas être proportionnel au risque imposé au pont en question ou au budget ainsi qu'au délai impartis souvent limités pour effectuer l'analyse.

Compte tenu de ces défis, certains territoires canadiens appliquent un coefficient de limite supérieure à l'analyse de fréquence des documents historiques pour traiter les répercussions des changements climatiques. Malgré le fait que cette approche peut ne pas avoir de base scientifique directe (parce que les mécanismes sous-jacents des crues peuvent changer), il peut y avoir une justification scientifique pour la définition de « courbes de limite » et

de « facteurs de changement delta » à partir d'une base de données qui compare les débits de pointe des périodes historiques modélisées et des périodes climatiques normales futures. Les facteurs de changement delta de la limite supérieure qui en résultent pourraient être appliqués à d'autres emplacements dans la même région hydrologique pour estimer les débits de pointe ajustés en fonction du climat. Cette approche pourrait fournir, grâce à un accès plus facile à l'échelle du Canada, une base de données spatiale des facteurs d'ajustement qui pourraient être appliqués aux analyses historiques de fréquence des crues, ce qui serait avantageux pour les propriétaires de ponts et les professionnels.

L'objectif ultime de cette « initiative » est d'élaborer un ensemble de facteurs de changement delta spécifiques à toutes les régions du Canada. Ceci pourrait ainsi être utilisé par les professionnels afin de prédire des valeurs du débit de pointe qui tiennent compte des changements climatiques. Le professionnel appliquerait ces facteurs aux estimations du débit de pointe calculées à partir des méthodes hydrologiques classiques qui supposent un climat stationnaire. Pour déterminer les facteurs de changement delta, les modèles hydrologiques étalonnés des bassins hydrographiques devraient être forcés à l'aide de données climatiques réduites, de manière à ce que les modifications produites dans les estimations du débit de pointe puissent être effectuées en comparant les résultats dans des conditions actuelles et futures. L'objectif est d'élaborer des courbes de limite qui pourraient être utilisées pour calculer des limites supérieures conservatrices pour les variations attendues du débit de pointe en fonction des profils représentatifs d'évolution de concentration sélectionnés ou des trajectoires socio-économiques partagées (RCP ou SSP) et des horizons temporels (collectivement désignés comme degrés d'augmentation de la température moyenne mondiale, en degrés TMM, par rapport à la période de référence de 1987 à 2016).

Les courbes de limite et les facteurs de changement delta conservateurs connexes fourniront la base d'une conception résiliente (c.-à-d. correspondant à une faible probabilité de dépassement) en l'absence d'évaluations hydrologiques détaillées spécifiques au site basées sur des paramètres climatiques futurs. Ainsi, un professionnel pourrait utiliser des procédures classiques d'estimation du débit de pointe, comme l'analyse de fréquence par station unique ou des approches régionales, et appliquer un facteur de changement delta pour remédier aux répercussions des changements climatiques. Les valeurs élaborées seraient conservatrices du point de vue de la

conception des ponts et fourniraient des estimations du débit de pointe plus extrêmes que celles qui pourraient découler d'une analyse hydrologique complète spécifique au site. Les facteurs d'ajustement ne devraient en aucun cas réduire les débits de pointe nominaux dans les estimations actuelles, même si les prévisions indiquent une diminution du débit de pointe. On reconnaît ainsi qu'il faut qu'une structure de pont soit conçue pour répondre aux conditions actuelles ainsi qu'aux conditions qui peuvent se présenter tout au long de sa durée de vie.

Étant donné les efforts importants requis pour élaborer un jeu de données national sur les courbes de limite et les facteurs de changement delta, **le présent rapport vise à étudier les approches potentielles et à formuler des recommandations pour contribuer à l'élaboration d'un tel jeu de données dans le cadre d'un projet futur.** L'élaboration d'un jeu de données national sur les courbes de limite et les facteurs de changement delta (l'« initiative ») dépasse la portée du présent rapport.

2 Étude de l'estimation du débit de pointe à l'échelle du Canada

Afin de comprendre l'état actuel de la pratique et des connaissances relatives à l'estimation du débit de pointe à l'échelle du Canada, ainsi que la façon dont les répercussions des changements climatiques sont prises en compte (le cas échéant), la recherche comprenait une analyse de la documentation actuelle, un examen des investissements en recherche et développement en plus d'un sondage auprès des professionnels et des organismes concernés par l'estimation du débit de pointe en tenant compte du climat à l'échelle du pays. Les principales conclusions sont traitées à la section 2 du présent rapport, et les recommandations liées à l'initiative sont présentées et traitées à la section 3.

2.1 Compréhension de l'état des changements climatiques à l'échelle du Canada

La documentation a démontré qu'approximativement entre la moitié et le tiers de la superficie du Canada a été modélisé dans diverses études [7], [8], étendue à partir de laquelle il peut être possible d'estimer des débits de pointe pour les bassins hydrographiques soumis

aux changements climatiques pour différents quantiles extrêmes allant d'une période de récurrence¹ (PR) de 100 ans (probabilité annuelle de dépassement, PAD = 0,01) à 10 000 ans (PAD = 0,0001). Plusieurs études utilisent les bassins de l'étude CANOPEX, ou *Canadian Model Parameter Experiment*, (686 bassins) [9] et les grands ensembles climatiques (GEC) pour effectuer climatiques. Chaque étude est limitée par l'utilisation de ses propres modèles, ensembles climatiques, scénarios d'émissions, techniques de correction de biais et jeux de données, ainsi que par des méthodes de modélisation qui ne sont pas directement comparables d'un bassin à l'autre. Par conséquent, ce rapport extrait les leçons méthodologiques de ces études pour compiler les pratiques exemplaires et les leçons tirées, comme le présente cette section.

2.1.1 Compréhension de l'état des changements climatiques à l'échelle du Canada

Depuis 2014, le gouvernement canadien a investi dans plusieurs rapports, cadres et analyses pour résumer les répercussions des changements climatiques sur le territoire et le milieu biotique du Canada. Par exemple, dans le *Rapport sur le climat changeant du Canada, un examen approfondi des changements climatiques au Canada* [8] est effectué et résumé en accordant une grande certitude à un réchauffement continu et à une augmentation des précipitations, bien qu'avec des valeurs et une certitude variables à travers le Canada. En matière d'hydrologie, il est fort certain que des pénuries d'eau plus fréquentes et plus sévères se produisent durant les mois d'été et que les débits augmentent en hiver avec des pics printaniers plus hâtifs. Le rapport indique que « le taux et l'ampleur des changements climatiques dans le cas d'un scénario d'émissions élevées par rapport à un scénario de faibles émissions prévoient deux futurs très différents pour le Canada », notant les « effets profonds » dans les scénarios d'émissions de carbone élevées et la probabilité plus faible d'atteindre des scénarios d'émissions plus faibles, ce qui exigerait que le Canada et le reste du monde atteignent des émissions de carbone presque nulles au début de la seconde moitié du 21^e siècle [10]. Depuis 2019, la communauté mondiale a continué de suivre des trajectoires d'émissions moyennes à élevées, avec un réchauffement planétaire moyen qui devrait dépasser

¹ La période de récurrence (PR) et la probabilité annuelle de dépassement (PAD) sont interchangeable [avec PR = 1/PAD]. Ce dernier terme est préférable pour souligner le risque continu chaque année et est souvent exprimé en pourcentage.

2,0 °C au 21^e siècle par rapport aux niveaux préindustriels [10]. Les données qui sous-tendent le *Rapport sur le climat changeant du Canada* sont disponibles sur une interface Web (DonneesClimatiques.ca) et dans la base de données *Données et scénarios climatiques canadiens* [11], ainsi qu'un soutien pour la planification de l'atténuation et de l'adaptation à l'intention des professionnels grâce au Centre canadien des services climatiques. Des banques de données internationales similaires destinées à l'analyse mondiale et servant aux évaluations du GIEC sont fournies par le Service Copernicus concernant le changement climatique [12].

À partir des données et des rapports, de manière générale, on accepte maintenant avec un degré d'accord élevé que le climat du Canada s'est réchauffé depuis 1948 et continuera de le faire tout au long du 21^e siècle [8]. Il y a également consensus selon lequel les précipitations augmenteront dans la plupart des régions du Canada, bien que les modèles ne soient pas unanimes quant à la quantité et au calendrier de ces augmentations [8], [13]. Cela se traduira par une augmentation du ruissellement pour de nombreuses rivières au Canada avec des pics de fonte des neiges prématurés (des printemps plus chauds) et une augmentation du nombre et de la fréquence des événements en termes de débit de pointe causés par les précipitations [14], [15]. Cependant, dans l'ensemble des Prairies, de nombreux modèles prévoient une réduction du ruissellement pendant l'été et au début de l'automne en raison de l'augmentation des pertes par évapotranspiration dans les bassins des Prairies à faible débit [16]. De plus, de nombreux bassins hydrographiques canadiens peuvent connaître une réduction des débits de pointe à l'avenir en raison de la diminution du manteau neigeux, les pointes de crue nivale étant moindres et arrivant plus tôt dans la saison. Cela serait dû à des précipitations plus importantes sous forme de pluie plutôt que de neige au cours de la période historique d'accumulation de neige. Il sera donc important pour les professionnels de déterminer si les débits de pointe les plus élevés se produisent au cours des périodes actuelles ou futures pendant la durée de vie nominale d'une structure de pont.

2.1.2 Évaluation des changements climatiques au Canada

Plusieurs initiatives importantes à l'échelle du Canada ont été entreprises pour documenter et comprendre l'état actuel du climat canadien et les changements prévus [8], ainsi que les progrès en matière de diffusion

et de disponibilité des données [12], [17], [18]. Le GIEC est l'autorité internationale chargée de résumer les évaluations des changements climatiques, et il suit les publications du Programme mondial de recherche sur le climat (PMRC) par rapport aux expériences du projet d'intercomparaison des modèles couplés (CMIP), qui fournissent différentes générations d'ensembles multimodèles utilisés partout dans le monde pour évaluer les changements climatiques. Au moment de la rédaction de ce rapport, le CMIP6 était la version la plus récente [19].

Le climat futur est très incertain en raison des différents modèles climatiques mondiaux (MCM), de la variabilité interne et des scénarios d'émissions (p. ex., les SSP ou les RCP). Chaque modèle climatique comporte un degré d'incertitude qui découle de sa structure (c.-à-d. l'algorithme, la solution numérique, la structure en grille, le paramétrage) et de la réponse qui résulte du forçage radiatif externe. Pour gérer l'incertitude structurelle, le CMIP comprend une vaste sélection de MCM provenant des divers instituts climatiques qui contribuent aux expériences. L'incertitude liée à la variabilité interne du climat est généralement abordée en augmentant la taille de l'ensemble au moyen de multiples réalisations des conditions initiales du modèle. Pour remédier à l'incertitude liée aux émissions futures, chaque modèle simule une variété de SSP (ou RCP) qui représentent une gamme de forçages de concentration des gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère entraînant, à l'échelle mondiale, diverses trajectoires pour les impacts des changements climatiques, y compris les précipitations, la température et d'autres variables (p. ex., débit des cours d'eau).

Le traitement des données climatiques aux fins d'utilisation dans les simulations des modèles d'impact augmente l'incertitude. La résolution plus grossière des MCM (c.-à-d. à l'échelle mondiale) signifie qu'ils peuvent ne pas représenter adéquatement la zone d'intérêt. Par conséquent, il est souvent avantageux de raffiner leur résolution en réduisant l'échelle pour améliorer le lien entre les changements atmosphériques et les processus au sol. Cette procédure génère un résultat du modèle climatique régional (MCR), si la réduction d'échelle utilise un modèle physique pour atteindre la résolution plus élevée au lieu d'une méthode statistique de réduction d'échelle statistique [15]. Quelle que soit la méthode de réduction d'échelle, la correction de biais est nécessaire pour améliorer la représentation des MCM relativement aux processus climatiques à l'échelle locale

et aux interrelations entre les différentes variables (p. ex., température et précipitations) [20]. Selon la méthode de réduction d'échelle et les procédures de correction de biais retenus, il y aura des différences allant de légères à importantes dans les résultats [21], et cette incertitude supplémentaire serait maintenue si la méthode était ensuite utilisée pour les études hydrologiques et l'évaluation du débit de pointe.

Si le résultat prévu du processus d'évaluation climatique est une variable hydrologique (p. ex., débit de pointe), les données de simulation du modèle climatique sont généralement transmises dans un modèle hydrologique du bassin hydrographique. Cela établit une chaîne de modélisation, où chaque étape introduit sa propre incertitude interne et structurelle dans l'incertitude globale ou totale [22], [23], [24]. À ceci s'ajoute le paramétrage, ou le processus de détermination des « constantes » des équations internes, physiques ou conceptuelles à chaque étape de la chaîne de modélisation [25], [26].

Ceci soulève la question de la fiabilité des études de modélisation dans l'évaluation des répercussions climatiques et de la confiance qu'elles suscitent. Comment pourrait-on avoir confiance dans les prévisions avec cette forte incertitude ? La note d'orientation AR5 du GIEC fournit une directive sur le traitement uniforme de l'incertitude parmi les projections des modèles climatiques et suggère une matrice qualitative à quantitative (probabiliste) fondée sur le niveau d'accord parmi les différents modèles [27]. Un autre guide à l'intention des professionnels est fourni dans le rapport *Bâtiments et infrastructures publiques de base résistants aux changements climatiques* d'Environnement et Changement climatique Canada (ECCC), qui attribue des niveaux de confiance (1, 2, ou 3) définis comme le « niveau de confiance [qui] peut être placé dans les évaluations de facteurs quantitatifs pour des variables climatiques nominales particulières » [28], [29]. De plus, le rapport *Climate Change 2021: The Physical Science Basis* du GIEC fournit des conseils pour cartographier les changements prévus et démêler le rapport « signal/bruit » dans les modèles climatiques [30]. Ces documents, ainsi que les recommandations présentées à la section 3 du présent rapport, fournissent des conseils utiles pour éclairer la prise de décision dans le cadre de l'évaluation du débit de conception dans un contexte de changements climatiques.

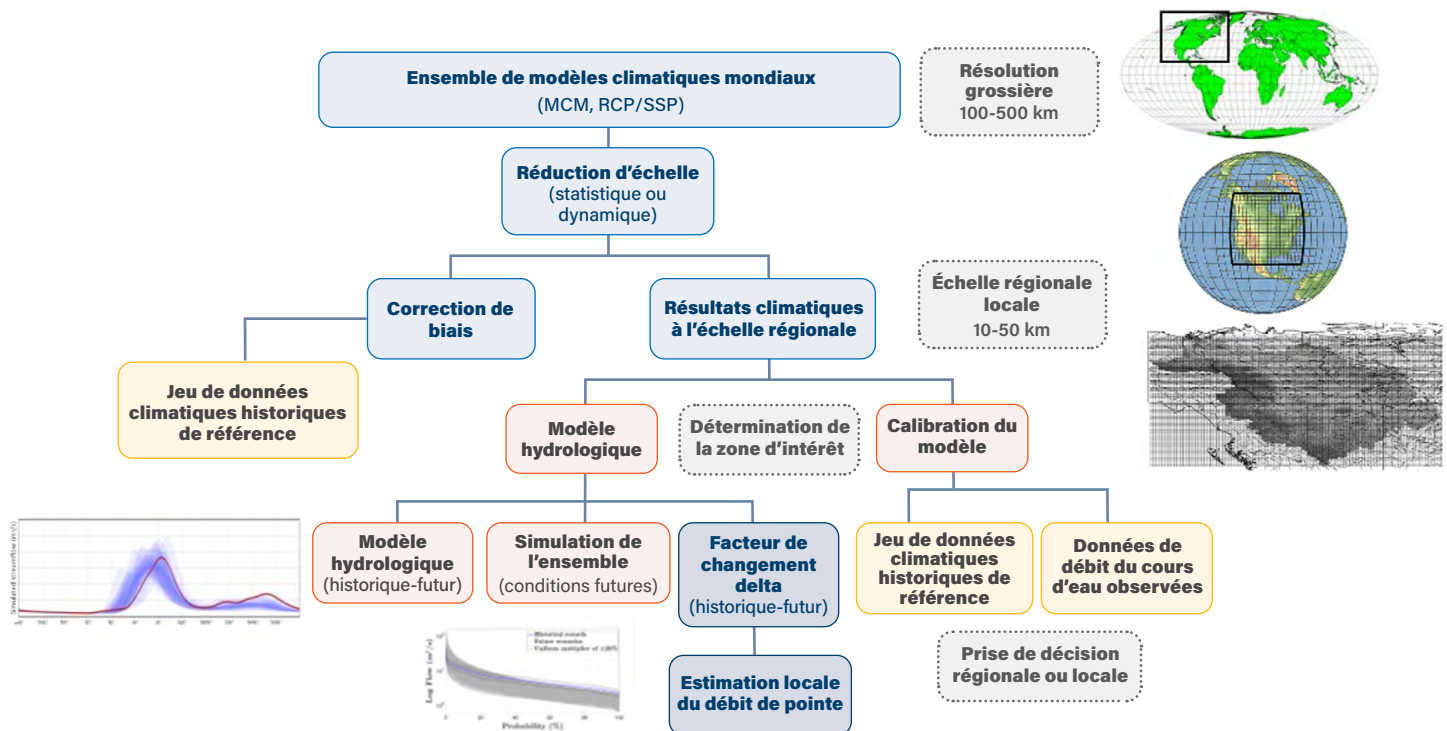
2.1.3 Pratique exemplaire en matière d'évaluation de l'impact des changements climatiques

Cet examen des pratiques exemplaires liées à l'évaluation de l'impact des changements climatiques a été effectué pour déterminer les répercussions potentielles des changements climatiques sur la réponse hydrologique des bassins hydrographiques dans diverses régions du Canada, ainsi que les répercussions potentielles sur le débit de pointe. Les répercussions nettes des changements climatiques sur le débit de pointe sont particulièrement intéressantes, tandis que le moment et le volume du débit des cours d'eau sont d'intérêt général. Les pratiques exemplaires actuelles s'accordent sur plusieurs éléments clés des évaluations de l'impact des changements climatiques, comme cela est décrit dans un rapport du Conseil national de recherches Canada (CNRC), lequel a également fourni une feuille de route initiale pour les études sur l'impact des changements climatiques relative aux besoins de cartographier les plaines inondables qui comprennent des éléments hydrologiques et hydrauliques [31].

Les éléments de base des évaluations hydrologiques dans un contexte de changements climatiques sont représentés par les différentes cases de couleur dans la figure 1. La couleur bleue indique les étapes de sélection et de préparation de l'ensemble de modèles climatiques à partir des MCM, la couleur rouge représente les composantes de la modélisation hydrologique et la couleur bleu foncé représente les résultats de l'analyse (c.-à-d. l'évaluation de l'incidence locale sur le débit de pointe). Enfin, la couleur jaune représente l'application ou le besoin de référence (c.-à-d. les jeux de données historiques). Les pratiques exemplaires figurant dans la documentation pour chacun des éléments suivants sont décrites dans les sections 2.1.3.1 à 2.1.3.5.

2.1.3.1 Sélection de l'ensemble de modèles climatiques

Les modèles climatiques sont des représentations numériques du monde physique et de l'atmosphère. Ils sont complexes et conçus pour représenter les changements climatiques à long terme, y compris la variabilité climatique en situation d'incertitude. Les simulations des modèles climatiques sont étalonnées (c.-à-d. que le biais est corrigé) pour représenter les

Figure 1 : Éléments clés d'une évaluation de l'impact des changements climatiques (d'après [31]).

paramètres statistiques de la distribution du climat historique, et non les séries chronologiques enregistrées (c.-à-d. la séquence des événements) [30]. De cette façon, elles ne peuvent pas être comparées directement aux observations historiques, mais plutôt aux propriétés de distribution statistique des observations historiques (c.-à-d. les moments de la distribution : moyenne, variance, distribution asymétrique et aplatissement). Lors de la sélection d'un ensemble de modèles climatiques, il faut prendre en compte les facteurs importants suivants, qui aident à encadrer les diverses composantes contribuant à l'incertitude [30] :

- L'incertitude structurelle du modèle;
- L'incertitude des scénarios climatiques;
- La variabilité naturelle et/ou interne.

La sélection du modèle climatique pour les études d'impact devrait utiliser un sous-ensemble de données provenant de l'ensemble du CMIP le plus récent afin de tirer parti des progrès les plus récents dans les modèles de système climatique et terrestre, ce qui offre une résolution et une précision accrues pour représenter

les processus atmosphériques ainsi que ceux au sol. La sélection des modèles climatiques devrait tenir compte de la portée géographique du projet et éliminer tous les modèles qui sont connus pour produire une réponse climatique transitoire irréaliste en fonction des concentrations de GES (appelés « modèles chauds ») [32].

L'incertitude dans la modélisation climatique résulte des différences dans les équations numériques, des paramètres qui contrôlent ces équations et des conditions initiales et limites précisées parmi et dans les différents MCM. Différents RCP ou SSP représentent la capacité de la société à atténuer la crise climatique en réduisant les émissions de GES ou en atténuant leurs effets nuisibles grâce à l'innovation technologique. Puisqu'il n'existe pas de modèle (MCM) idéal et que la trajectoire future des émissions est inconnue, une sélection de scénarios d'émissions est généralement appliquée à plusieurs MCM pour représenter différents forçages climatiques ainsi que la gamme de résultats possibles. Malgré le fait que cette approche demande un calcul intensif pour de vastes étendues, elle permet d'intégrer une marge d'incertitude ou une étendue

des prévisions plus grande [28]. Autrement, plutôt que de préciser les scénarios d'émissions, la pratique actuelle en matière de modélisation climatique favorise la spécification d'un seuil de réchauffement (c.-à-d. une augmentation de la TMM en degrés Celsius) indépendamment du moment où cela est prévu. Cette approche permet une comparaison plus directe des résultats actuels et futurs, le scénario d'émissions étant implicitement représenté.

Pour une région précise du Canada, s'il existe des renseignements qui mettent en corrélation l'horizon temporel avec lequel un changement de température correspondant est prévu dans des SSP ou des RCP précis, il peut donc ne pas être nécessaire d'inclure de multiples scénarios d'émissions dans une étude. Dans ce cas, des scénarios d'émissions particuliers et des seuils de température correspondants harmonisés avec la durée de vie nominale de 75 ans d'un pont pourraient constituer la base de l'analyse. Par exemple, comme le montre le tableau 1, l'utilisation des données du RCP 6.0 du CMIP5 par rapport à la référence préindustrielle entraînerait une augmentation d'environ 2 °C de la TMM sur la durée de vie nominale de 75 ans d'une structure de pont.

Tableau 1. Variation de la température moyenne mondiale par rapport à la période initiale de 1987 à 2016 (données basées sur le CMIP5 et calculées à partir de KNMI Climate Explorer [27]). La reproduction du tableau est une copie de la version disponible à l'adresse [<https://scenarios-climatiques.canada.ca/index.php?page=buildings-report>].

ΔT	RCP 8,5	RCP 6,0	RCP 4,5	RCP 2,6
+0,5°C	2023			
+1,0°C	2035	2046		—
+1,5°C	2047	2070		—
+2,0°C	2059	2087	—	—
+2,5°C	2069	—	—	—
+3,0°C	2080	—	—	—
+3,5°C	2090	—	—	—

La variabilité interne pourrait être représentée et encadrée en incluant des initialisations suffisamment importantes du même MCM. L'utilisation de grands ensembles de conditions initiales à modèle unique (SMILE) permet d'effectuer une analyse de fréquence

des crues sur un grand jeu de données résultant de plusieurs réalisations [33] du même modèle. Cependant, comme un SMILE est élaboré avec des conditions initiales et limites différentes à partir d'un seul MCM, il se traduit par une gamme plus étroite de réactions climatiques et hydrologiques comparativement à un GE composé de plusieurs MCM et scénarios d'émissions. Il faut que la sélection d'un SMILE dans le cadre d'un flux de travail relatif à l'évaluation d'impact confirme que l'utilisation d'un seul MCM et d'un seul scénario d'émissions convient à l'objectif déclaré [33]. En fin de compte, un GE composé de plusieurs MCM et de conditions initiales et limites permettrait d'intégrer une plus grande gamme de résultats possibles, y compris les extrêmes qui auraient une influence sur les estimations du débit de pointe [34]. Une étude de 2015 de Cannon et coll. [35] expose diverses considérations relatives à la sélection des ensembles.

2.1.3.2 Sélection des méthodes de réduction d'échelle et de correction de biais

La réduction d'échelle et la correction de biais des MCM sont généralement nécessaires dans les études hydrologiques en raison du décalage de la résolution grossière des MCM (c.-à-d. l'échelle mondiale) par rapport à la plus fine échelle des interactions hydrologiques. L'estimation du débit de pointe spécifique au site exige une résolution plus élevée du modèle hydrologique, à la fois dans le temps et dans l'espace. Souvent, un MCR est utilisé pour réduire dynamiquement (c.-à-d. un modèle numérique) le MCM [36], mais des méthodes statistiques pourraient également être utilisées [37]. Bien que le choix de l'approche ait une incidence sur les résultats globaux, l'incertitude de la réduction d'échelle et de la correction de biais est généralement comprise dans l'enveloppe d'incertitude plus large générée par l'ensemble de MCM [38]. L'uniformité de la méthodologie est essentielle pour assurer une prise en compte adéquate de techniques fiables pour la correction de biais, des limites de calcul et de l'uniformité des données utilisées pour la correction de biais elle-même (c.-à-d. qu'elles devraient être cohérentes avec les données utilisées pour étalonner le modèle hydrologique). Le lien direct entre les changements de température et de précipitations résultant de la relation de Clausius-Clapeyron et, si possible, une correction multivariée (c.-à-d. une correction simultanée et uniforme de la température et des précipitations du MCM) devraient également être effectués pour préserver la corrélation entre les variables [39], [40].



« Étant donné que les mécanismes dominants de génération des crues varient d'une région à l'autre, le choix d'un modèle hydrologique aura une incidence importante sur le rendement et la capacité de représenter la réponse hydrologique dans certaines régions du Canada. »

Malgré le fait que la réduction d'échelle dynamique puisse être la plus précise sur le plan physique, elle n'est généralement pas possible pour de vastes étendues (c.-à-d. l'ensemble du Canada) sans un important investissement en informatique. Pour réduire la demande informatique, certaines études ne considèrent qu'un seul MCM ou un seul scénario (SSP ou RCP, c.-à-d. des SMILE). Par exemple, l'ensemble ClimEx [41] est un ensemble de 50 membres du MCR canadien, version 5 (CRCM5), dans une grille de 10 km sur 10 km au-dessus du nord-est de l'Amérique du Nord, qui a utilisé le modèle canadien du système terrestre (CanESM2) comme MCM conducteur. Il est possible d'effectuer une comparaison de différents MCR ou GE dont l'échelle est réduite dynamiquement pour améliorer la compréhension de l'incidence de la réduction d'échelle des superficies mondiales aux régionales. Cependant, en raison de la demande informatique importante, la réduction statistique est utilisée plus souvent pour les ensembles du CMIP sur de vastes étendues. Au Canada, il existe plusieurs banques de scénarios du CMIP6 dont l'échelle est réduite statistiquement et qui sont disponibles à l'échelle du Canada [17], [42], [43], ainsi que de nouvelles initiatives en cours d'élaboration (voir la section 2.2.3).

Il existe de nombreuses techniques de correction de biais qui sont appliquées dans les études d'évaluation des répercussions hydrologiques [44]. La méthode la plus courante est la cartographie par quantiles des variations annuelles ou saisonnières pour les variables d'intérêt [13], [35], [45]. Il est important d'appliquer des techniques de correction de biais multivariée qui tiennent compte des changements non indépendants de la température et des précipitations, comme la correction de biais multivariée de la cartographie par quantiles de Cannon [45] ou la

correction de biais pour les précipitations de Rajulapati et Papalexioiu [40]. Le problème le plus important de la chaîne de modélisation hydrologique est la préservation de la structure de corrélation des températures et des précipitations. Toutefois, si un modèle hydrologique nécessite des variables d'entrée supplémentaires (p. ex., le vent et le rayonnement solaire), toutes ces variables devraient être incluses dans la correction de biais. L'ERA5 est une bonne source de données d'observation qui comprend des variables concordant avec les modèles climatiques, mais elle peut ne pas être le meilleur choix pour l'étalonnage hydrologique du modèle [46], et il faut que ce dernier tienne compte de la résolution du jeu de données de référence. Le jeu de données climatiques de référence utilisé pour la correction de biais devrait être proportionnel (c.-à-d. le même ou ayant la même structure statistique) à celui utilisé pour l'étalonnage du modèle hydrologique pour assurer l'uniformité. On a démontré que les données de l'ERA5 correspondent à un grand nombre de jeux de données de réanalyse utilisés partout au Canada [47], [48], [49]. Dans le cadre de l'initiative, les données de l'Analyse régionale déterministe de précipitations (ARDP) canadienne, fondées sur le Système canadien d'analyse des précipitations (CaPA) développé par ECCC, peuvent être un jeu de données approprié [50].

Malgré le fait que les méthodes de correction de biais puissent avoir une incidence plus faible sur les études d'impact climatique à plusieurs modèles que d'autres incertitudes [38], elles ont probablement des répercussions plus importantes lors de l'évaluation des événements extrêmes. Ceci est particulièrement vrai pour les bassins hydrographiques avec des extrêmes climatiques ou hydrologiques changeants et des processus de génération de débit [51], [52], [53].

2.1.3.3 Sélection, configuration et étalonnage du modèle hydrologique

La sélection du modèle hydrologique est un choix essentiel qui aura une incidence sur le résultat de l'évaluation du débit de pointe [51], [54]. Étant donné que les mécanismes dominants de génération des crues varient d'une région à l'autre [55], le choix d'un modèle hydrologique aura une incidence importante sur le rendement et la capacité de représenter la réponse hydrologique dans certaines régions du Canada. Par conséquent, il est peu probable qu'un modèle unique soit le bon choix pour l'ensemble du Canada. Un facteur clé dans la sélection du modèle est de s'assurer que la structure du modèle représente la gamme des processus hydrologiques ainsi que tous les mécanismes dominants de génération des crues. La configuration et l'étalonnage du modèle devraient permettre de s'assurer que tous les processus dominants de génération des crues qui se retrouvent partout au Canada (p. ex., température, précipitations, accumulation et fonte des neiges, glaciers, etc.) sont inclus.

Bien qu'elles soient beaucoup plus exigeantes sur le plan informatique, certaines des études examinées comprennent plusieurs modèles hydrologiques [22], [56], [57] semblables aux recommandations du GIEC pour les prévisions climatiques (c.-à-d. un ensemble de modèles). Cependant, la pratique actuelle consiste généralement à sélectionner le modèle hydrologique le plus performant, étalonné et validé au cours de la période historique [58]. Il est important d'établir des valeurs repères de simulation ou de rendement pour évaluer le comportement acceptable du modèle [59], [60]. La résolution du jeu de données climatiques de référence devrait être alignée sur l'unité de calcul de base du modèle hydrologique (c.-à-d. la résolution du modèle), bien que la structure de l'unité de calcul de base (p. ex., sous-bassin ou grille) ne soit pas aussi importante.

Une gamme de modèles hydrologiques a démontré le succès des évaluations hydrologiques pour diverses régions du Canada, y compris les modèles SWAT, MESH, VIC, HYDROTEL, CRM, SAC, WATFLOOD, HYPE, des méthodes d'apprentissage automatique (mémoire à long et à court terme, MLCT) et bien d'autres [22], [57], [61] à [70]. Le cadre de modélisation hydrologique Raven a également été adopté dans plusieurs études en raison de sa structure de modèle souple et de sa capacité à effectuer des évaluations de l'incertitude structurelle du modèle [71].

Les délimitations de sous-bassins élaborées antérieurement et dotées de réseaux de drainage conditionnés sur le plan hydrologique sont disponibles par l'intermédiaire d'organismes comme l'United States Geological Survey (USGS, institut d'études géologiques des États-Unis) sous forme de bases de données telles que HydroSHEDS [72] et MERIT Hydro [73]. Les autres données hydrologiques nécessaires pour définir le domaine de l'étude comprennent un modèle d'élévation numérique, des données sur la couverture terrestre, des données de classification du sol et l'hydrographie (c.-à-d. les couches géotextiles). Il existe plusieurs bases et jeux de données généraux sur la couverture terrestre et les sols qui sont élaborés à partir de données saisies à distance et qui sont couramment utilisés dans le contexte hydrologique, comme ceux produits par l'Agence spatiale européenne [74] et la NASA [75]. Il est important de tenir compte de l'échelle spatiale (résolution) de l'unité de calcul de base pour le modèle hydrologique lors de la sélection du géotextile.

La méthode de routage hydrologique utilisée par le modèle pour traduire les crues dans le débit du cours d'eau est une autre considération clé. Les méthodes de routage sont particulièrement importantes pour les études examinant le débit de pointe, car le débit du cours d'eau dirigé générera les événements de débit extrême (p. ex., Q95, ou le quantile supérieur, le moment et l'ampleur) [76]. Le débit régularisé par des réservoirs, des barrages, des évacuateurs de crues et des déviations qui modifient la trajectoire ou le routage des débits aura également une incidence importante sur la réponse quant au débit de pointe. Il est donc important de limiter l'étalonnage du modèle aux bassins hydrographiques naturels ou ayant subi des modifications minimales en raison des erreurs qui pourraient résulter d'interventions sur un débit non stationnaire dans des systèmes gérés. L'inclusion de systèmes régularisés pourrait être absorbée par les paramètres du modèle au cours de l'étalonnage si ces structures ou ces modifications du routage du débit ne sont pas mathématiquement représentées dans le modèle lui-même [77].

Pour étalonner les modèles hydrologiques des systèmes régularisés, les données de référence doivent être naturalisées (c.-à-d. que la résultante de la gestion de l'eau doit être éliminée) ou les installations de gestion de l'eau et leurs régimes d'exploitation historiques doivent être inclus dans chaque bassin hydrographique modélisé. De plus, pour simuler des périodes régularisées historiques et futures dans l'élaboration des courbes de limite et

des facteurs de changement delta, il faudrait également concevoir et modéliser la mise en œuvre potentielle des régimes d'exploitation historiques et futurs des installations de gestion de l'eau. Cela peut être vu comme irréalisable dans le contexte de l'initiative actuelle, mais pourrait être une entreprise utile à l'avenir.

Dans certaines études réalisées sur une vaste étendue spatiale (c.-à-d. continentale ou mondiale), le regroupement des résultats des modèles a été effectué comme étape de post-traitement pour simplifier les résultats des zones hydrologiques similaires. Cela a supprimé ou réduit les effets de la régionalisation des données d'entrée des modèles à une échelle de calcul spécifique [78], ainsi que l'hétérogénéité et les erreurs à l'échelle locale inhérentes aux modèles de distribution. Cependant, l'utilisation de ces résultats régionalisés pour obtenir des données de sortie pour le débit d'un cours d'eau (c.-à-d. $\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$) peut présenter plusieurs inconvénients, y compris une attention moindre aux considérations hydrologiques spécifiques au bassin hydrographique et une dépendance à des valeurs absolues plutôt qu'à des indications de l'ampleur et de la direction des changements du débit de pointe résultant des changements climatiques.

2.1.3.4 Jeux de données historiques de référence

Un jeu de données climatiques historiques de référence est nécessaire pour la chaîne de modélisation afin de soutenir la correction de biais pour les variables du MCM de manière à représenter adéquatement la distribution des valeurs historiques observées, et il pourrait également être utilisé pour l'étalonnage des modèles hydrologiques. Il faut que le jeu de données historiques de référence soit une série chronologique complète sans lacunes, qui représente, au minimum, les valeurs des températures et des précipitations. Des jeux de données de réanalyse qui fournissent des données observées adaptées à la résolution du modèle ont été élaborés à cette fin [13]. Dans les études canadiennes, il est particulièrement important que les phases des précipitations (c.-à-d. la pluie et la neige) soient adéquatement représentées dans le jeu de données historiques [49].

L'ERA5/ERA5-Land fournit un jeu de données de réanalyse efficace pour l'étalonnage des modèles hydrologiques [79]. L'ERA5 fournit les mêmes variables que les modèles climatiques, de sorte qu'il est bien adapté pour l'étape de correction de biais du MCM/MCR,

et il a été démontré qu'il est compatible avec d'autres réanalyses mondiales et nord-américaines utilisées pour la modélisation hydrologique, ou qu'il en forme la base [47], [49]. Le jeu de données de l'ARDP d'ECCC peut également convenir à cette fin [50].

Le réseau hydrométrique des Relevés hydrologiques du Canada fournit des données historiques sur les débits de cours d'eau à certains endroits du pays [80] et il offre une source importante de données à partir desquelles il est possible d'étalonner les débits dirigés aux emplacements de mesure. Les données hydrométriques des bassins hydrographiques transfrontaliers peuvent également être requises par l'USGS. Les données canadiennes et américaines contribuent au Système mondial d'observation du cycle hydrologique (WHYCOS), un réseau mondial d'observations hydrométriques dans le cadre de l'initiative HydroHub de l'Organisation météorologique mondiale [81].

2.1.3.5 Évaluation de l'impact local ou régional

L'un des principaux problèmes des évaluations actuelles de l'impact des changements climatiques est que l'intervalle de temps signalé de l'ensemble climatique est rarement plus court qu'une journée. Malgré le fait que les modèles de routage hydrologique simulant des conditions historiques pourraient inclure des intervalles de temps plus courts qu'une journée, les modèles forcés à partir de jeux de données climatiques à échelle réduite seraient soumis à la même résolution plus grossière que les modèles climatiques. L'intervalle de temps journalier qui en résulte est, dans bien des cas, trop grossier pour l'estimation du débit de pointe dans la conception d'un pont. Une intervention plus poussée du professionnel serait requise pour convertir les estimations du débit de pointe basées sur des valeurs quotidiennes à des estimations basées sur des valeurs instantanées [82]. Il existe des méthodes pour convertir les débits de pointe instantanés à partir des maximums quotidiens, mais ces approches reposent généralement sur des relations historiques. La ligne directrice sur la délimitation des risques d'inondation publiée en 2019 par Ressources naturelles Canada (RNCAN) précise que pour une jauge hydrométrique par site unique, la période de chevauchement entre les mesures du débit de pointe quotidien (Q_D) et instantané (Q_P) pourrait être utilisée pour estimer les variables a et b et prolonger un enregistrement du débit de pointe instantané [83] :

$$Q_p = aQ_d^b \quad (\text{Équation 1})$$

Des techniques d'apprentissage automatique peuvent également être utilisées pour aider la conversion des estimations quotidiennes du débit de pointe en estimations instantanées [78], [79].

2.1.4 Analyse de fréquence des crues

En général, une analyse de fréquence des crues (AFC) sert à déterminer la fréquence et l'ampleur des crues (ou des seuils de débit de pointe) dans des conditions hydrologiques stationnaires, et elle pourrait être appliquée aux conditions historiques enregistrées (observées), aux conditions historiques modélisées et aux conditions futures modélisées. La ligne directrice sur la délimitation des risques d'inondation de RNCAN définit « stationnaire » comme s'appliquant à la fois à l'aménagement du territoire et aux changements climatiques [83].

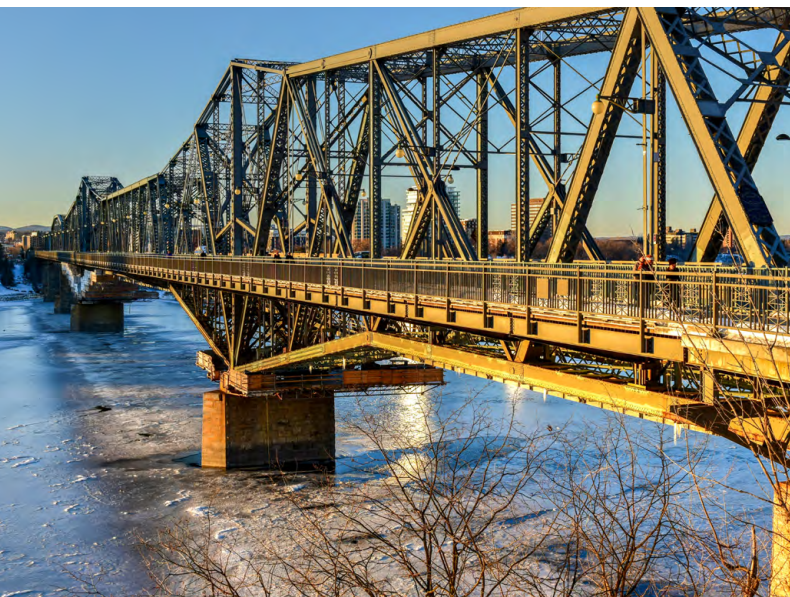
Si l'enregistrement complet des observations du débit ne représente pas adéquatement les queues de distribution (c.-à-d. les scénarios de débit extrême) ou s'il est trop court (moins de 10 ans selon [83]), une distribution des probabilités qui représente le mieux la distribution des données devrait être utilisée pour estimer statistiquement les valeurs extrêmes. Les distributions couramment utilisées pour l'AFC comprennent la distribution de Gumbel, log-normale, log-Pearson de type 3 (LP3) ou la loi d'extremum généralisée (LEG). La distribution choisie est ensuite adaptée aux données observées (ou modélisées) à l'aide de techniques statistiques, comme la méthode des moments ou l'estimation du maximum de vraisemblance, pour évaluer l'ajustement des moments de la distribution (moyenne, variance, distribution asymétrique et aplatissement). En général, les distributions LP3 et de la LEG sont les plus représentatives des enregistrements hydrométriques observés au Canada [84], [85], et elles sont conformes aux recommandations de la ligne directrice de RNCAN [83].

Dans un climat stationnaire, la période de récurrence ($T = 1/AEP$) pour diverses amplitudes de crue et les limites d'incertitude pourrait être déterminée à partir des enregistrements historiques, de la régionalisation des débits et de la modélisation des bassins hydrographiques. La ligne directrice de la délimitation des risques d'inondation de RNCAN énonce les recommandations et considérations suivantes pour l'AFC [83] :

- L'utilisation des débits de pointe instantanés est préférable au maximum quotidien ;
- La durée d'enregistrement préférée devrait être d'au moins $\frac{1}{2}T$, la durée d'enregistrement minimale étant de 10 ans aux fins de viabilité statistique [86] ;
- Les données relatives au débit de pointe manquantes devraient être renseignées à l'aide de techniques relationnelles ;
- Les données homogènes, comme celles ayant des mécanismes de génération des crues similaires (débit de crête généré par la neige ou la pluie) devraient être regroupées ;
- Les débits extrêmement élevés peuvent devoir être pris en compte séparément, dans le cadre d'une distribution différente ;
- Les enregistrements ayant une incidence importante sur l'aménagement du territoire et les changements à la gestion de l'eau (c.-à-d. non stationnaires) devraient être exclus ou naturalisés selon une base commune..

Il est important d'évaluer la stationnarité du débit du cours d'eau pendant les périodes d'analyse et, dans de nombreux cas, il peut être nécessaire de sélectionner une période plus courte pour éviter de briser l'hypothèse de stationnarité qui sous-tend les méthodes statistiques. Dans ces cas, des méthodes qui tiennent compte de la non-stationnarité dans l'AFC pourraient également être utilisées [87], [88], [89]. Les leçons tirées des publications et des applications relatives aux précipitations maximales probables suggèrent que la prise en compte des facteurs de composition générant des événements extrêmes est essentielle et que des données instantanées devraient être utilisées dans la mesure du possible pour générer de véritables maximums [90].

Le processus d'estimation des débits de pointe en un site nécessite généralement la réalisation d'une AFC des débits observés ou modélisés pour déterminer la crue selon une période de récurrence souhaitée (p. ex., PAD). Dans le cas d'une évaluation de l'impact des changements climatiques, une modélisation est nécessaire, et la compréhension de l'éventail des résultats potentiels nécessite l'utilisation d'ensembles de modèles. Par conséquent, les résultats sont généralement présentés sous forme de débits potentiels pour chaque PAD.



« Les méthodes présentées dans le rapport du CNRC, un rapport d'Ouranos et une étude menée par Gillett et coll. fournissent le plus de lignes directrices en matière de rigueur et de faisabilité pour de futures études ayant pour objectif de déterminer des courbes de limite à l'échelle du Canada aux fins de l'évaluation des débits de pointe. »

2.1.5 Considération de la non-stationnarité des changements climatiques

Avant que la modélisation hydrologique d'un bassin hydrographique en fonction du climat puisse commencer, il est essentiel que le modèle soit étalonné et comparé au débit du cours d'eau observé. Ces opérations sont généralement effectuées à l'aide d'un jeu de données historiques (c.-à-d. un jeu de données de réanalyse) correspondant à une période de référence et adapté à l'échelle du bassin hydrographique ainsi qu'à la résolution des scénarios climatiques. Les scénarios climatiques sont ensuite utilisés pour forcer le modèle hydrologique à produire une série chronologique continue qui chevauche la période de référence historique et qui se prolonge dans l'avenir.

La simulation est effectuée pour chaque membre de l'ensemble climatique, ce qui génère plusieurs réalisations représentant une gamme de conditions hydrologiques prévues. À partir de l'ensemble de modèles, les résultats historiques et futurs représentent une gamme de résultats possibles qui, dans leur intégralité, englobent la moyenne, la variabilité et l'incertitude associées aux valeurs de débit potentielles. Idéalement, l'AFC fondée sur la période historique observée pourrait correspondre à l'AFC en fonction des résultats historiques fondés sur le MCM en ce qui concerne au moins la moyenne et la variabilité de la distribution de l'AFC, ou les moments de la distribution [87].

Lorsqu'on envisage la fréquence des crues dans un climat non stationnaire, l'AFC devient fondamentalement dépendante du temps; des résultats d'AFC différents se manifesteront pour le même emplacement, selon

la période analysée [89]. Il est important de noter que les quantiles de crue doivent être estimés à partir d'un échantillon de données relatives au débit non stationnaire du cours d'eau, un processus pour lequel les outils de l'AFC classiques ne conviennent pas. Une approche courante pour résoudre ce problème est de diviser les données en blocs de temps (p. ex., périodes climatiques) et de supposer qu'au cours de chaque période, les données résultantes (c.-à-d. les débits de pointe) sont stationnaires (voir <https://donneesclimatiques.ca/interactive/pourquoi-faut-il-utiliser-au-minimum-30-ans-de-donnees/>). Cela permet à l'AFC d'être menée indépendamment au cours de chaque période climatique. L'inconvénient est que la taille de l'échantillon qui en résulte pourrait être petite (p. ex., $n = 30$ ans) si l'analyse est effectuée individuellement pour chaque membre de l'ensemble. La taille de l'échantillon pourrait être augmentée en regroupant les données entre les membres de l'ensemble mais, si chaque membre représente un modèle ou un scénario différent, les données peuvent ne pas être distribuées de façon identique. L'utilisation d'un SMILE résout ce problème grâce au regroupement de données dans un grand nombre de simulations, avec l'avantage supplémentaire que la taille de l'échantillon en résultant est généralement assez grande pour que des méthodes empiriques puissent être utilisées dans le but d'estimer les quantiles. En contrepartie, les résultats ne reflètent pas tous les éléments d'incertitude, comme l'incertitude structurelle du modèle et la gamme complète des futurs climatiques possibles.

Plusieurs autres options pourraient également être envisagées. Par exemple, l'utilisation d'un seuil de température à la place du temps pour définir la période

d'échantillonnage peut donner l'occasion de regrouper les données entre les modèles. Plus précisément, si l'amplitude du débit de pointe est mise à l'échelle avec la température de la même façon dans tous les modèles, la réponse au forçage climatique à chaque seuil de température sera donc indépendante du modèle et du scénario. Cette approche permettrait également de mesurer une plus grande plage d'incertitude en raison de la structure du modèle et des scénarios d'émissions. Toutefois, il faut que les lignes directrices en matière de conception des ponts tiennent compte de la durée de vie nominale de la structure et des débits de pointe possibles au cours de cette période, lesquels dépendent du scénario d'émissions.

Les approches de l'AFC non stationnaire pourraient également résoudre le problème de stationnarité, ce qui permettrait de regrouper un ensemble complet de prévisions issues de séries chronologiques dans une même analyse. Les paramètres de distribution utilisent le temps ou la variation de la température moyenne mondiale comme covariable, et les courbes de fréquence des crues pourraient être adaptées à chaque membre de l'ensemble à l'aide de la période complète d'enregistrement.

Il est important de noter que l'AFC pourrait être effectuée sur des jeux de données multiples pour estimer les débits de pointe dans des conditions futures et évaluer l'impact des changements climatiques sur les périodes d'intérêt ou par rapport au seuil de température. Autrement, pour comprendre l'ampleur et la direction du changement, la différence relative entre les débits de pointe dans des conditions historiques et futures pourrait être déterminée en fonction des quantiles sélectionnés.

En sélectionnant des incréments discrets pour l'augmentation de la TMM afin d'évaluer les futurs débits de pointe, les horizons temporels et les changements relatifs dans les débits de pointe pourraient être estimés, peu importe le moment où ils ont lieu. Cette approche est favorable, car elle permet de tenir compte de la conception adaptative à mesure que l'incertitude climatique est mieux comprise [85].

2.1.6 Pratique exemplaire en matière d'estimation du débit de pointe au Canada

Les méthodes présentées dans le rapport du CNRC [31], un rapport d'Ouranos [91] et une étude menée par Gillett et coll. [92] fournissent le plus de lignes directrices en matière de rigueur et de faisabilité pour de futures études

ayant pour objectif de déterminer des courbes de limite à l'échelle du Canada aux fins de l'évaluation des débits de pointe. Les rapports du CNRC et d'Ouranos établissent les méthodologies requises par les professionnels pour effectuer les évaluations de l'impact des changements climatiques [31], [91]. Un résumé des approches et des leçons tirées de chacune de ces études est présenté dans cette section.

Le rapport du CNRC a examiné les **inondations au Canada à des fins de planification et de conception** [31]. Son objectif était de réduire les répercussions des catastrophes naturelles au Canada en mettant l'accent sur les inondations. Le rapport a examiné des études nationales et internationales et fait le résumé d'une variété d'approches pour la modélisation des changements climatiques aux fins de l'analyse des plaines inondables. Un inventaire des approches est détaillé pour fournir un ensemble de lignes directrices et de recommandations aux professionnels du Canada. Les recommandations finales énumérées au chapitre 5 du rapport du CNRC ont constitué la base des éléments abordés dans ce rapport, y compris la portée de l'étude, les éléments du modèle climatique et la sélection des scénarios d'émissions, les horizons temporels aux fins d'analyse, les procédures de réduction d'échelle et de correction de biais ainsi que la chaîne de modélisation en aval (p. ex., considérations des modèles hydrologiques et hydrauliques).

L'étude d'Ouranos a été entreprise pour **estimer la fréquence des crues relativement à la sécurité des barrages**, estimation qui se prolonge jusqu'en 2100 [91]. Tout comme le rapport du CNRC, elle récapitule des éléments de procédure importants ou les mesures prises aux fins de l'AFC pour recueillir les estimations des débits de pointe sur lesquels le climat a une incidence, et ce, aux fins de la sécurité des barrages. Le post-traitement des résultats des modèles hydrologiques a été particulièrement important pour calculer les estimations et les débits de pointe de l'AFC. Le projet a été divisé en trois groupes de travail différents (WG1, WG2 et WG3). Dans le contexte de ce rapport de recherche, les résultats du WG1 sont particulièrement pertinents, car ils se veulent « suffisamment simples » pour les professionnels, mais quand même issus d'une solide méthodologie. Le WG1 a tenu compte de la mise à l'échelle des événements, des événements mixtes et des effets du routage ou du stockage ainsi que de l'atténuation ayant une incidence sur les bassins hydrographiques. Le groupe a utilisé une efficacité

de Kling-Gupta de 0,61 comme critère de rendement minimal du modèle pour l'inclusion des bassins hydrographiques, et il a appliqué deux GE (CanESM2-LE et le Modèle communautaire du système terrestre, CESM1-LE) pour le scénario RCP 8.5 dans le but d'exploiter un modèle hydrologique localisé GR4 à 5 paramètres. Il est important de noter que le scénario RCP 8.5 n'a pas toujours produit le débit de cours d'eau maximal en raison des changements du manteau neigeux. La distribution de la LEG a été utilisée (bien qu'un manque de concordance ait été noté) parce qu'elle était considérée comme la seule distribution qui pouvait fournir une extrapolation aux extremums non observés. Les maximums ont été calculés sur 20 blocs de 5 ans pour estimer les pointes de crue de 1000 ans et de 10 000 ans. Le rapport d'Ouranos fournit des directives sur les choix de l'AFC tirés des résultats de l'ensemble climatique présentés dans ce rapport.

L'étude de Gillett et coll. était une **analyse post-inondation** faisant suite à l'inondation de novembre 2021 qui a eu une incidence sur la vallée du Fraser, en Colombie-Britannique, menaçant la sécurité publique et causant des dommages importants aux systèmes agricoles, de transport et d'infrastructures, ainsi qu'aux moyens de subsistance des habitants de la région de la prairie Sumas [92]. Cette étude a été réalisée dans un délai strict (temps de calcul limité) pour fournir des lignes directrices en matière de rétablissement après une inondation. L'analyse du bassin hydrographique se limitait au ruissellement seulement (c.-à-d. que le routage hydrologique n'était pas considéré), à un modèle hydrologique unique (VIC) et aux bassins ayant des effets de régularisation ou de modification minimales (c.-à-d. correspondant à une couverture terrestre fixe). L'étude a utilisé le grand ensemble CanESM2-LE (50 membres, RCP 8.5) comme données de forçage dans le but d'évaluer les changements climatiques selon les courbes de durée du débit et les débits de pointe futurs prévus en raison du changement hydrologique entraîné par la variabilité climatique interne. Des valeurs de crue nominales ont été fournies pour les blocs de 30 ans suivants : 1961 à 1990, 2010 à 2039, 2040 à 2069 et 2070 à 2099.

2.1.7 Prise en compte de l'incertitude

Les effets cumulatifs de la chaîne de modélisation augmentent l'incertitude quant à l'estimation des débits de pointe dans un climat changeant. Les sources d'incertitude comprennent celles qui ont déjà fait l'objet d'une discussion dans la modélisation climatique :

incertitude structurelle, variabilité climatique interne et scénarios d'émissions [93]. D'autres incertitudes se retrouvent dans les modèles d'impact liés aux techniques de réduction d'échelle, à la correction de biais, à la sélection du modèle hydrologique, à la résolution du modèle (c.-à-d. temporelle et spatiale), aux sources de données du modèle hydrologique (c.-à-d. le géotextile) et à l'étalonnage ainsi qu'à la vérification du modèle. Bien que la quantification de la plupart de ces incertitudes soit possible, elle entraîne souvent l'augmentation de la vérification des données et de l'effort de calcul [94]. Par exemple, les modèles hydrologiques qui représentent des processus davantage physiques du bassin hydrographique peuvent améliorer la représentation des conditions hydrologiques variables qui existent à l'échelle du Canada, mais leur complexité nécessite souvent des paramètres supplémentaires du modèle pour représenter ces processus. Comme le montre la figure 2, le GIEC a introduit un cadre qualitatif pour signaler l'incertitude et évaluer la confiance globale dans les prévisions qui découlent des ensembles dans sa note d'orientation AR5, ce qui pourrait être particulièrement utile pour les professionnels. De cette façon, selon le nombre de scénarios (c.-à-d. la quantité de preuves) et la concordance entre les prévisions, une confiance relative pourrait être déterminée et transcrite dans une mesure de probabilité [27], [95]. Les méthodes du GIEC ont été retenues dans le *Rapport sur le climat changeant du Canada de 2019* [8]. De même, le rapport *Bâtiments et infrastructures publiques de base résistants au climat* a adopté une approche par niveaux (1, 2 ou 3) qui correspond à la confiance dans les prévisions [28].

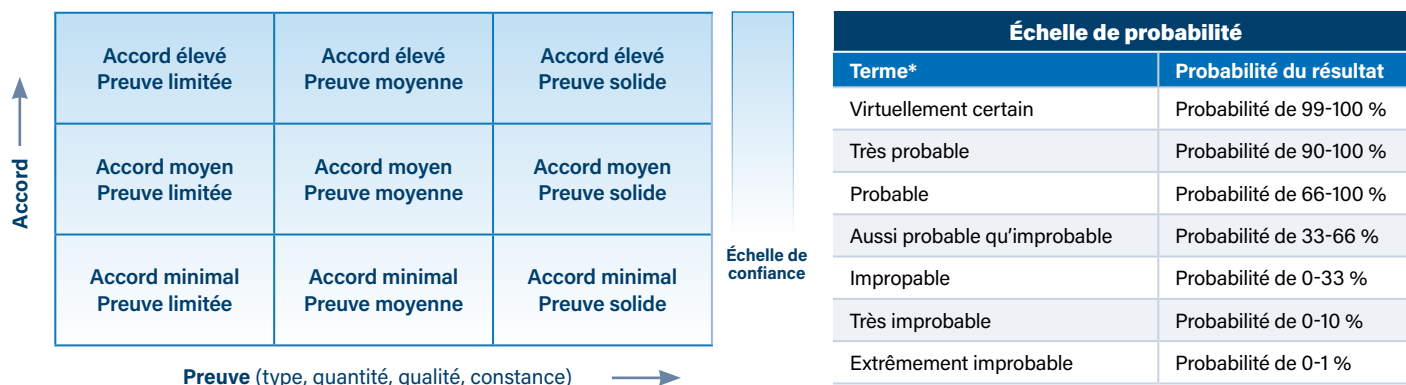
2.2 Activités de recherche pertinentes partout au Canada

En plus de l'analyse documentaire présentée à la section 2.1, un examen des initiatives de recherche existantes et des projets de recherche et développement à l'échelle du Canada a été effectué pour améliorer l'estimation du débit de pointe et la modélisation à l'échelle du Canada. Quatre initiatives d'intérêt ont été retenues et sont traitées dans les sections 2.2.1 à 2.2.4.

2.2.1 Programme d'identification et de cartographie des aléas d'inondation

Le Programme d'identification et de cartographie des aléas d'inondation (PICA) a été lancé en 2021 et est dirigé par RNCAN [96]. Il comporte deux éléments clés : l'élaboration d'outils de prédiction des inondations

Figure 2 : Évaluation du GIEC de plusieurs sources de preuves pour déterminer la confiance globale (a), qui pourrait ensuite être traduite en une échelle de probabilité (b) pour décrire l'incertitude quantifiée de la note AR5 [89]. Reproduction de [27], Agence européenne pour l'environnement.



(universitaire, Université de Calgary, chercheur principal : T. Stadnyk) et l'élaboration de cartes de plaines inondables (Ressources naturelles Canada et conseillers, contrats en sous-traitance). Le premier élément comprend la prévision du débit dans un climat changeant, ce qui est pertinent pour ce rapport, et comprend l'élaboration de ce qui suit :

- Un flux de travail normalisé pour les tendances non stationnaires et l'AFR;
- Un outil d'estimation du débit de pointe non stationnaire (influencé par les changements climatiques) à l'aide de méthodes de modélisation stochastiques qui utilisent un logiciel R libre.
- Notamment, un aspect clé du deuxième élément, soit l'élaboration de cartes des aléas d'inondation, repose sur la prédiction des débits de pointe dans diverses conditions hydrologiques, ce qui s'aligne sur les besoins ciblés dans ce rapport.

2.2.2 Boîte à outils d'analyse de fréquence régionale FloodNet

La boîte à outils d'analyse de fréquence régionale (AFR) FloodNet était un produit livrable du projet FloodNet du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG). La boîte à outils d'AFR est un script R libre disponible avec une interface utilisateur graphique spécialement conçue pour soutenir les ingénieurs et les professionnels dans la réalisation efficace d'AFR [97]. Les fonctionnalités comprennent l'analyse annuelle des maximums des débits de crue, les

analyses des dépassements de seuil (DS) et la prédiction sur les sites sans jaugeage. La boîte à outils d'AFR FloodNet comprend ce qui suit :

- Le logiciel gratuit pris en charge pour la communauté canadienne;
- Les courbes de limite, ou enveloppes d'incertitude, aux emplacements d'intérêt de l'AFR;
- L'applicabilité aux bassins hydrographiques sans station hydrométrique (c.-à-d. les bassins sans jaugeage);
- Les analyses statistiques des DS pour tenir compte des différents mécanismes de génération des crues [98].

Bien que la boîte à outils ne fournisse pas d'évaluation des débits de pointe ajustés en fonction du climat, elle est pertinente pour ce rapport, car elle comprend des approches normalisées pour l'AFR, une méthode efficace avec une interface utilisateur graphique et une plateforme potentielle pour évaluer les fréquences des débits de pointe ajustés en fonction du climat..

2.2.3 Ensembles climatiques à échelle réduite et à biais corrigé

Le travail réalisé grâce au programme de recherche pancanadien Global Water Futures (l'avenir de l'eau dans le monde) [99] pour soutenir les efforts de modélisation à l'échelle du Canada a facilité la diffusion de simulations du CMIP6 à biais corrigé et à échelle réduite, pour un total de 160 simulations (c.-à-d. 40 modèles, 4 scénarios d'émissions). Les données comprennent la température et les précipitations minimales et maximales à l'échelle du Canada, avec une correction de biais multivariée.

Des efforts considérables ont également été investis par des organismes gouvernementaux, des entités et des universitaires pour produire des GE à l'échelle du Canada élaborés à partir du modèle CanESM2 (c.-à-d. CanESM2-LE) qui sont réduits à l'aide des techniques de correction de biais du Consortium sur les impacts climatiques du Pacifique (PCIC) pour soutenir l'évaluation à l'échelle hydrologique. Ces données sont disponibles et diffusées par les consortiums climatiques du Canada (p. ex., Ouranos, PCIC) ou ECCC, chacun ayant un jeu de données de base légèrement différent pour la correction de biais. L'utilisation d'un modèle climatique unique et d'un scénario d'émissions réduira la propagation prévue des simulations et des résultats en ne tenant compte que de la variabilité interne indépendante des scénarios d'émissions. Le grand ensemble associé à un modèle climatique unique englobe généralement un MCM ou un MCR avec différentes conditions initiales [33] et conditions limites.

Ouranos a également élaboré un ensemble de simulations post-traitées, appelé ESPO-G, qui supprime les modèles chauds de l'ensemble [100]. Il existe également une version disponible corrigée selon l'ERA5 appelée ESPO-G6 [101]. La correction de biais à l'aide de l'ARDP est également couramment appliquée partout au Canada comme solution de rechange viable [102].

2.2.4 Cadre de travail indépendant des modèles

Dans le cadre du programme de modélisation de base Global Water Futures [103], des travaux sont en cours pour générer et produire des flux de travail de modélisation normalisés et des outils de soutien pour le Canada, l'Amérique du Nord et, en fin de compte, la communauté mondiale, qui s'appliquent à la modélisation climatique et aux études d'impact. L'achèvement de ce programme est prévu en mars 2024. Le programme pourra non seulement entraîner une plus grande uniformité et des attentes plus élevées pour les études de modélisation entreprises par les professionnels, mais il vise également à fournir les avantages supplémentaires suivants :

- Le traitement a priori des données géospatiales (c.-à-d. le géotextile pour le modèle hydrologique, y compris un modèle d'élévation numérique, les données de couverture terrestre, les données de classification du sol et l'hydrographie) pour tous les modèles et tous les sous-bassins du Canada, en fonction de la classification HUC4 [32];

- Une interface pour les modèles de processus physiques complexes (c.-à-d. SUMMA, WATFLOOD, HYPE et MESH), facilitant les analyses des ensembles à plusieurs modèles;
- Un moyen d'intégrer de nouvelles boîtes à outils pour améliorer l'uniformité des modèles hydrologiques dans l'ensemble de la communauté de modélisation;
- Des scripts et des normes pour l'analyse comparative des modèles (évaluation) dans le but d'assurer l'uniformité;
- Un flux de travail documenté et des attentes pour les études de modélisation [104];
- Un outil de routage à charge verticale autonome, MIZURROUTE, qui comprend la réglementation et qui peut être interfacé avec n'importe quel produit informatique sous forme de valeurs aux points de grille

Cet encadrement pourra faciliter un flux de travail reproductible qui est harmonisé entre l'élaboration des courbes de limite et des facteurs de changement delta dans le présent rapport de recherche, d'une part, et une analyse hydrologique détaillée du bassin hydrographique à l'emplacement d'un pont réalisée de manière indépendante par des professionnels, d'autre part.

2.3 Entrevues avec les professionnels et les organismes

Des représentants de 15 organismes au Canada ont été interrogés pour recueillir divers commentaires et conseils relatifs à l'estimation du débit de pointe ajusté en fonction du climat. Les personnes interrogées ont été sélectionnées pour représenter la diversité dans le secteur (p. ex., divers paliers de gouvernement, industries et conseillers), la géographie (p. ex., d'ouest en est, et au nord) et la taille de l'organisation (p. ex., de grandes organisations à plusieurs employés à des entreprises individuelles). Les commentaires des personnes interrogées ont été saisis par l'équipe de projet et pris en compte dans l'approche recommandée qui est énoncée dans ce rapport.

Les professionnels et les organismes potentiels ont été choisis en fonction de leur participation active à l'estimation du débit de pointe et en tenant compte de la représentation régionale, comme le montre la figure 3. Des entrevues ont été menées avec des experts qui

ont accepté l'invitation à participer. Ces entrevues ont généralement duré une heure environ. Un résumé des réponses est présenté au tableau 2 sous forme de points de consensus émergent (c.-à-d. que plus de 80 % des professionnels sont d'accord) et de préoccupations émergentes, comme l'ont souligné les organismes ou les professionnels. Les personnes interrogées ont convenu que l'initiative avait trop tardé et représentait un investissement valable. Les professionnels ont également convenu que les courbes de limite et l'approche relative au facteur de changement delta qui en résulte pourraient fournir un outil précieux pour soutenir l'évaluation du débit de pointe dans un climat changeant.

Figure 3 : Représentation nationale des organismes et des professionnels interrogés pour le présent rapport.

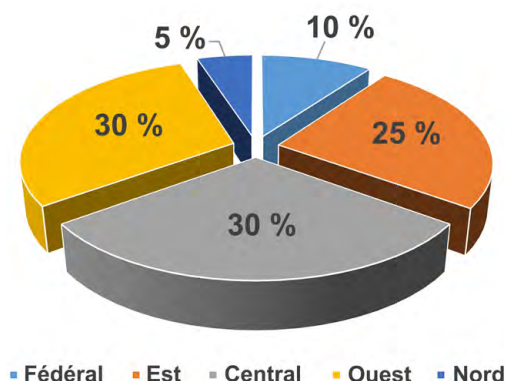


Tableau 2 : Résumé des commentaires des personnes interrogées comme points de consensus émergent et comme préoccupations émergentes

Consensus émergent ¹	Préoccupations émergentes
Une approche simplifiée, mais conservatrice, est nécessaire pour fournir des conseils et des outils aux professionnels qui n'ont pas le temps, l'argent ou la capacité d'effectuer les AFC en fonction du climat. D'énormes écarts dans la qualité, les éléments et l'approche des études de modélisation existantes présentent un risque quant à l'élaboration des courbes de limite des études et des rapports existants. Le fait d'ignorer la régularisation du débit (c.-à-d. les réservoirs) est probablement acceptable parce qu'elle est généralement conservatrice et qu'elle tient compte des conditions extrêmes dans lesquelles les débits de pointe élevés ($PAD < 0,01$; $T > 100$ ans) peuvent ne pas être atténués de manière importante. L'utilisation d'une méthodologie basée sur un SMILE avec un MCR unique pour estimer les débits de pointe en cas de changement climatique est considérée comme « assez bonne » en cas de ressources limitées et pourrait être sélectionnée au lieu d'un ensemble à plusieurs modèles. Les approches empiriques (la meilleure adaptation aux données) ou de distribution de la LEG sont privilégiées si une distribution d'une AFC est utilisée. Dans le cas de grands ensembles, la distribution empirique est acceptable pour la $PAD < 0,01$ ($T > 100$ ans) et probablement acceptable pour la $PAD < 0,02$ ($T > 50$ ans). Le seuil de petit bassin hydrographique ne devrait pas être défini uniquement en fonction de la zone de drainage, mais devrait tenir compte de la nature du bassin hydrographique et de la réponse hydrologique prévue. Le temps de concentration peut être l'indicateur le plus utile pour définir la taille minimale du bassin hydrographique applicable. Les précipitations extrêmes ont tendance à être sous-estimées par les MCM et même par les MCR. L'opinion d'un hydrologue expert et les connaissances locales sont inestimables pour orienter l'évaluation du débit de pointe et devraient être un facteur clé de l'approche et de la méthodologie. Le niveau d'effort requis pour réduire l'incertitude dans la prévision hydrologique devrait être lié à la criticité et aux conséquences des dommages à la structure d'un pont. Il est peu probable que l'atteinte d'un consensus total sur tous les aspects de l'approche soit réalisable. Toute norme à l'échelle nationale pour les analyses du débit de pointe fondées sur les changements climatiques exigera du temps et des efforts considérables, mais cela est souhaité et nécessaire.	La définition de la taille d'un petit bassin hydrographique (c.-à-d. où l'équation de Clausius-Clapeyron pourrait être appliquée la méthode des pluies et donc exclue de l'initiative) est restée floue. Le seuil de petit bassin hydrographique variait de 5 à 100 km², la plupart indiquant moins de 50 km². Une étude du Québec a indiqué que la méthode des pluies comme la méthode rationnelle devraient être limitées aux zones de moins de 100 km² [105]. Si cela est utilisé pour élaborer des courbes de limite, l'uniformité entre les études climatiques serait très importante (p. ex., la correction de biais, les données d'étalonnage, les scénarios climatiques, les périodes, etc.). Idéalement, tout serait modélisé dans une seule étude. Il sera peu probable de trouver une distribution d'AFC universelle qui représente tous les bassins hydrographiques. Il sera difficile de parvenir à un consensus ou de trouver un accord sur la régionalisation ou les zones hydrologiques pour les bassins hydrographiques à la grandeur du Canada. Les événements extrêmes localisés ou uniques dans les bassins hydrographiques ou les événements à grande échelle composés ou qui mettent en cause plusieurs bassins hydrographiques ont tendance à donner lieu à des scénarios extrêmes; les modèles hydrologiques sont souvent médiocres pour les estimer. Éviter les approches de régionalisation. Il est préférable de maintenir une base de données liée aux sous-bassins. Cela serait plus utile et plus transparent pour les professionnels. Fournir un jeu de données national sur les courbes de limite et les facteurs de changement delta pourrait mener à s'éloigner des connaissances locales et de l'expertise des professionnels. Prendre en considération les cas de déviation comme un type de régularisation distinct, particulièrement s'il est possible que le débit de pointe augmente au-dessus des conditions naturalisées. L'acceptation des courbes de limite et des facteurs de changement delta exigera qu'ils soient réalistes et qu'ils ne tentent pas d'incorporer toutes les considérations et l'incertitude liées aux changements climatiques (c.-à-d. inclure un énoncé des limites).

Note. ¹Le consensus a été défini comme la mise en évidence ou le signalement des mêmes renseignements par plus de 80 % des organismes ou des professionnels lors de l'entrevue.

Une préoccupation importante est centrée sur le niveau d'effort requis pour mener l'initiative en matière de débit de pointe à l'échelle nationale, les personnes interrogées notant que la modélisation de tous les bassins hydrographiques du Canada dans divers scénarios climatiques exigerait beaucoup de temps et de financement. Les personnes interrogées ont noté qu'une suggestion précédente, qui repose sur l'utilisation d'une compilation des résultats d'études existantes (voir la section 2.2) pour élaborer des courbes de limite pour les débits de pointe, présente un risque considérable en raison des différentes fondations de l'étude (c.-à-d. les ensembles, les scénarios de modèles climatiques, les périodes, la correction de biais, l'étalonnage, etc.), tout cela ayant un impact sur les enveloppes d'incertitude et ayant la plus grande incidence sur les quantiles supérieurs (c.-à-d. pour PAD < 0,01; PR > 100 ans). D'autres inquiétudes ont été soulevées concernant la définition des petits bassins hydrographiques qui conviennent à l'application de la méthode des pluies, de la dépendance à l'échelle régionale et de la définition des zones hydrologiques. Des inquiétudes ont également été exprimées quant au fait que cet effort est susceptible d'usurper le rôle des hydrologues et d'exclure les connaissances expertes qu'ils apportent à divers endroits et dans divers climats partout au pays. Enfin, les personnes interrogées ont noté que cette approche simplifiée pourrait nuire à l'élaboration de meilleurs outils et à la recherche par les professionnels locaux.

3 Vers un jeu de données national sur les courbes de limite

Tous les bassins hydrographiques sont uniques et de complexité variable. Par conséquent, il est important de reconnaître que l'application des connaissances des professionnels pourrait faire ressortir les caractéristiques uniques de tout bassin hydrographique, ce qui réduit les inexactitudes et les incertitudes liées aux réponses hydrologiques historiques et futures potentielles. Toutefois, le CCCPR [1] bénéficierait d'exigences hydrologiques plus clairement définies pour estimer les débits de pointe à l'emplacement des ponts. Les méthodes devraient faire la distinction entre la réponse hydrologique des bassins hydrographiques et, en particulier, s'il est possible de prédire raisonnablement le débit de pointe généré en fonction de la méthode des pluies qui repose sur les courbes IDF. Une distinction entre les petits et les grands bassins hydrographiques pourrait être faite, les petits étant guidés par la méthode des pluies et les grands nécessitant une modélisation du

bassin hydrographique en fonction du climat. Cependant, la modélisation des bassins hydrographiques fondée sur des variables climatiques historiques et futures est exigeante en termes de main-d'œuvre, et l'effort peut ne pas être proportionnel au risque associé à une structure de pont. Par conséquent, une méthodologie qui permettrait aux professionnels d'utiliser un facteur de correction simplifié et conservateur susceptible d'être appliqué aux estimations du débit de pointe dans les conditions climatiques actuelles est envisagée.

L'élaboration de facteurs de changement delta spécifiques au bassin hydrographique, fondés sur une comparaison entre les modèles des débits de pointe historiques et futurs, offre plusieurs avantages par rapport à la méthode de l'hydrogramme unitaire qui fournit une valeur de débit par zone contributive. Deux raisons convaincantes

1. Les professionnels devront tenir compte des caractéristiques uniques de chaque bassin hydrographique afin d'effectuer une AFC des conditions actuelles en fonction des données observées et/ou d'autres méthodes classiques d'évaluation du débit de pointe;
2. Une comparaison du débit de pointe historique modélisé et du débit de pointe futur modélisé peut entraîner un degré de confiance plus élevé comparativement à une valeur absolue, comme la méthode d'hydrogramme unitaire, qui exige des professionnels qu'ils mettent leur foi dans un modèle de type « boîte noire ».

Malgré le changement potentiel dans les mécanismes de génération des pointes de crue, les professionnels devraient utiliser les enregistrements historiques et les approches d'AFC traditionnelles pour comprendre les conditions actuelles comme une base pour toute évaluation du débit de pointe. Dans le contexte de l'initiative, ce n'est qu'une fois l'évaluation hydrologique historique et l'AFC effectuées par une personne qualifiée que les courbes de limite devraient être prises en compte et que les facteurs de changement delta devraient être appliqués. Cette approche permet l'utilisation des connaissances des professionnels et de l'information existante tout en tenant compte des changements qui peuvent survenir pendant la durée de vie d'une structure.

Bien que toute mise à jour envisagée de la norme CSA S6:19 (CCCPR) [1] devrait encourager les propriétaires de ponts et les professionnels à effectuer des évaluations hydrologiques spécifiques au bassin hydrographique,

l'application de facteurs de changement delta aux valeurs historiques de l'AFC est une solution de rechange acceptable, bien que conservatrice. Il est important de noter que l'approche proposée n'a pas pour but de décourager les professionnels de réaliser des évaluations du débit de pointe pour un bassin hydrographique en fonction du climat ainsi que des analyses des débits de pointe historiques spécifiques au site. L'approche proposée exigerait plutôt que les professionnels effectuent l'AFC historique à l'emplacement d'un pont à l'aide de méthodes classiques. Cela permettrait d'établir les débits de pointe historiques de référence et de comprendre les mécanismes des débits de pointe critiques (p. ex., pluie, fonte des neiges), ce qui permettrait au professionnel de tenir compte de toutes les complexités hydrologiques liées à un site particulier, y compris les caractéristiques du bassin hydrographique et le routage du débit. Les courbes de limite et les facteurs de changement delta connexes pourraient ensuite être appliqués à l'AFC pour les débits de pointe historiques tout en travaillant dans les limites énoncées et selon les directives particulières.

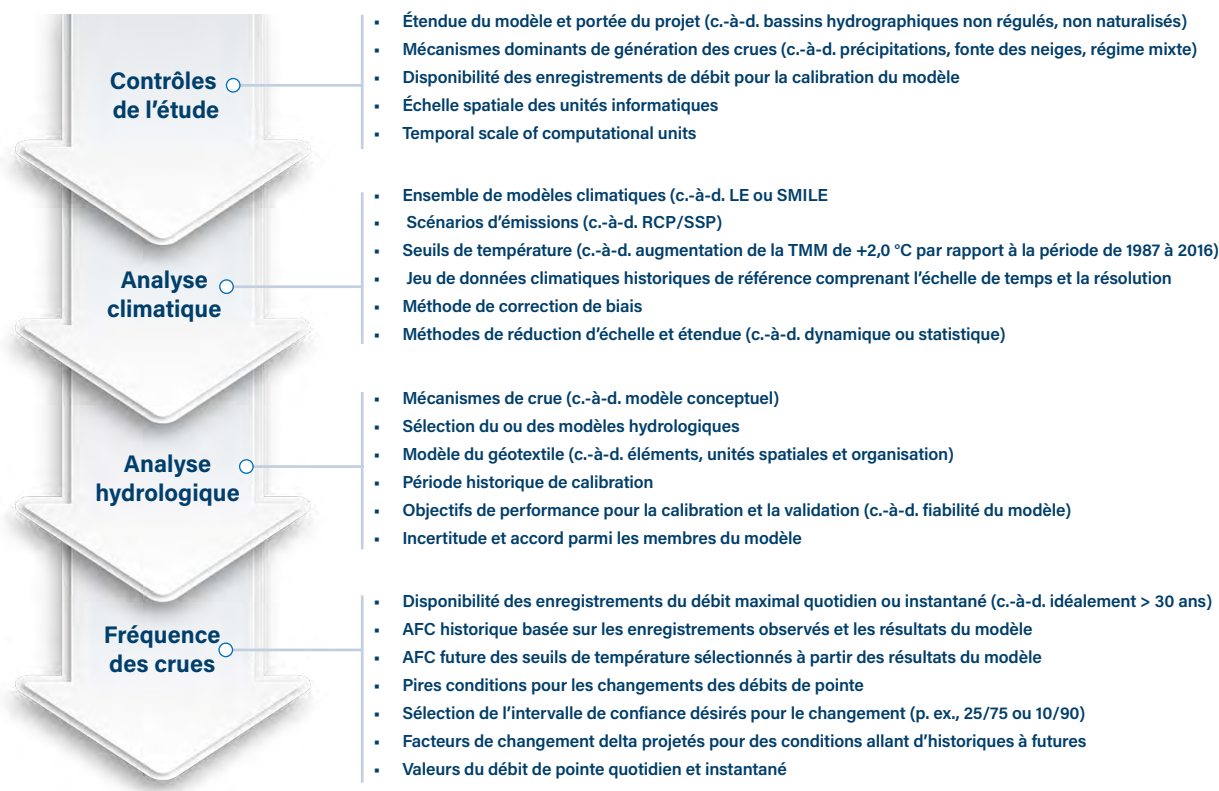
Une base de données nationale sur les courbes de limite documenterait le changement prévu entre les débits historiques du cours d'eau naturel/naturalisé et les débits futurs résultant des changements climatiques pour les bassins hydrographiques partout au Canada. Dans le cadre de l'initiative, les enveloppes d'incertitude produites par l'ensemble climatique permettraient de sélectionner des facteurs de changement delta conservateurs à partir d'une plage de débits prévus. Les facteurs de changement delta représenteraient un ensemble d'intervalles de confiance pour le changement prévu lors de la comparaison des débits de pointe actuels et futurs pendant la durée de vie nominale d'un pont. Les professionnels appliqueraient les facteurs de changement delta aux estimations du débit de pointe en un site donné dans les conditions actuelles pour ajuster les valeurs du débit de pointe afin de tenir compte des répercussions des changements climatiques.

L'analyse documentaire a permis de cibler plusieurs initiatives existantes susceptibles d'être mises à profit pour soutenir un effort de modélisation à l'échelle du Canada ou pour s'y intégrer dans le but d'obtenir des courbes de limite et des facteurs de changement delta qui quantifient les changements prévus pouvant survenir lors de la comparaison des estimations des débits de pointe historiques de référence par rapport aux estimations des débits de pointe dans des conditions

futures. Les considérations clés pour chaque étape de l'élaboration d'un jeu de données national sur les courbes de limite et les facteurs de changement delta sont décrites dans la figure 4.

Pour obtenir des courbes de limite et définir des facteurs de changement delta dans le but d'estimer le débit de pointe affecté par le climat en un site donné pour chaque sous-bassin modélisé dans l'ensemble du Canada, il faut générer les données suivantes :

- Les **résultats d'un ensemble de modèles climatiques** dont le biais est corrigé selon un jeu de données climatiques historiques de référence et dont l'échelle est réduite en fonction, au minimum, de la température et des précipitations, et qui se prolonge sur la période historique de référence jusqu'à la période climatique future. Une plage de changements de température limite dus au réchauffement climatique serait utilisée pour définir les périodes climatiques dans les courbes de limite et pour définir des facteurs de changement delta ;
- Un ou des **modèles hydrologiques** étalonnés selon le même jeu de données climatiques historiques de référence utilisé pour la correction de biais des modèles climatiques, évalués en fonction des données sur le débit des cours d'eau observées sur une période historique de référence. L'accent serait mis sur l'ampleur et le moment des débits de pointe à la résolution temporelle la plus fine possible (c.-à-d. quotidiennement) ;
- Une **série chronologique modélisée du débit du cours d'eau** pour les périodes historiques et futures (p. ex., de 1987 à 2100), guidée par un ensemble climatique, mais en tenant compte de scénarios d'émissions indépendants qui produiraient une bande d'incertitude des débits historiques et futurs prévus. La bande d'incertitude permettrait d'estimer les changements maximums prévus au débit de pointe pendant la période de simulation ;
- Des **courbes de limite** qui comparent la plage des débits de pointe historiques (c.-à-d. de 1987 à 2016) et des débits de pointe futurs des bassins hydrographiques représentatifs partout au Canada. **Des facteurs de changement delta** seraient obtenus à partir des courbes de limite fondées sur le décalage entre les débits de pointe historiques et futurs prévus en fonction de changements incrémentiels dans l'augmentation de la TMM et d'un intervalle de confiance sélectionné (p. ex., le 25^e percentile pour les débits historiques et le 75^e percentile pour les débits futurs).

Figure 4 : Principales considérations pour l'élaboration de facteurs de changement delta (Δ) à l'échelle du Canada.

Pour estimer les débits de pointe pendant la durée de vie nominale d'un pont, une **AFC historique** en un site donné serait réalisée par un professionnel qualifié à l'aide de méthodes classiques, comme l'analyse de fréquence par station unique, les approches régionales ou la modélisation hydrologique. Une variété de probabilités annuelles de dépassement allant de 4 % à 0,2 % peut être nécessaire pour évaluer l'affouillement et l'érosion ainsi que pour estimer le débit de crue nominal. Ce sont les valeurs de base auxquelles les facteurs de changement delta appropriés seraient appliqués.

3.1 Approche recommandée pour élaborer un jeu de données national sur les courbes de limite

La figure 5 illustre les étapes proposées pour générer un jeu de données national sur les courbes de limite qui pourrait être utilisé pour élaborer des facteurs de

changement delta. Les pratiques exemplaires suggérées pour chaque étape sont décrites dans les sections 3.1.1 à 3.1.11.

3.1.1 Définition de la portée de l'étude

Aux fins de l'initiative, le domaine d'intérêt est l'ensemble du Canada. Cependant, les courbes de limite seraient obtenues à partir de bassins hydrographiques naturels particuliers qui ont des enregistrements de débit appropriés. Les bassins hydrographiques candidats devraient être présélectionnés pour s'assurer qu'ils répondent aux critères suivants : régularisés le moins possible, relativement stationnaires au fil du temps avec un nombre suffisant d'observations consignées.

Des critères de scrutation améliorés devraient être élaborés pour déterminer quels bassins et sous-bassins sont inclus dans les analyses ou exclus de celles-ci. Les critères améliorés à prendre en considération sont les suivants :

- Soutient l'élaboration d'une base de données qui représente les bassins hydrographiques régis par divers mécanismes de ruissellement et une réponse hydrologique;
- Contribue à la couverture spatiale des divers paysages climatiques et géographiques du Canada;
- Comprend des observations consignées suffisantes (c.-à-d. au moins 10 ans d'observations homogènes du débit);
- Connaît un minimum de changements naturels et anthropiques au niveau du bassin hydrographique (c.-à-d. que l'hypothèse de stationnarité est valide).

À la suite de la sélection et de l'étalonnage du bassin hydrographique, la décision d'étendre les simulations du modèle aux bassins sans jaugeage pourrait être examinée, mais il faudra quand même respecter des conditions minimales de régularisation du débit et de stationnarité du bassin hydrographique.

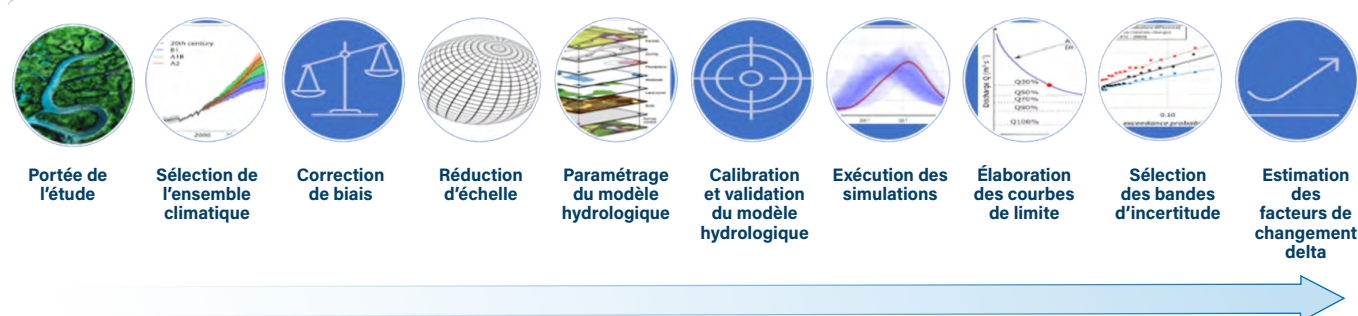
Il est reconnu que la comparaison et l'agrégation des résultats pourraient soutenir la définition des régions hydrologiques et l'application des facteurs de changement delta d'une manière simplifiée pour les professionnels. Cependant, la délimitation des zones ou des régions hydrologiques est une source de débat et pourrait représenter une perte d'information à l'échelle du bassin, et elle n'est donc pas incluse dans l'initiative. Si elle est incluse ultérieurement, plusieurs études sur la fréquence des crues fournissent des directives sur la similarité des mécanismes de génération des crues [8], [95], sur les mécanismes de génération du ruissellement [55] et sur les processus hydrologiques [106] à l'échelle du Canada. De plus, les données de réanalyse et les données captées à distance pourraient fournir des

renseignements sur les gradients de climatologie. Une classification couramment utilisée pour l'hydrologie comprend des versions adaptées de la classification de Köppen-Geiger [105].

3.1.2 Sélection de l'ensemble de modèles climatiques

Au moment de la rédaction du rapport, les modèles climatiques à la pointe de la technologie sont ceux du CMIP6 et la production de simulations régionales à échelle réduite sur l'ensemble du territoire canadien (p. ex., CESM1 et CanESM2). Le CMIP6, composé de nombreux MCM provenant de divers instituts [12], fournit des renseignements concernant l'incertitude structurelle des modèles (et la variabilité naturelle et interne de plusieurs simulations d'un même MCM) ainsi que l'incertitude des scénarios climatiques, englobant différentes SSP [107]. Bien que de grands ensembles créés à partir de SMILE à travers le territoire canadien (p. ex., CanESM-LE et autres) soient générés pour décrire la variabilité naturelle ou interne séparée des impacts forcés (scénario des émissions), ils représentent un degré réduit d'incertitude totale. Ils devraient également exploiter les modèles à échelle réduite (c.-à-d. les MCR) représentatifs du territoire canadien [18], [108] ou du territoire nord-américain [109]. On s'attend à ce que les variations climatiques (incertitude) d'un ensemble du CMIP6 soient plus importantes que celles représentées par un SMILE. Malgré le fait qu'un SMILE pourrait offrir une prévision plus précise du changement dans un scénario donné pour une région d'intérêt particulière, il peut ne pas intégrer complètement la gamme de résultats et d'événements extrêmes qui conviennent à l'estimation du débit de pointe.

Figure 5 : Flux de travail pour l'obtention d'un jeu de données national sur les courbes de limite et les facteurs de changement delta.





« Pour tenir compte de toute l'incertitude climatique, plusieurs représentations du climat futur sont nécessaires, si cela est possible sur le plan informatique. »

Pour tenir compte de toute l'incertitude climatique, plusieurs représentations du climat futur sont nécessaires, si cela est possible sur le plan informatique. Idéalement, l'ensemble devrait inclure plusieurs des MCM/MCR et des conditions initiales variables (c.-à-d. des membres). L'objectif est de sélectionner un ensemble de modèles climatiques qui fournit la gamme complète des résultats possibles dans la région d'intérêt pour permettre l'évaluation des paramètres clés, y compris la valeur moyenne et la variabilité des résultats. Contrairement à la section 2.1.3.1, où un seul scénario d'émissions et un seul cadre temporel sont pris en compte, cette approche peut ne pas intégrer la pire condition pour l'évaluation du débit de pointe pendant la durée de vie nominale d'un pont. Le cadre temporel de chaque scénario d'émissions provoquant une augmentation de la TMM indiquée en degrés ainsi que la réponse hydrologique associée variera selon le scénario. Par conséquent, les simulations du modèle pourraient tirer avantage du traitement indépendant des scénarios d'émissions.

Le climat historique et le climat futur devraient être simulés à l'aide de l'ensemble de modèles climatiques, car il est important de comparer les résultats entre les modèles plutôt que de comparer les conditions historiques observées par rapport aux conditions futures modélisées, ce qui introduirait un autre niveau d'incertitude (voir la section 3.1.4).

Bien que les horizons temporels futurs standard soient souvent appliqués dans la documentation pour examiner les changements futurs du climat et de l'hydrologie, l'AR6 du GIEC recommande de sélectionner un

seuil d'augmentation de la température (c.-à-d. une augmentation de la TMM de 2,0 °C) pour évaluer les effets de l'atténuation et de l'adaptation climatiques [107]. Étant donné que la durée de vie nominale des structures de pont est généralement de 75 ans, le tableau 1 (voir la section 2.1.3.1) met l'accent sur une augmentation de la TMM de 2,0 °C par rapport à une période de référence (c.-à-d. de 1987 à 2016), laquelle serait atteinte en 2087 selon le RCP 6.0. La fiabilité sera accrue en utilisant plusieurs MCM/MCR et plusieurs conditions initiales/limites. Toutefois, l'incertitude peut être accrue en incluant des modèles chauds potentiels. Si un seul scénario d'émissions est envisagé en fonction de l'hypothèse et de la sélection d'un SMILE ci-dessus, l'incertitude sera réduite, mais la fiabilité (probabilité que le débit nominal prévu soit intégré dans l'ensemble) sera également réduite. La considération du type d'ensemble climatique qui devrait être choisi repose sur le niveau de risque accepté et les contraintes informatiques liées à la correction de biais et à la réduction d'échelle de l'ensemble climatique pour tout le Canada. À cette fin, si possible, d'autres projets devraient être mis à profit pour accroître l'efficacité, mais en respectant tout de même les niveaux de risque acceptés et perçus dans l'élaboration des courbes de limite et des facteurs de changement delta pour les estimations du débit de pointe.

3.1.3 Correction de biais pour les données climatiques

Pour s'assurer que les modèles climatiques représentent adéquatement la gamme de conditions potentielles à utiliser dans les études hydrologiques, ceux-ci doivent être corrigés pour être rapprochés du climat connu et

historique observé dans les zones d'intérêt. Bien que la température et les précipitations soient les variables hydrologiques minimales requises pour les modèles climatiques, certains modèles hydrologiques peuvent nécessiter des variables supplémentaires. Compte tenu de la taille et de la portée de l'initiative, une réduction d'échelle statistique est recommandée. Une correction de biais multivariée (c.-à-d. la correction de la température et des précipitations à l'unisson) devrait être utilisée pour assurer la préservation de la structure de corrélation des entrées hydrologiques primaires [45]. Le jeu de données climatiques historiques de référence sélectionné aux fins de correction de biais devrait être proportionnel (c.-à-d. le même ou ayant les mêmes propriétés statistiques) au jeu de données historiques utilisé pour l'étalonnage subséquent du modèle hydrologique. Un autre élément à prendre en considération dans la sélection d'un jeu de données climatiques historiques de référence est la couverture spatiale des bassins hydrographiques transfrontaliers. Autrement dit, tout jeu de données sélectionné pour la correction de biais et l'étalonnage du modèle devra être à l'échelle de l'Amérique du Nord, ou au moins inclure les bassins hydrographiques couvrant la frontière entre le Canada et les États-Unis.

3.1.4 Réduction d'échelle pour les données des modèles climatiques mondiaux

Les MCM décrivent le climat mondial à des résolutions grossières (de 100 à 500 km) et il est essentiel de réduire leur échelle pour représenter plus précisément les mécanismes de rétroaction atmosphérique et hydrologique de la surface de la Terre pour une représentation plus réaliste de l'hydrologie (p. ex., température, évapotranspiration). Des interactions climatiques et hydrologiques régionales sont nécessaires. Aux fins de l'initiative, il est probable que ces résultats soient obtenus à l'aide d'une réduction d'échelle statistique jusqu'à une résolution spatiale de 4 à 25 km. Cela permettrait de tenir compte des simulations de convection du modèle météorologique Weather Research and Forecasting et des modèles du système terrestre (p. ex., CanESM2) pour le Canada et l'Amérique du Nord. Les données, dont l'échelle a déjà été réduite, sont disponibles auprès des consortiums climatiques du Canada (p. ex., PCIC ou Ouranos) dans une gamme de SSP ou de RCP. Tout travail futur devrait tirer parti des efforts déjà réalisés dans la mesure où ils sont pratiques, non seulement pour assurer l'uniformité entre les études et les applications des professionnels au Canada, mais aussi en raison des efforts et des ressources informatiques.

3.1.5 Sélection du modèle hydrologique

La sélection du modèle hydrologique est importante, car elle aura une incidence sur la résolution spatiale (c.-à-d. l'unité de réponse hydrologique, ou HRU, aux points de grille) de l'entrée et de la sortie, la résolution temporelle, les besoins en matière de données, la capacité de représenter les processus hydrologiques, les mécanismes de génération du ruissellement et la demande informatique. Il est peu probable qu'un seul modèle représente efficacement toutes les régions du Canada. Il est donc important d'établir et de signaler les critères de sélection des modèles. Peu importe le modèle choisi, la demande informatique sera considérable. Il est donc important d'équilibrer le niveau d'effort avec l'incertitude et la fiabilité des résultats des modèles. Les exigences minimales qui devraient être respectées comprennent :

- la résolution temporelle (intervalle de temps quotidien);
- la résolution spatiale (environ 100 km²; grilles de 10 x 10 km² ou une HRU semblable).

Les résultats des modèles distribués aux points de grille ne sont pas nécessairement requis pour cette initiative. Un modèle de sous-bassin localisé est susceptible de fonctionner aussi bien ou mieux qu'un modèle distribué aux points de grille en raison de la régionalisation des données climatiques (en supposant une résolution suffisamment élevée, proportionnelle aux grilles du MCR, en moyenne). Cela élargit le choix de modèles hydrologiques potentiels.

En raison des demandes informatiques, tous les efforts devraient être déployés pour tirer parti des configurations et des types de modèles existants, en supposant qu'ils soient conformes à la portée et aux besoins du projet. L'initiative du PICAI offre l'occasion de tirer parti d'un ensemble existant de modèles hydrologiques avec un succès démontré au Canada [96]. Cet ensemble comprend trois modèles hydrologiques distribués : HYPE, MESH et SUMMA. Ces modèles peuvent générer des ruissellements du sous-bassin ainsi qu'aux points de grille dans des conditions climatiques historiques et futures qui sont routés par un seul outil de routage vectoriel uniforme comprenant des lacs et des réservoirs conformes à leur représentation dans CanESM [110], [111]. En harmonisant cet effort avec l'initiative du PICAI, les estimations du débit de pointe pourraient être générées d'une manière conforme aux résultats du modèle utilisé pour générer des cartes de

plaines inondables précises pour le Canada [96]. Cela serait souhaitable pour les professionnels concernés par la conception des ponts et les études sur les risques d'inondation. L'uniformité dans la méthode de routage est particulièrement importante pour le moment et l'ampleur des débits de pointe. Le routage utilisé dans le cadre de l'initiative du PICA comprend une représentation de l'influence du stockage naturel que sont les lacs et de leurs effets atténuant la génération des débits de pointe en aval, ce qui est un facteur important à prendre en considération pour l'estimation des débits de pointe au Canada. Un ensemble de modèles hydrologiques est préférable, car cela intègre l'incertitude structurelle du modèle hydrologique dans l'élaboration des courbes de limite, tandis que la sélection d'un modèle hydrologique unique suppose que l'incertitude d'un tel modèle à l'égard de la prévision du débit de pointe serait englobée dans les limites d'incertitude du modèle climatique.

3.1.6 Configuration des modèles hydrologiques

Les modèles hydrologiques sont conçus pour représenter la génération de ruissellement sur la surface terrestre, et ils représentent donc également la génération et le routage du débit du cours d'eau dans les rivières et les lacs [112]. La sélection du géotextile qui sous-tend l'étude est un facteur important pour la configuration du modèle, car la résolution spatiale des données du MCR déterminera en grande partie la taille de l'unité de calcul de base du modèle hydrologique (c.-à-d. la taille de la grille ou du sous-bassin), et cela aura une incidence sur la précision du modèle [113]. L'intervalle de temps du modèle hydrologique est en grande partie déterminé par le jeu de données climatiques de référence (c.-à-d. la réanalyse) et devrait être au plus quotidien pour l'évaluation du débit de pointe. Bien que la résolution temporelle horaire ou sous-horaire soit la plus souhaitable pour l'évaluation du débit de pointe, le calcul de ces données n'est probablement pas réalisable sur le plan informatique sur l'ensemble du territoire du modèle. Par conséquent, une correction du débit de pointe de quotidien à instantané peut être nécessaire à la suite de l'AFC dans des conditions futures. L'élaboration de rapports instantanés/quotidiens (I/D) pour accompagner les facteurs de changement delta est souhaitable, mais elle ne fait pas partie de la portée du présent rapport. Tant que les rapports I/D en fonction du climat ne sont pas élaborés, les professionnels dépendent des enregistrements historiques pour évaluer les valeurs du débit de pointe instantané, et ils supposeraient probablement que ces rapports ne changent pas de façon importante dans un climat futur.

Voici quelques considérations pratiques pour la configuration des modèles hydrologiques

- Le rapport sur l'intervalle de temps du modèle climatique est généralement limité à une résolution quotidienne, de sorte que le modèle hydrologique destiné à élaborer les courbes de limite ne prendrait pas en compte la résolution temporelle sous-quotidienne;
- Les facteurs de changement delta seraient déterminés en comparant les résultats entre les modèles des estimations quotidiennes du débit de pointe et ceux des estimations quotidiennes du débit de pointe futur sur les périodes climatiques respectives;
- L'évaluation du débit de pointe historique serait effectuée par une personne qualifiée qui pourrait inclure des estimations du débit de pointe instantané;
- Les facteurs de changement delta représentant les évaluations du débit de pointe quotidien futur seraient sélectionnés et appliqués aux estimations du débit de pointe obtenues par une personne qualifiée.

Pour assurer une précision basée sur le processus, ce qui est important pour la génération du ruissellement, il est recommandé d'utiliser un modèle hydrologique distribué capable d'intégrer l'hétérogénéité spatiale, y compris l'élévation, la couverture terrestre, les sols et d'autres facteurs physiographiques. Il est également essentiel d'avoir de bons enregistrements des débits à partir desquels étalonner et valider les modèles hydrologiques partout au pays.

3.1.7 Étalonnage et validation des modèles hydrologiques

L'étalonnage des modèles hydrologiques définit ou règle les paramètres du modèle pour représenter adéquatement les séries temporelles du débit et les processus de génération du ruissellement observés dans le bassin hydrographique ou la zone d'intérêt. L'étalonnage d'un modèle hydrologique nécessite une série temporelle d'au moins 15 ans pour intégrer la variabilité hydroclimatique décennale (p. ex., l'oscillation décennale du Pacifique et l'oscillation australe d'El Niño), et il inclut idéalement une série temporelle hydrométrique naturelle (non régularisée) observée aux emplacements de jaugeage dans la zone d'intérêt [114]. Étant donné que les courbes de limite sont élaborées pour des événements extrêmes (probabilités annuelles de dépassement de 0,2 % à 4 %), un ensemble d'échantillons suffisamment volumineux couvrant la

période d'intérêt climatique devrait être élaboré. Un rendement satisfaisant du modèle devrait être obtenu à l'échelle mondiale dans ces bassins non régularisés (p. ex., efficacité de Kling-Gupta) [115], [116]. On ne s'attend pas à ce que tous les bassins ou les régions hydrologiques démontrent un rendement satisfaisant à partir d'un étalonnage de paramétrage global (c.-à-d. un ensemble de paramètres défini dans toutes les régions ou tous les bassins); le rendement à long terme est un indicateur plus important de la précision de l'évaluation de la courbe de limite. Le rendement du modèle pendant toute la période de simulation devrait être signalé et tout bassin qui n'atteint pas un rendement satisfaisant devrait faire l'objet d'une enquête plus approfondie. La présence de régularisation des rivières aura une incidence sur le rendement du modèle et réduira la capacité du modèle à correspondre adéquatement aux observations consignées du débit pendant la période régularisée. Par conséquent, seuls les enregistrements des jauges hydrométriques naturelles, naturalisées ou ayant subi une incidence minimale devraient être utilisés pour l'étalonnage et la validation des débits non régularisés.

L'étalonnage devrait être automatisé (p. ex., à l'aide d'OSTRICH [117] ou d'autres algorithmes). L'utilisation de plusieurs mesures pour évaluer le rendement du modèle, y compris le débit global du cours d'eau et les signatures de débit représentant le débit de pointe du cours d'eau, pourrait également être envisagée pour une approche d'étalonnage à plusieurs critères [118].

3.1.8 Simulations de modèles fondées sur le modèle climatique mondial

L'ensemble climatique à échelle réduite et à biais corrigé pourrait forcer les modèles hydrologiques sur une période historique continue à une période de simulation future (c.-à-d. de 1987 à 2100). Chaque membre de l'ensemble générerait une série temporelle unique et continue du débit du cours d'eau. Lorsqu'elle est combinée, une enveloppe de débit du cours d'eau historique et futur prévu pourrait être générée, ce qui comprend l'effet combiné de plusieurs sources d'incertitude dans la chaîne de modélisation.

La période de simulation historique devrait être d'au moins 30 ans. Sous réserve de la disponibilité des données d'observation à des fins d'étalonnage et de vérification, elle pourrait correspondre à une période

de référence documentaire souhaitée et fréquemment signalée par le GIEC de 1981 à 2010. Cependant, puisque la période historique définie par les modèles CMIP6 se termine en 2016, la période de référence de base pourrait également être choisie pour s'harmoniser avec la période de 1987 à 2016.

La période future définie par le modèle CMIP6 s'étend jusqu'en 2100. Bien que les lignes directrices pour le Canada relativement à la cartographie des risques d'inondation suggèrent qu'une période climatique d'au moins 10 ans soit utilisée pour intégrer la variabilité naturelle du climat, la documentation recommande généralement une période entre 20 et 30 ans [86]. Les périodes climatiques de référence sur 30 ans et axées sur l'augmentation de la température de seuil sont souvent utilisées pour les analyses (voir la section 3.1.2).

3.1.9 Analyse de fréquence des crues

Une AFC historique est un élément clé pour estimer la plage des débits de crue nominaux requise pour la conception de ponts, ce qui nécessite généralement des PAD allant de 0,2 % à 4 %. Dans l'approche suggérée, l'AFC historique pertinente pour le site précis à l'étude demeurerait la responsabilité de la personne qualifiée. Des approches classiques pour l'estimation du débit de pointe en supposant un climat stationnaire seraient utilisées, et idéalement tirées des données observées (voir la section 2.1.4). Les crues nominales pour les conditions futures dépendent des courbes de limite et des facteurs de changement delta définis dans le cadre de l'initiative (voir la section 1.2).

Dans le cadre de cette initiative, la comparaison directe des débits historiques simulés et des débits futurs simulés serait utilisée pour obtenir les facteurs de changement delta applicables aux valeurs historiques de l'AFC obtenues par les professionnels. La comparaison entre les modèles des valeurs historiques et futures du débit de pointe permettrait d'éliminer ou de réduire au minimum l'effet du biais et de la précision de l'étalonnage des modèles. Les valeurs du débit de pointe sur la période de simulation pourraient être déterminées à partir des résultats de l'ensemble sur les périodes climatiques pour les périodes historiques et futures de chaque bassin hydrographique étudié.

3.1.10 Élaboration des courbes de limite et des facteurs de changement delta

Pour chaque bassin hydrographique modélisé, un tracé de la série temporelle du débit de pointe Q annuel (c.-à-d. les maximums annuels) au cours de la période de 1987 à 2100 serait élaboré pour chaque RCP/SSP faible, moyen et élevé, comme cela est illustré à la figure 6. Les bandes de confiance découleraient de la plage des résultats de l'ensemble de modèles. Les tracés des maximums annuels au fil du temps, ainsi que leurs bandes d'incertitude, représentent les courbes de limite.

La comparaison du débit de pointe annuel de base (c.-à-d. de 1987 à 2016) et du débit de pointe annuel dans des conditions futures permet d'estimer le changement relatif du débit de pointe. Chaque estimation du débit de pointe engloberait l'horizon temporel de la période climatique centrée sur les incréments de la TMM. Cette variation en pourcentage du débit de pointe annuel calculée à partir des courbes de limite représente le facteur de changement delta.

Des courbes de limite et des facteurs de changement delta seraient définis pour chaque bassin hydrographique étudié. Les facteurs de changement delta peuvent ensuite être calculés directement à partir de la courbe de limite pour chaque bassin hydrographique modélisé et en fonction des incréments de la TMM sélectionnés. Des facteurs de changement delta conservateurs pourraient être définis en sélectionnant des niveaux de confiance appropriés sur la plage de résultats représentés par les résultats des maximums annuels de l'ensemble de modèles. Les estimations du débit de pointe sélectionnées pour la période historique devraient être suffisamment basses, tandis que les estimations du débit de pointe sélectionnées pour la période future devraient être suffisamment élevées pour donner des facteurs de changement delta plus importants. Pour générer des facteurs de changement delta conservateurs, une valeur de percentile faible, comme le 25^e percentile (illustré à la figure 6) serait utilisée pour la période de base (c.-à-d. de 1987 à 2016), alors qu'une valeur de percentile élevée, comme le 75^e percentile, serait utilisée pour la période d'intérêt future. Dans les figures 7 et 8, l'accent est mis sur l'augmentation de la TMM de 2 °C à des fins d'illustration.

La sélection du percentile utilisé pour représenter la distribution est, en partie, fondée sur la fiabilité de la

prévision de l'ensemble. En comparant une période future modélisée et une période historique modélisée, l'incidence de la sélection du modèle et du biais est réduite, parce que cela devient une comparaison directe de scénarios entre les modèles, ce qui représente uniquement le changement net découlant des processus climatiques.

Le flux de travail proposé et la méthodologie conceptuelle pour déterminer les courbes de limite et les facteurs de changement delta des modèles hydrologiques sont décrits aux étapes 1 à 6 ci-dessous, et ils sont illustrés aux figures 6, 7 et 8

Étape 1. Exécuter des simulations hydrologiques pour chaque scénario d'émissions et tracer le débit de pointe annuel actuel et futur (Q) au fil du temps (c.-à-d. 120 ans), y compris les bandes de confiance pour chaque bassin hydrographique modélisé (voir la figure 6).

Étape 2. Déterminer l'augmentation de la TMM par rapport à l'année pour chaque scénario d'émissions à l'aide du modèle CMIP5 ou CMIP6 (voir la figure 7). Déterminer les périodes climatiques (p. ex., 30 ans) centrées sur les incréments de la TMM (p. ex., 2 °C de TMM).

Étape 3. À l'aide de la figure 6, estimer le changement en pourcentage du débit de pointe en comparant les valeurs du débit de pointe du 25^e percentile et du 75^e percentile pour les périodes historiques et futures, respectivement.

Étape 4. Répéter les étapes 2 et 3 pour chaque incrément de 0,5 °C de la TMM.

Étape 5. Élaborer des tracés du facteur de changement delta pour l'augmentation de la TMM par rapport au changement en pourcentage de Q_{pointe} (voir la figure 8).

Étape 6. Répéter les étapes ci-dessus pour chaque bassin hydrographique.

Les courbes de limite englobent l'incertitude totale de la chaîne de modélisation. De plus, en utilisant cette comparaison de la modélisation actuelle à la modélisation future, les mécanismes générateurs de crue changeants sont implicitement intégrés. Pour cette raison, le calcul des facteurs de changement delta devrait indiquer la saison durant laquelle une crue grave future est prévue afin que les professionnels puissent comprendre la nature des crues actuelles et futures.

Figure 6 : Degrés d'augmentation de la TMM par rapport à l'année comparativement aux périodes climatiques normales de 30 ans. La figure est présentée à titre informatif uniquement.

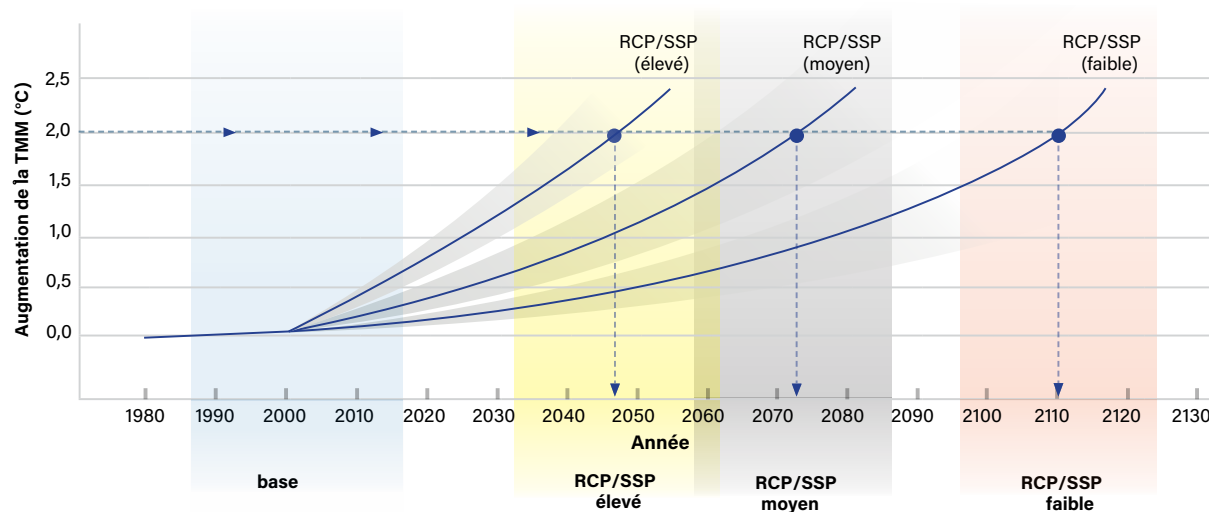


Figure 7 : Débit de pointe annuel au fil du temps pour un bassin hydrographique précis. La figure est présentée à titre informatif uniquement. La réponse hydrologique est représentative d'un bassin hydrographique à dominante nivale typique au Canada.

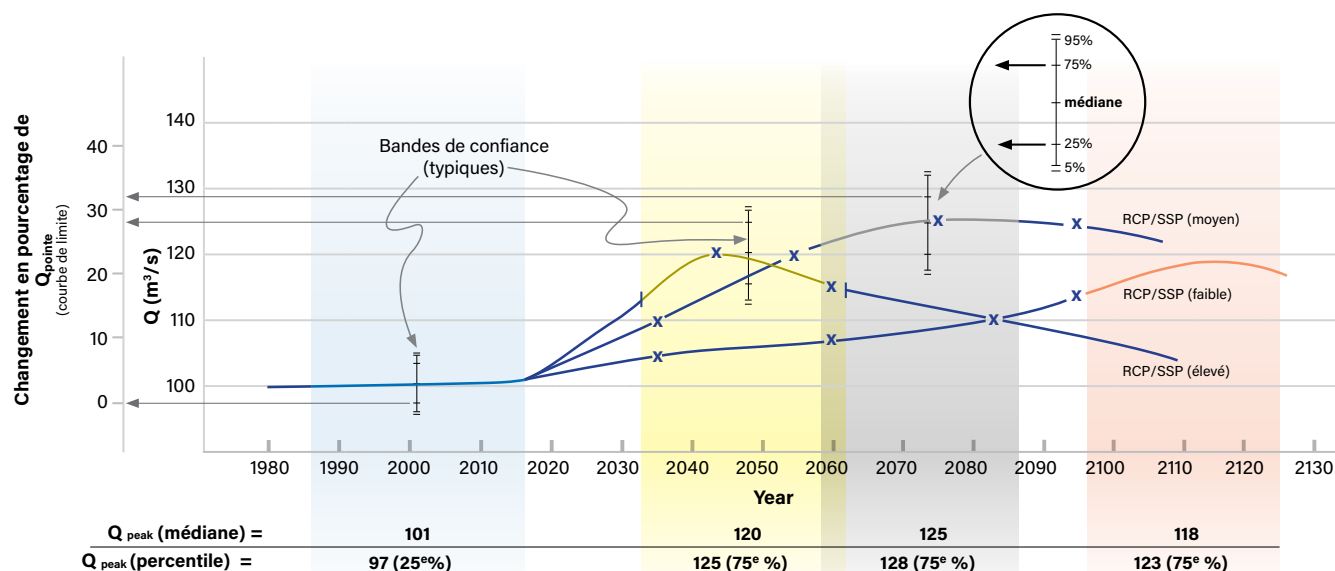
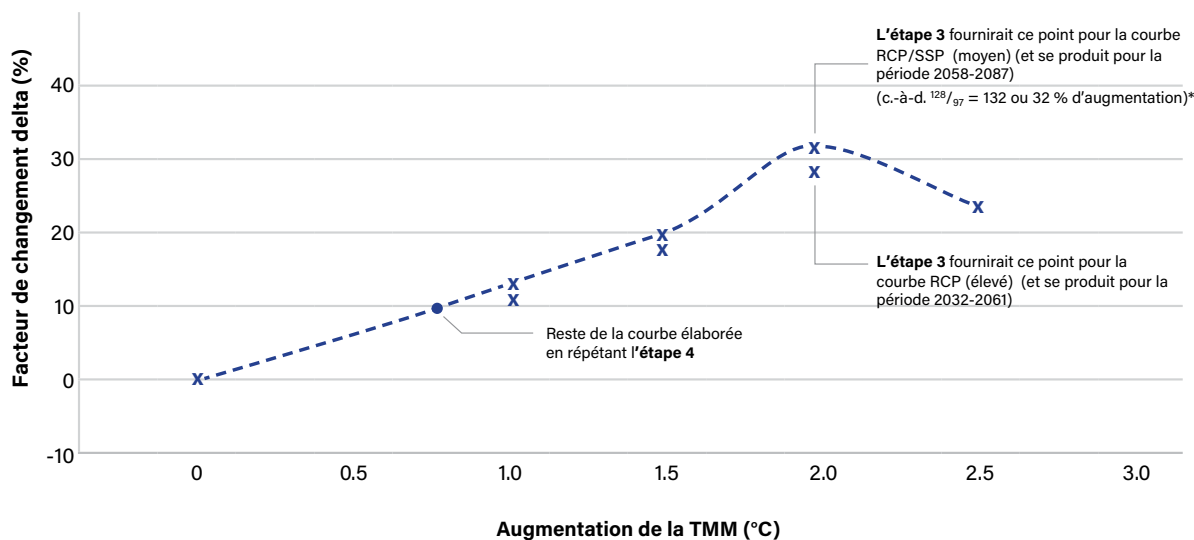


Figure 8 : Facteur de changement delta pour un bassin hydrographique précis, à l'exclusion des bandes d'incertitude. La figure est présentée à titre informatif uniquement.



3.1.11 Application des courbes de limite et des facteurs de changement delta

L'équation 2 montre comment les facteurs de changement delta (ΔQ_T) sont calculés à partir des courbes de limite simulées, où ΔQ_T correspond au changement en pourcentage de Q_{pointe} pour une augmentation donnée de la TMM :

$$\Delta Q_T = \frac{Q_{T, \text{future}} - Q_{T, \text{historique}}}{Q_{T, \text{historique}}}, \quad (\text{Équation 2})$$

où ΔQ_T = changement en pourcentage du débit de pointe, $Q_{T, \text{historique}}$ = estimation du débit de pointe pour la période historique de base à l'aide du 25^e percentile et $Q_{T, \text{future}}$ = estimation du débit de pointe pour la période future correspondant à une augmentation précise de la TMM au moyen du 75^e percentile.

Pour estimer les débits de pointe futurs en fonction des conditions décrites ici, il faut d'abord qu'une personne qualifiée estime les débits de pointe historiques à l'aide d'une AFC ou d'autres méthodes applicables. Un facteur de changement delta serait appliqué à son estimation du débit de pointe historique en fonction de la sélection d'une courbe applicable à son point d'intérêt et de l'incrément de la TMM correspondant, comme décrit à l'équation 3. Par exemple, une différence de 10 % entre le débit de pointe historique et le débit de pointe futur

prévu au cours de la période climatique entraînerait un facteur de 1,1 appliqué à l'estimation du débit de pointe historique sur le site.

$$Q_{\text{pointe}, \text{CC}}^T = \left(1 + \frac{\Delta Q_T}{100}\right) \times Q_{\text{pointe}, \text{historique}}^T \quad (\text{Équation 3})$$

où $Q_{\text{pointe}, \text{CC}}^T$ = estimation du débit de pointe pour les conditions climatiques futures correspondant à une augmentation précise en degrés de la TMM, ΔQ_T = changement en pourcentage du débit de pointe et $Q_{\text{pointe}, \text{historique}}^T$ = estimation du débit de pointe basée sur l'AFC ou d'autres méthodes applicables.

Le changement en pourcentage des estimations du débit de pointe varie en fonction de l'augmentation en degrés de la TMM. Le pire scénario (c.-à-d. le changement du débit de pointe le plus élevé en pourcentage) serait évident pour les facteurs de changement delta présentés à la figure 8. Pour sélectionner un facteur de changement delta, l'organisme dirigeant devrait préciser l'augmentation en degrés de la TMM à partir de laquelle on choisit une valeur. Par exemple, l'organisme dirigeant pourrait préciser que les facteurs de changement delta peuvent être appliqués en fonction du pire scénario possible pendant la durée de vie de la structure. Bien que cela ne soit pas conseillé, un seuil d'augmentation précis en degrés de la TMM pourrait être indiqué pour la sélection des facteurs de changement delta.

Dans certains cas, les débits de pointe prévus pour les conditions futures peuvent commencer à diminuer immédiatement. Dans ce cas, les prévisions du débit de pointe les plus élevées se produiraient dans les conditions actuelles, et il serait approprié d'appliquer un changement de 0 % aux estimations du débit de pointe historique.

On s'attend à ce que les facteurs de changement delta soient calculés à partir du résultat du modèle d'intervalle de temps quotidien. Bien que les estimations du débit de pointe quotidien soient connues comme étant inférieures aux estimations du débit de pointe instantané, les différences de comparaison entre les débits historiques quotidiens et instantanés et les débits de pointe futurs varient et sont inconnues. Les professionnels devront tenir compte de la conversion des estimations du débit de pointe quotidien en valeurs instantanées.

Jusqu'à ce que des directives améliorées soient disponibles, les professionnels pourraient appliquer les facteurs de changement delta appropriés à leur évaluation du débit de pointe instantané en supposant que les rapports I/D ne changeront pas dans un climat futur. Idéalement, les lignes directrices relatives aux rapports I/D pour un climat futur seront élaborées dans le cadre d'une initiative future ou en fournissant des MCR à haute résolution temporelle pour alimenter des modèles hydrologiques représentatifs.

3.2 Contrôle de la qualité des bases de données et diffusion

Il est prévu que les mises à jour futures du CCCPR [1] exigent que les ponts au Canada soient conçus en fonction du débit de pointe le plus élevé qui pourrait avoir lieu au cours de la durée de vie nominale du pont [6]. L'application du facteur de changement delta aux estimations du débit de pointe historique déduites des méthodes classiques représente une approche prudente pour corriger les estimations du débit de pointe afin de tenir compte des changements climatiques. Cependant, les données générées lors de l'initiative ne doivent pas se limiter à ces quantiles précis ni à des travaux de conception de ponts et d'autoroutes. Ces données pourraient être considérées comme disponibles ou accessibles pour d'autres applications régionales, comme les évaluations des risques d'inondation.

Bien que les bandes d'incertitude soient incluses pour les courbes de limite, elles ne sont pas représentées

dans les tracés des facteurs de changement delta pour plus de clarté, d'uniformité dans l'application et de facilité de sélection. En notant la nature intrinsèquement conservatrice des courbes de changement delta, il peut être plus souhaitable et rentable de mener une étude rigoureuse spécifique au bassin hydrographique, ce qui entraînerait probablement une estimation du débit de pointe plus faible. Pour faciliter cette démarche, les données sous-jacentes devraient être mises à la disposition des professionnels et des chercheurs [comme information supplémentaire et pour soutenir les estimations indépendantes du débit de pointe.

Pour assurer la normalisation de l'approche, l'accessibilité des données et la reproductibilité, qui font partie des meilleures pratiques recommandées pour la gestion des données scientifiques [119], il sera important pour un organisme responsable d'investir dans la collecte du jeu de données initial sur les courbes de limite, de le mettre à jour et de le publier progressivement ainsi que de favoriser la confiance dans les données en faisant preuve de transparence. Ces organismes pourraient inclure des organisations touchées, comme les ministères des transports provinciaux. La publication des données dans leur intégralité permettra aux organismes et aux professionnels d'effectuer des contrôles de qualité supplémentaires sur les résultats et offrira au processus un niveau supplémentaire de contrôle à travers l'évaluation par les pairs. Au minimum, les courbes de limite et les facteurs de changement delta devront être publiés et contrôlés par révision mais, idéalement, la disponibilité de tous les résultats du modèle avec la documentation appropriée du flux de travail aiderait à établir un niveau de confiance parmi les professionnels et, en général, à fournir un service à la collectivité si d'autres mesures de la PAD ou du débit de pointe étaient intéressantes pour la communauté des professionnels des ressources en eau ou de l'hydrologie. En publiant toutes les données générées pour produire les courbes de limite, les professionnels et les autres organismes pourraient appliquer leurs propres méthodes d'AFC pour recréer les facteurs de changement delta en toute confiance à l'aide de leurs propres méthodes exclusives ou internes.

Le contrôle des révisions et la mise à jour des données dans le jeu de données national seront également nécessaires et devraient être considérés comme un maintien à long terme des valeurs nominales. Les valeurs précédentes devraient demeurer accessibles aux fins de comparaison à mesure que les modèles climatiques et les scénarios évoluent. Pour ce faire, il faudra tenir



« Il est prévu que les mises à jour futures du CCCPR exigent que les ponts au Canada soient conçus en fonction du débit de pointe le plus élevé qui pourrait avoir lieu au cours de la durée de vie nominale du pont. »

compte de la capacité de stockage de l'organisme dirigeant, ainsi que des investissements continus en matière de finances et de recherche et développement dans le projet.

3.3 Éléments recommandés de l'approche

Selon la compilation des renseignements tirés de l'analyse documentaire, de l'examen des activités de recherche et développement et des entrevues avec les experts, les recommandations suivantes sont présentées pour élaborer un ensemble de courbes de limite et de facteurs de changement delta dans toutes les régions du Canada.

3.3.1 Portée de l'étude

Recommandation 1. Inclure dans l'initiative toutes les zones hydrologiques au Canada, sous forme de données discrétisées en fonction des considérations relatives au climat et au drainage².

Action: Examiner la délimitation des zones hydrologiques au Canada à partir des sources existantes et déterminer comment elles seraient représentées par des courbes de limite et des facteurs de changement delta, en prêtant une attention particulière aux mécanismes changeants du débit de pointe. Cette action peut éclairer la sélection du modèle hydrologique.

Recommandation 2. Envisager la sélection du modèle hydrologique au début du flux de travail pour assurer l'uniformité dans l'ensemble de la chaîne de modélisation. La sélection du modèle hydrologique devrait tenir

compte des zones ou des régions hydrologiques ainsi que de leur capacité à représenter les processus physiques qui entraînent la réponse du débit.

3.3.2 Ensemble climatique

Recommandation 1. Utiliser les scénarios climatiques du modèle CMIP6 de la génération actuelle, si possible.

Recommandation 2. Tirer parti du travail précédent effectué pour le PICA (ensemble de MCM CMIP6, réduction d'échelle statistique et biais corrigé pour le Canada à l'aide d'approches multivariées), ou d'un SMILE (p. ex., CanESM2-LE). Cette décision devrait être prise pendant la mise en œuvre de l'initiative en fonction des résultats disponibles dans l'étude du PICA.

3.3.3 Scénarios d'émissions

Recommandation 1. Tenir compte des scénarios d'émissions faibles, moyennes et élevées (c.-à-d. RCP 4,5, 6,0, 8,5 ou des SSP équivalentes) de façon indépendante pour élaborer des courbes de limite et évaluer la réponse hydrologique de chaque bassin hydrographique au fil du temps.

3.3.4 Réduction d'échelle et correction de biais

Recommandation 1. Cibler une résolution spatiale proportionnelle à un MCR avec la meilleure résolution pratique aux fins d'harmonisation avec une résolution hydrologique minimale (c.-à-d. une grille de 10 x 10 km² ou une zone de sous-bassin de 100 km²).

² Par exemple, à l'aide des régions de drainage du Canada de Statistique Canada : <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/16-201-x/2017000/sec-1/m-c/m-c-1.1-fra.htm>

Recommandation 2. Appliquer les méthodes statistiques de réduction d'échelle et de correction de biais pour l'ensemble du Canada (y compris les bassins transfrontaliers) ou sélectionner un ensemble où cela a été fait avec un jeu de données de référence approprié.

Recommandation 3. Utiliser la résolution temporelle quotidienne ou sous-quotidienne pour le jeu de données climatiques de référence et futur, ainsi que pour l'étape de la modélisation hydrologique.

Recommandation 4. Utiliser l'ERA5 comme jeu de données de référence pour la correction de biais, compte tenu des nombreux jeux de données de réanalyse correspondant à l'ERA5 qui pourraient être utilisés de manière fiable pour l'étalonnage du modèle hydrologique. Cela permet la correction future du biais d'autres variables météorologiques dans le cas où d'autres modèles hydrologiques (p. ex., nécessitant le vent et le rayonnement) devraient être inclus. Tenir compte des jeux de données de réanalyse du RDRS et de l'ERA5-Land s'ils sont mieux adaptés à la résolution spatiale sélectionnée.

Recommandation 5. Au minimum, corriger le biais de température et de précipitations selon la résolution temporelle quotidienne; il faut que la gamme de variables climatiques dont le biais est corrigé tienne compte des besoins des modèles hydrologiques sélectionnés.

Recommandation 6. Utiliser des techniques de cartographie par quantiles multivariés, en privilégiant les méthodes établies par Canon ou Papalexou [40].

3.3.5 Sélection des modèles hydrologiques

Recommandation 1. Utiliser les modèles hydrologiques et les ensembles climatiques du programme PICAI [96].

3.3.6 Hydrological Model Setup

Recommandation 1. Utiliser les modèles hydrologiques et les ensembles climatiques du programme PICAI [96].

Recommandation 2. Simuler uniquement des bassins hydrographiques avec des débits non régularisés (c.-à-d. peu ou pas d'interventions en gestion de l'eau) qui ont des enregistrements de débit hydrométriques suffisamment longs et homogènes.

Recommandation 3. Utiliser les configurations de modèles hydrologiques du PICAI, qui sont une combinaison de modèles à grille et de sous-bassins à

des échelles spatiales relativement grossières (plus de 60 km²), pour inclure l'incertitude structurelle des modèles hydrologiques dans les courbes de limite.

Note: Si les configurations du PICAI ne sont pas prêtes à temps pour l'initiative, envisager d'établir un modèle de bassin localisé, possiblement un modèle avec plusieurs structures de modèle hydrologique (p. ex., Raven).

3.3.7 Étalonnage et validation des modèles hydrologiques

Recommandation 1. Utiliser la configuration et les étalonnages de modèle du PICAI tels quels, étant donné qu'ils ont été réalisés par des développeurs de modèles experts de partout au Canada.

Action: *Envisager d'investir dans une étude détaillée sur l'incertitude et la validation à l'échelle du Canada pour examiner le rendement à l'échelle du pays et dans les régions où des corrections peuvent être nécessaires en post-traitement.*

Recommandation 2. Signaler les statistiques d'étalonnage et de validation (c.-à-d. le débit de pointe, l'efficacité de Kling-Gupta et d'autres mesures du rendement) pour tous les bassins inclus dans l'élaboration des courbes de limite. Cibler et améliorer ou supprimer les valeurs aberrantes qui ne répondent pas aux normes minimales de fiabilité.

Action: *Pour une évaluation fondée sur les événements, inclure des signatures de débit ciblant l'estimation du débit de pointe.*

Recommandation 3. L'étalonnage du modèle pour les modèles du PICAI a été effectué à l'aide du SCDNA [49], qui est comparable aux réanalyses de l'ERA5 et du RDRS. Toute configuration ultérieure du modèle devrait être utilisée ou harmonisée avec ces jeux de données.

3.3.8 Horizons temporels pour l'augmentation de la température moyenne mondiale

Recommandation 1. Cibler des horizons temporels en périodes de 30 ans pour certains ensembles de MCM afin d'atteindre chaque incrément de la TMM (voir la figure 7) par rapport à la période de référence de 1987 à 2016.

3.3.9 Exécution des simulations

Recommandation 1. Utiliser les résultats du modèle du PICAI, qui peuvent être récupérés auprès d'ECCC et d'autres collaborateurs du projet. Des résultats sur une période de simulation allant de 1987 à 2100 sont souhaités à une échelle de temps quotidienne.

Recommandation 2. Accéder à un ensemble de MCM ou de MCR avec un nombre de membres limité, qui a déjà été évalué et dont l'échelle a déjà été réduite pour le Canada. Élaborer un ensemble suffisamment grand en sélectionnant plusieurs MCM ou plusieurs SMILE qui donnent lieu à un jeu de données d'évaluation d'au moins 1500 résultats annuels pour le débit de pointe sur une période climatique de 30 ans (p. ex., 10 MCM x 5 conditions initiales x 30 ans).

Recommandation 3. Centrer les périodes climatiques sur les incréments de la TMM en mettant l'accent sur une augmentation de la TMM de 2,0 °C.

Recommandation 4. Inclure uniquement les bassins qui sont peu affectés par les préoccupations de non-stationnarité (au-delà des changements climatiques), ce qui exclut les bassins régularisés ou les bassins présentant une importante modification de l'aménagement du territoire ou de la couverture terrestre.

3.3.10 Élaboration des courbes de limite

Recommandation 1. Élaborer des courbes de limite en exécutant l'ensemble de modèles hydrologiques forcé par l'ensemble de modèles complet sur la période de 1987 à 2100.

Recommandation 2. Évaluer chaque scénario d'émissions séparément pour mieux comprendre comment le débit de pointe d'un bassin hydrographique devrait changer au fil du temps (voir la figure 6).

Recommandation 3. Déterminer le changement du débit de pointe pour chaque incrément de la TMM par rapport à chaque bassin hydrographique à l'étude (idéalement), ou comme étape initiale (s'il n'y a pas de capacité informatique pour effectuer la diffusion par sous-bassin), par région hydrologique.

Note : Bien que l'échelle du sous-bassin soit l'approche privilégiée pour la diffusion des courbes de limite et des facteurs de changement delta, un important stockage informatique ainsi que des procédures de contrôle des révisions et une interface GIS seront nécessaires pour diffuser aux professionnels les résultats à cette résolution.

3.3.11 Estimation des facteurs de changement delta

Recommandation 1. À partir des courbes de limite, sélectionner des valeurs conservatrices (p. ex., 75^e percentile d'un grand ensemble ou 95^e percentile pour un SMILE) pour les périodes de référence et futures, respectivement, pour chaque incrément de la TMM.

Recommandation 2. Pour chaque incrément de la TMM, déterminer le changement en pourcentage le plus élevé pour le débit de pointe. Élaborer des courbes de facteur de changement delta qui représentent l'augmentation en pourcentage du débit de pointe par rapport aux conditions de base associées à chaque scénario d'émissions et pour chaque bassin hydrographique à l'étude (voir la figure 8).

3.3.12 Application des facteurs de changement delta par les professionnels

Recommandation 1. Mettre à la disposition des chercheurs et des professionnels les données utilisées pour obtenir les facteurs de changement delta à partir des courbes de limite.

Note : Les bandes de confiance ne sont pas incluses dans les tracés des facteurs de changement delta pour simplifier l'application et encourager l'uniformité par les professionnels. Toutefois, l'incertitude est explicitement démontrée jusqu'à ce que cette étape de la chaîne de modélisation puisse être facilement déterminée en examinant la courbe de limite pertinente.

Recommandation 2. Les PAD de 0,2 % à 4 % devraient être estimés par les professionnels conformément aux débits de crue nominaux prévus dans les codes directeurs, y compris le CCCPR. Les professionnels devraient estimer le débit de crue historique nominal à l'aide des méthodes applicables en fonction de l'hypothèse d'un climat stationnaire.

Recommandation 3. Les professionnels devraient appliquer les facteurs de changement delta appropriés à leurs estimations du débit de pointe historique pertinentes pour la région hydrologique en question.

Note : La détermination des facteurs de changement delta appropriés pourrait utiliser des méthodes telles que celles appliquées à l'aide de techniques régionales qui tiennent compte d'une plage de facteurs climatiques et physiographiques, y compris la taille du bassin hydrographique, l'élévation moyenne, la pente, l'aspect, la densité de drainage, etc. L'élaboration d'une trousse d'outils régionale dépasse la portée de l'initiative.

Recommandation 4. Dans les cas où les débits de pointe dans des conditions futures devraient chuter immédiatement par rapport aux conditions de la période historique de référence, appliquer un facteur de changement delta de 1,0 (c.-à-d. que les conditions actuelles représenteraient l'estimation du débit de pointe le plus élevé pendant la durée de vie nominale du pont).

Recommandation 5. Les rapports de correction I/D ne sont pas inclus dans la portée de ce rapport, mais ils devraient être appliqués par les professionnels, le cas échéant.

3.3.13 Contrôle des révisions

Recommandation 1. L'analyse des courbes de limite et des facteurs de changement delta devrait être mise à jour en même temps que chaque mise à jour majeure du CCCPR.

3.3.14 Contrôle et diffusion des données

Recommandation 1. Publier les données qui sous-tendent les analyses dans leur intégralité autant que possible (c.-à-d. les résultats du modèle) sur des sites accessibles avec contrôle des révisions pour aider les professionnels et les utilisateurs à effectuer leurs propres analyses.

Recommandation 2. Étudier les possibilités pour déterminer qui devrait payer, maintenir et soutenir le contrôle des révisions de ces données.

Recommandation 3. Établir et mener une étude de faisabilité qui met à l'essai la méthodologie adoptée du début à la fin pour une seule réalisation de MCM/SSP, et qui multiplie les exigences en matière de temps et de capacité informatique en fonction du nombre de membres de l'ensemble à adopter.

3.4 Limites et autres considérations

Bien que ce rapport présente un examen complet des pratiques exemplaires en matière d'évaluation de l'impact des changements climatiques sur l'hydrologie et plus particulièrement pour l'évaluation du débit de pointe, les recommandations des sections 3.3.1 à 3.3.14 représentent la première phase du travail nécessaire pour obtenir un jeu de données national sur les courbes de limite et les facteurs de changement delta qui aideront les professionnels à effectuer des estimations du débit de pointe pour la conception des ponts, qui tiennent compte de l'impact des changements climatiques. D'autres éléments pourraient être pris en compte dans les itérations ou révisions subséquentes de la base de données, notamment :

- La prise en compte des changements anthropiques au niveau des rivières et des bassins hydrographiques canadiens (p. ex., barrages, évacuateurs de crue, retraits et changement de l'aménagement du territoire et de la couverture terrestre);
- La prise en compte de la cause changeante du débit de pointe (c.-à-d. les mécanismes de génération du débit), y compris les changements dans la définition des zones hydrologiques (c.-à-d. de nival à pluvial);
- L'inclusion de plusieurs modèles hydrologiques pour mieux représenter diverses régions hydrologiques du

Canada et améliorer la fiabilité des résultats à l'aide de différentes structures de modèle (p. ex., ensemble du PICAI);

- L'essai de différentes ou de plusieurs techniques de correction de biais et/ou d'échelles temporelles dans l'application de la correction de biais (p. ex., annuel, saisonnier, mensuel, quotidien) pour intégrer les variations régionales dans la climatologie et la compensation du biais;
- L'élaboration d'un outil facilitant la sélection du facteur de changement delta pertinent pour la zone d'intérêt en fonction de la notation pondérée des facteurs physiographiques;
- La réalisation d'une étude détaillée sur l'incertitude et la validation à l'échelle du Canada pour examiner le rendement à l'échelle du pays et dans les régions où des corrections peuvent être nécessaires en post-traitement;
- L'estimation de l'incertitude et de l'étalonnage dans les bassins sans jaugeage (lorsqu'il n'existe pas de données hydrométriques);
- L'inclusion de données d'étalonnage spatial (p. ex., humidité du sol détectée à distance ou évapotranspiration) ou l'utilisation de signatures de débit pour améliorer le rendement de l'étalonnage du modèle et la représentation des processus qui entraînent la génération du ruissellement;
- L'élaboration de rapports I/D liés au climat futur et applicables à l'utilisation des facteurs de changement delta;
- Les données de configuration du modèle et les données simulées des séries temporelles historiques et futures pour chaque sous-bassin simulé pourraient être rendues disponibles par l'intermédiaire d'un portail de données avec une interface GIS en tant que service aux professionnels pour d'autres études d'adaptation aux changements climatiques. Cela favoriserait l'uniformité entre les professionnels et des approches pour la communauté des ressources en eau;
- Assurer le stockage et la maintenance à long terme de la base de données par une autorité responsable;
- La mise à jour des courbes de limite et des facteurs de changement delta en fonction de chaque version à venir du CCCPR, des versions du CMIP de la prochaine génération ou des changements importants dans la connaissance des sciences climatiques



« Les professionnels interrogés pour ce rapport ont convenu à l'unanimité que les lignes directrices sur la prévision des débits de pointe dans un climat futur et les données à l'appui pour réaliser ces prévisions de manière simplifiée sont essentielles pour la communauté de l'ingénierie. »

4 Conclusions

Les professionnels interrogés pour ce rapport ont convenu à l'unanimité que les lignes directrices sur la prévision des débits de pointe dans un climat futur et les données à l'appui pour réaliser ces prévisions de manière simplifiée sont essentielles pour la communauté de l'ingénierie. Les personnes interrogées ont également noté qu'une norme établie à l'échelle du Canada pour l'intégration de l'impact des changements climatiques aux évaluations du débit de pointe pour la conception des ponts serait la bienvenue dans la communauté des ressources en eau. Bien que l'objectif de l'initiative soit de simplifier la prévision des débits de pointe d'une manière qui assure une conception des ponts prudente, il est important de valoriser et d'intégrer l'expérience, les connaissances et le jugement des professionnels locaux. L'initiative devrait offrir des outils et des données qui appuient la pratique existante et s'y intègrent, plutôt que de la remplacer. On croit que l'élaboration de données, de documents d'orientation et d'outils pour soutenir la communauté des ressources en eau dans l'**application des facteurs de changement delta** permettra une estimation prudente du débit de pointe dans un contexte de changements climatiques avec des efforts raisonnables. Cette approche simplifiée et normalisée favorisera l'uniformité et la conception de ponts résilients tout en encourageant des estimations du débit de pointe plus détaillées et probablement moins conservatrices à l'aide d'approches de modélisation hydrologique spécifiques aux bassins hydrographiques.

Ce rapport visait à élaborer une stratégie pour un **jeu de données national sur les courbes de limite** à partir desquelles les changements potentiels du débit de pointe

dans un climat futur pourraient être calculés sous forme de facteurs de changement delta. Bien que l'effort soit considérable, il peut être possible de créer ce jeu de données à l'échelle nationale. Les facteurs de changement delta pourraient être estimés à partir des courbes de limite spécifiques aux bassins hydrographiques, lesquelles pourraient ensuite être appliquées aux estimations du débit de pointe historique à partir d'une analyse des valeurs extrêmes calculées par les professionnels. Les éléments clés nécessaires à l'élaboration d'un jeu de données national sur les courbes de limite comprennent :

- la sélection d'un ensemble de modèles climatiques à biais corrigé et à échelle réduite pour le Canada, qui comprend des scénarios d'émissions et des membres ;
- l'examen d'une délimitation prédéfinie des bassins ou des zones hydrologiques à l'échelle du Canada pour tenir compte de caractéristiques climatiques et hydrologiques uniques, ce qui facilitera la sélection des modèles hydrologiques ;
- l'exploitation des configurations des modèles hydrologiques existants à l'échelle du Canada pour la simulation du débit de cours d'eau, en mettant l'accent sur la simulation du débit de pointe. Cela se limite aux conditions du débit naturel et naturalisé lorsque des données d'observation historiques existent pour chaque région hydrologique partout au Canada ;
- l'étalonnage et la vérification des modèles hydrologiques par rapport aux enregistrements observés ainsi que la confirmation du rendement des modèles au cours de la période historique par comparaison avec les jeux de données de réanalyse ;

- l'exécution de simulations hydrologiques avec forçage des variables climatiques sur un horizon temporel historique et futur (p. ex., de 1987 à 2100);
- la détermination des cadres temporels pour atteindre les incréments de la TMM en mettant l'accent sur une TMM de 2 °C dans divers scénarios d'émissions;
- l'élaboration de courbes de limite qui tracent les débits de pointe annuels pour les périodes historiques et futures de chaque bassin hydrographique représentant les régions du Canada. Les courbes de limite incluraient la plage d'incertitude sur la période modélisée;
- l'élaboration de tracés de facteurs de changement delta en sélectionnant des valeurs conservatrices (p. ex., les bandes de confiance du 25^e percentile et du 75^e percentile) pour le climat actuel et futur, respectivement, et en indiquant le facteur de changement delta (c.-à-d. le changement en pourcentage du débit de pointe) sur une plage d'incrément de la TMM. Un facteur de changement delta clé s'appliquerait à une augmentation de la TMM de 2 °C;
- la recommandation aux professionnels d'estimer les débits de pointe historiques pour vérifier les débits de crue nominaux allant de 0,2 % à 4 %, selon les exigences des versions futures du CCCPR;
- la recommandation aux professionnels d'appliquer les facteurs de changement delta pertinents pour la région hydrologique et d'autres variables pertinentes. En tenant compte des conditions actuelles, les facteurs de changement delta ne seraient pas inférieurs à 1,0;
- la recommandation aux professionnels de tenir compte d'une variété de répercussions hydrologiques, y compris la régularisation du débit, la non-stationnarité des bassins hydrographiques (en plus des changements climatiques) et les corrections pour tenir compte des débits instantanés;
- la réalisation d'une étude de faisabilité selon l'approche décrite ci-dessus pour assurer la viabilité, la capacité informatique et la commodité aux fins de génération et de diffusion de ces données.

La sélection de facteurs de changement delta à partir des figures et des données fournies dans le cadre de l'initiative demeurera la responsabilité du professionnel, en fonction de la sélection de la région hydrologique pertinente et de l'incrément de la TMM. De plus, lors de

la sélection du facteur de changement delta approprié, les professionnels devraient envisager des approches semblables à celles de l'AFC régionale qui comprennent une variété de caractéristiques physiographiques, comme la zone du bassin hydrographique, l'aspect, l'élévation moyenne, la pente et la densité de drainage. Le facteur de changement delta sélectionné serait appliqué à l'estimation du débit de pointe historique réalisée par le professionnel à l'aide de méthodes hydrologiques classiques tout en tenant compte des limites ou des pratiques exemplaires élaborées dans le cadre de l'initiative.

Dans des bassins hydrographiques précis de diverses régions hydrologiques partout au Canada, les estimations du débit de pointe peuvent afficher une tendance à la baisse immédiatement ou à l'avenir en raison des changements climatiques. Des facteurs de changement delta négatifs pourraient en résulter, ce qui, s'ils sont appliqués, ferait en sorte que la conception de nouveaux ponts serait d'emblée inadéquate pour les conditions actuelles. Pour cette raison, il sera important de déterminer à quel moment les débits de pointe les plus élevés devraient se produire ainsi que leurs valeurs respectives. En fin de compte, les débits de crue nominaux sélectionnés seraient fondés sur les pires conditions, que ce soit au cours de la période actuelle ou future.

Le stockage et la maintenance à long terme de la base de données nécessiteront un investissement continu de la part de l'autorité ou de l'organisme responsable. L'accessibilité, la reproductibilité et l'analyse comparative (au moyen du contrôle des révisions des courbes de limite et des facteurs de changement delta) seront d'importantes considérations futures à prendre en compte pour maintenir l'uniformité et l'utilisabilité des données.

4.1 Avantages pour les professionnels et les propriétaires

Dans un climat futur, les modifications temporelles et spatiales des caractéristiques des précipitations, de la fonte des neiges et de la pluie sur la neige pourraient entraîner des changements importants dans les estimations du débit de pointe ainsi que des changements dans les mécanismes de génération des crues. Par conséquent, pour les plus petits bassins hydrographiques non dominés par les pluies et pour les plus grands bassins hydrographiques, une modélisation hydrologique est nécessaire pour estimer le débit de pointe. Cela pourrait être une entreprise importante; le

niveau d'effort pour construire et analyser un modèle hydrologique de bassin hydrographique axé sur le climat peut ne pas être proportionnel au risque imposé sur le pont en question.

La recherche effectuée pour ce rapport a mis en œuvre une approche fondée sur les données, en établissant des estimations conservatrices de la limite supérieure pour l'estimation du débit de pointe, qui pourrait être appliquée à l'analyse de fréquence à l'aide de procédures hydrologiques classiques. Malgré le fait que les changements climatiques puissent entraîner la transition des bassins hydrographiques vers un nouveau paradigme qui n'est pas représenté dans les enregistrements historiques, une base de données conçue spécialement pour les valeurs de limite pourrait soutenir les estimations du débit de pointe dans un climat futur en appliquant aux estimations du débit de pointe des facteurs de changement delta calculés à partir des enregistrements historiques. En l'absence de cet outil, les propriétaires et les professionnels des ressources en eau devront élaborer et étalonner des modèles hydrologiques spécifiques aux bassins hydrographiques et effectuer une évaluation hydrologique approfondie sur la période historique et future. Ce type d'évaluation peut dépasser la capacité de l'industrie et ne pas être proportionnel à la portée d'un projet et à son profil de risque.

L'élaboration proposée pour les courbes de limite et les facteurs de changement delta permettra aux propriétaires et aux professionnels d'utiliser une approche simplifiée qui repose sur les méthodes hydrologiques classiques et les enregistrements historiques, bien qu'elle soit au détriment d'une conception plus conservatrice. Il revient donc au propriétaire de soutenir le professionnel dans la réalisation d'une étude plus approfondie, ce qui pourrait généralement entraîner une conception moins conservatrice et, par conséquent, réduire les coûts de construction et de maintenance. L'investissement dans l'initiative continuera de combler l'écart entre les connaissances scientifiques et l'application de ces principes dans la pratique.

Les courbes de limite et les facteurs de changement delta connexes ne visent pas à remplacer l'expertise hydrologique locale, mais plutôt à la soutenir. Cela pourrait être réalisé comme suit :

1. Exiger que le personnel qualifié utilise des méthodes hydrologiques classiques pour que l'AFC puisse produire ses propres estimations sur les débits de pointe historiques;
2. Utiliser des courbes de limite et appliquer des facteurs de changement delta pour estimer les débits de pointe dans les conditions futures;
3. Encourager les propriétaires et les professionnels à effectuer des évaluations hydrologiques spécifiques aux bassins hydrographiques.

L'«encouragement» noté au point 3 serait réalisé grâce aux économies potentielles dans les coûts de construction, d'exploitation et de maintenance des ponts résultant de l'application d'estimations du débit de pointe moins conservatrices et par l'examen de complexités hydrologiques qui pourraient régir la conception, comme la dépendance à la régularisation du débit.

Cette approche offre aux professionnels le plus de souplesse possible dans l'utilisation des données appropriées spécifiques au site pour obtenir des estimations du débit de pointe historique pour les crues nominales, mais elle applique également une norme uniforme à l'échelle du Canada pour corriger ces valeurs nominales en fonction des changements climatiques. De plus, elle tire parti des pratiques exemplaires actuelles dans la documentation relative à l'évaluation de l'impact des changements climatiques sans que les professionnels n'aient à effectuer eux-mêmes des travaux de recherche et de développement approfondis, ce qui permet de tenir compte des valeurs du débit de pointe influencées par le climat dans le cadre typique des contraintes liées au budget et à la portée du travail. Enfin, cette approche permet de maintenir les connaissances des professionnels et les connaissances locales sur les bassins hydrographiques et les paysages, y compris la compréhension des contrôles régionaux et des différences dans les mécanismes de génération des crues, les effets conjugués dus à la dynamique des conditions météorologiques, les conditions antérieures, les zones à contribution dynamique et le routage du débit, en laissant l'estimation des débits de pointe nominaux entre les mains des professionnels et des organismes locaux.

Références

- [1] Association canadienne de normalisation. *Code canadien sur le calcul des ponts routiers*, CSA S6, Association canadienne de normalisation, Toronto (Ontario) Canada, 2019. [En ligne]. Disponible : <https://www.csagroup.org/fr/store/product/CSA%20S6%3A19>
- [2] Ingénieurs Canada. *Public guideline: Principles of climate adaptation and mitigation for engineers*, Engineers Canada, Ottawa (Ontario) Canada, mai 2018, 29 p. [En ligne]. Disponible : <https://engineerscanada.ca/public-guideline-principles-of-climate-adaptation-and-mitigation-for-engineers>
- [3] Association canadienne de normalisation. *Commentary on CSA S6.1:19, Canadian highway and bridge design code*, Canadian Standards Association, Toronto (Ontario) Canada, 2019, 1 093 p. [En ligne]. Disponible : <https://www.csagroup.org/store/product/CSA%20S6.1%3A19>
- [4] L. MacTavish, G. Bourgeois, C. Lafleur et E. Ristic. *Adaptation aux changements climatiques pour les barrages : Un examen des vulnérabilités climatiques, des mesures d'adaptation et des occasions de croissance dans le contexte des barrages canadiens*, Association canadienne de normalisation, Toronto (Ontario), février 2022, 57 p. [En ligne]. Disponible : <https://www.csagroup.org/article/research/climate-change-adaptation-for-dams>
- [5] Association canadienne de normalisation. Guide technique : *Élaboration, interprétation et utilisation de l'information relative à l'intensité, à la durée et à la fréquence (IDF) des chutes de pluie : guide à l'intention des spécialistes canadiens en matière de ressources en eau*, CSA PLUS 4103, Association canadienne de normalisation, Toronto (Ontario) Canada, 2019, 147 p. [En ligne]. Disponible : <https://www.csagroup.org/fr/store/product/CSA%20PLUS%204103:19/>
- [6] D. Kennedy, H.-P. Hong, J. Fyke et D. Gagnon. *Climate change provisions for CSA S6:25 Canadian Highway Bridge Design Code: findings and recommendations*, Association canadienne de normalisation, Toronto (Ontario) Canada, mars 2022 79 p. [En ligne]. Disponible : <https://www.csagroup.org/article/research/climate-change-provisions-for-csa-s625-canadian-highway-bridge-design-code-findings-and-recommendations/>
- [7] T. A. Stadnyk et S. J. Déry. "Canadian continental-scale hydrology under a changing climate: A review," *Water*, vol. 13, n° 7, p. 906, mars 2021. doi : 10.3390/w13070906.
- [8] E. Bush et D. S. Lemmen, éditeurs. *Rapport sur le climat changeant du Canada*, gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 2019, 446 p. [En ligne]. Disponible : <https://changingclimate.ca/CCCR2019/>
- [9] R. Arsenault, R. Bazile, C. Ouellet Dallaire et F. Brisette. "CANOPEX: A Canadian hydrometeorological watershed database," *Hydrological Processes*, vol. 30, n° 15, p. 2734-2736, juillet 2016. doi : 10.1002/hyp.10880.
- [10] Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. "Summary for policymakers," *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution du Groupe de travail I au sixième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*. V. Masson-Delmotte et coll., éditeurs, Cambridge, Royaume-Uni : Cambridge University Press, 2021, p. 3-32. [En ligne]. Disponible : <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/summary-for-policymakers/>
- [11] Gouvernement du Canada. « Données et scénarios climatiques canadiens. » [En ligne]. Disponible : <https://scenarios-climatiques.canada.ca/>

- [12] Union européenne. "Copernicus climate change service." [En ligne]. Disponible : <https://climate.copernicus.eu/> (Consulté le 3 août 2023)
- [13] M. Braun, A. N. Thiombiano, M. J. F. Vieira et T. A. Stadnyk. "Representing climate evolution in ensembles of GCM simulations for the Hudson Bay System," *Elementa: Science of the Anthropocene*, vol. 9, n° 1, juillet 2021, 19 p. doi : 10.1525/elementa.2021.00011.
- [14] M. Durocher, D. H. Burn et S. Mosto. "A nationwide regional flood frequency analysis at ungauged sites using ROI/GLS with copulas and super regions," *Journal of Hydrology*, vol. 567, p. 191-202, décembre 2018. doi : 10.1016/j.jhydrol.2018.10.011.
- [15] D. H. Burn et M. A. Hag Elnur. "Detection of hydrologic trends and variability," *Journal of Hydrology*, vol. 255, n° 1-4, p. 107-122, janvier 2002. doi : 10.1016/S0022-1694(01)00514-5.
- [16] M. K. MacDonald et coll. "Impacts of 1.5 and 2.0 °C warming on pan-Arctic river discharge into the Hudson Bay Complex through 2070," *Geophysical Research Letters*, vol. 45, n° 15, p. 7561-7570, août 2018. doi : 10.1029/2018GL079147.
- [17] Gouvernement du Canada. « Centre canadien des services climatiques. » [En ligne]. Disponible : <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/changements-climatiques/centre-canadien-services-climatiques.html> (Consulté le 5 août 2023)
- [18] N. C. Swart et coll. "The Canadian Earth System Model version 5 (CanESM5.0.3)," *Geoscientific Model Development*, vol. 12, n° 11, p. 4823-4873, novembre 2019. doi : 10.5194/gmd-12-4823-2019.
- [19] S. R. Sobie, F. W. Zwiers et C. L. Curry. "Climate model projections for Canada: A comparison of CMIP5 and CMIP6," *Atmosphere-Ocean*, vol. 59, n° 4-5, p. 269-284, octobre 2021. doi : 10.1080/07055900.2021.2011103.
- [20] J. Chen, R. Arsenault, F. P. Brissette et S. Zhang. "Climate change impact studies: Should we bias correct climate model outputs or post-process impact model outputs?" *Water Resources Research*, vol. 57, n° 5, mai 2021, art. n° e2020WR028638. doi : 10.1029/2020WR028638.
- [21] C. Teutschbein et J. Seibert. "Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods," *Journal of Hydrology*, vol. 456-457, p. 12-29, août 2012. doi : 10.1016/j.jhydrol.2012.05.052.
- [22] S. Pokorny, T. A. Stadnyk, G. Ali, R. Lilhare, S. J. Déry et K. Koenig. "Cumulative effects of uncertainty on simulated streamflow in a hydrologic modeling environment," *Elementa: Science of the Anthropocene*, vol. 9, n° 1, janvier 2021. doi : 10.1525/elementa.431.
- [23] L. S. Matott, J. E. Babendreier et S. T. Purucker. "Evaluating uncertainty in integrated environmental models: A review of concepts and tools," *Water Resources Research*, vol. 45, n° 6, 2009, art. n° W06421. doi : 10.1029/2008WR007301.
- [24] M. P. Clark et coll. "A unified approach for process-based hydrologic modeling: 1. Modeling concept," *Water Resources Research*, vol. 51, n° 4, p. 2498-2514, avril 2015. doi : 10.1002/2015WR017198.
- [25] G. Kuczera. "Improved parameter inference in catchment models: 1. Evaluating parameter uncertainty," *Water Resources Research*, vol. 19, n° 5, p. 1151-1162, octobre 1983. doi : 10.1029/WR019i005p01151.

- [26] E. F. Wood. "An analysis of the effects of parameter uncertainty in deterministic hydrologic models," *Water Resources Research*, vol. 12, n° 5, p. 925-932, octobre 1976. doi : 10.1029/WR012i005p00925.
- [27] M. D. Mastrandrea et coll. *Guidance note for lead authors of the IPCC Fifth Assessment Report on consistent treatment of uncertainties*, Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Genève, Suisse, novembre 2010, 6 p. [En ligne]. Disponible : https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2017/08/AR5_Uncertainty_Guidance_Note.pdf
- [28] Environnement et Changement climatique Canada. *Bâtiments et infrastructures publiques de base résistants aux changements climatiques : Résumé en langage clair*, Environnement et Changement climatique Canada, Ottawa (Ontario) Canada, juillet 2021, 22 p. [En ligne]. Disponible : <https://scenarios-climatiques.canada.ca/index.php?page=CRBCPI-general-summary>
- [29] A. J. Cannon, D. I. Jeong, X. Zhang et F. W. Zwiers. *Bâtiments et infrastructures publiques de base résistants aux changements climatiques : Évaluation des effets des changements climatiques sur les données de conception climatique au Canada*, Environnement et Changement climatique Canada, Ottawa (Ontario) Canada, 2020, 122 p. [En ligne]. Disponible : <https://publications.gc.ca/site/fra/9.893023/publication.html>
- [30] Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. "Technical summary," *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution du Groupe de travail I au sixième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*. V. Masson-Delmotte et coll., éditeurs. Cambridge, Royaume-Uni : Cambridge University Press, 2023, p. 35-144. doi : 10.1017/9781009157896.002.
- [31] M. N. Khaliq. *An inventory of methods for estimating climate change-informed design water levels for floodplain mapping*, Conseil national de recherches du Canada, Ottawa (Ontario) Canada, réf. NRC-OCRE-2019-TR-0112019, 118 p. doi : 10.4224/40001231.
- [32] Z. Hausfather, K. Marvel, G. A. Schmidt, J. W. Nielsen-Gammon et M. Zelinka. "Climate simulations: Recognize the 'hot model' problem," *Nature*, vol. 605, p. 26-29, mai 2022. doi : 10.1038/d41586-022-01192-2.
- [33] N. Maher, S. Milinski et R. Ludwig. "Large ensemble climate model simulations: Introduction, overview et future prospects for utilising multiple types of large ensemble," *Earth System Dynamics*, vol. 12, n° 2, p. 401-418, avril 2021. doi : 10.5194/esd-12-401-2021.
- [34] A. J. Cannon. "Selecting GCM scenarios that span the range of changes in a multimodel ensemble: Application to CMIP5 climate extremes indices," *Journal of Climate*, vol. 28, n° 3, p. 1260-1267, février 2015. doi : 10.1175/JCLI-D-14-00636.1.
- [35] A. J. Cannon, S. R. Sobie et T. Q. Murdock. "Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes?" *Journal of Climate*, vol. 28, n° 17, p. 6938-6959, septembre 2015. doi : 10.1175/JCLI-D-14-00754.1.
- [36] R. Laprise. "Regional climate modelling," *Journal of Computational Physics*, vol. 227, n° 7, p. 3641-3666, mars 2008. doi : 10.1016/j.jcp.2006.10.024.
- [37] R. L. Wilby, C. W. Dawson et E. M. Barrow. "SDSM — a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts," *Environmental Modelling & Software*, vol. 17, n° 2, p. 145-157, 2002. doi : 10.1016/S1364-8152(01)00060-3.

- [38] J. Chen, F. P. Brissette, A. Poulin et R. Leconte. "Overall uncertainty study of the hydrological impacts of climate change for a Canadian watershed," *Water Resources Research*, vol. 47, n° 12, décembre 2011. doi : 10.1029/2011WR010602.
- [39] H. Singh et M. Reza Najafi. "Evaluation of gridded climate datasets over Canada using univariate and bivariate approaches: Implications for hydrological modelling," *Journal of Hydrology*, vol. 584, mai 2020, art. n° 124673. doi : 10.1016/j.jhydrol.2020.124673.
- [40] C. R. Rajulapati et S. M. Papalexiou. "Precipitation bias correction: A novel semi-parametric quantile mapping method," *Earth and Space Science*, vol. 10, n° 4, avril 2023, art. n° e2023EA002823. doi : 10.1029/2023EA002823.
- [41] M. Leduc et coll. "The ClimEx Project: A 50-member ensemble of climate change projections at 12-km resolution over Europe and Northeastern North America with the Canadian Regional Climate model (CRCM5)," *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 58, n° 4, p. 663-693, avril 2019. doi : 10.1175/JAMC-D-18-00211.
- [42] Ouranos. « La génération de modèles climatiques CMIP6 maintenant disponible sur Portraits climatiques. » [En ligne]. Disponible : <https://www.ouranos.ca/fr/actualites/2023-06-29/la-generation-de-modeles-climatiques-cmip6-maintenant-disponible-sur-portraits> (Consulté le 5 août 2023)
- [43] Pacific Climate Impacts Consortium. "Downscaled CMIP6 climate scenarios now available." [En ligne]. Disponible : <https://pacificclimate.org/news-and-events/news/2021/downscaled-cmip6-climate-scenarios-now-available> (Consulté le 5 août 2023)
- [44] J. Chen, F. P. Brissette, D. Chaumont et M. Braun. "Finding appropriate bias correction methods in downscaling precipitation for hydrologic impact studies over North America," *Water Resources Research*, vol. 49, n° 7, p. 4187-4205, juillet 2013. doi : 10.1002/wrcr.20331.
- [45] A. J. Cannon. "Multivariate quantile mapping bias correction: an N-dimensional probability density function transform for climate model simulations of multiple variables," *Climate Dynamics*, vol. 50, p. 31-49, janvier 2018. doi : 10.1007/s00382-017-3580-6.
- [46] E. Probst et W. Mauser. "Evaluation of ERA5 and WFDE5 forcing data for hydrological modelling and the impact of bias correction with regional climatologies: A case study in the Danube River Basin," *Journal of Hydrology: Regional Studies*, vol. 40, avril 2022, art. n° 101023. doi : 10.1016/j.ejrh.2022.101023.
- [47] P. Berg, F. Almén et D. Bozhinova. "HydroGFD3.0 (Hydrological Global Forcing Data): A 25 km global precipitation and temperature data set updated in near-real time," *Earth System Science Data*, vol. 13, n° 4, p. 1531-1545, avril 2021. doi : 10.5194/essd-13-1531-2021.
- [48] T. A. Stadnyk et coll. "Changing freshwater contributions to the Arctic: A 90-year trend analysis (1981-2070)," *Elementa: Science of the Anthropocene*, vol. 9, n° 1, mai 2021. doi : 10.1525/elementa.2020.00098.
- [49] G. Tang et coll. "SCDNA: A serially complete precipitation and temperature dataset for North America from 1979 to 2018," *Earth System Science Data*, vol. 12, n° 4, p. 2381-2409, octobre 2020. doi : 10.5194/essd-12-2381-2020.
- [50] Gouvernement du Canada. « Documentation technique : Analyse régionale déterministe de précipitations. » [En ligne]. Disponible : <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/changements-climatiques/centre-canadien-services-climatiques/afficher-telecharger/documentation-technique-analyse-regionale-precipitations.html> (Consulté le 12 décembre 2023)

- [51] R. A. Lane, G. Coxon, J. Freer, J. Seibert et T. Wagener. "A large-sample investigation into uncertain climate change impacts on high flows across Great Britain," *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 26, n° 21, p. 5535-5554, novembre 2022. doi : 10.5194/hess-26-5535-2022.
- [52] H. Meresa, B. Tischbein et T. Mekonnen. "Climate change impact on extreme precipitation and peak flood magnitude and frequency: Observations from CMIP6 and hydrological models," *Natural Hazards*, vol. 111, p. 2649-2679, avril 2022. doi : 10.1007/s11069-021-05152-3.
- [53] Q. Guo, J. Chen, X. J. Zhang, C.-Y. Xu et H. Chen. "Impacts of using state-of-the-art multivariate bias correction methods on hydrological modeling over North America," *Water Resources Research*, vol. 56, n° 5, mai 2020, art. n° e2019WR026659. doi : 10.1029/2019WR026659.
- [54] J. A. Velázquez et coll. "An ensemble approach to assess hydrological models' contribution to uncertainties in the analysis of climate change impact on water resources," *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 17, n° 2, p. 565-578, février 2013. doi : 10.5194/hess-17-565-2013.
- [55] J. J. Gibson, T. Holmes, T. A. Stadnyk, S. J. Birks, P. Eby et A. Pietroniro. "Isotopic constraints on water balance and evapotranspiration partitioning in gauged watersheds across Canada," *Journal of Hydrology: Regional Studies*, vol. 37, octobre 2021, art. n° 100878. doi : 10.1016/j.ejrh.2021.100878.
- [56] S. Hagemann et coll. "Climate change impact on available water resources obtained using multiple global climate and hydrology models," *Earth System Dynamics*, vol. 4, n° 1, p. 129-144, mai 2013. doi : 10.5194/esd-4-129-2013.
- [57] C. Guay, M. Minville et M. Braun. "A global portrait of hydrological changes at the 2050 horizon for the province of Québec," *Canadian Water Resources Journal*, vol. 40, n° 3, p. 285-302, 2015. doi : 10.1080/07011784.2015.1043583.
- [58] V. Krysanova et coll. "How the performance of hydrological models relates to credibility of projections under climate change," *Hydrological Sciences Journal*, vol. 63, n° 5, p. 696-720, avril 2018. doi : 10.1080/02626667.2018.1446214.
- [59] A. J. Newman, N. Mizukami, M. P. Clark, A. W. Wood, B. Nijssen et G. Nearing. "Benchmarking of a physically based hydrologic model," *Journal of Hydrometeorology*, vol. 18, n° 8, p. 2215-2225, août 2017. doi : 10.1175/JHM-D-16-0284.1.
- [60] K. Beven. "Benchmarking hydrological models for an uncertain future," *Hydrological Processes*, vol. 37, n° 5, mai 2023, art. n° e14882. doi : 10.1002/hyp.14882.
- [61] R. Lilhare, S. Pokorny, S. J. Déry, T. A. Stadnyk et K. A. Koenig. "Sensitivity analysis and uncertainty assessment in water budgets simulated by the variable infiltration capacity model for Canadian subarctic watersheds," *Hydrological Processes*, vol. 34, n° 9, p. 2057-2075, avril 2020. doi : 10.1002/hyp.13711.
- [62] J. W. Pomeroy et coll. "The cold regions hydrological modelling platform for hydrological diagnosis and prediction based on process understanding," *Journal of Hydrology*, vol. 615, décembre 2022, art. n° 128711. doi : 10.1016/j.jhydrol.2022.128711.
- [63] A. Poulin, F. Brissette, R. Leconte, R. Arsenault et J.-S. Malo. "Uncertainty of hydrological modelling in climate change impact studies in a Canadian, snow-dominated river basin," *Journal of Hydrology*, vol. 409, n° 3-4, p. 626-636, novembre 2011. doi : 10.1016/j.jhydrol.2011.08.057.
- [64] D. B. Wijayarathne et P. Coulibaly. "Identification of hydrological models for operational flood forecasting in St. John's, Newfoundland, Canada," *Journal of Hydrology: Regional Studies*, vol. 27, février 2020, art. n° 100646. doi : 10.1016/j.ejrh.2019.100646.

- [65] J. Mai et coll. "The Great Lakes Runoff Intercomparison Project Phase 4: The Great Lakes (GRIP-GL)," *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 26, n° 13, p. 3537-3572, juillet 2022. doi : 10.5194/hess-26-3537-2022.
- [66] J. Mai et coll. "Great Lakes Runoff Intercomparison Project Phase 3: Lake Erie (GRIP-E)," *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 26, n° 9, septembre 2021, art. n° 05021020. doi : 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0002097.
- [67] M. I. Ahmed et coll. "Learning from hydrological models' challenges: A case study from the Nelson basin model intercomparison project," *Journal of Hydrology*, vol. 623, août 2023, art. n° 129820. doi : 10.1016/j.jhydrol.2023.129820.
- [68] R. Arsenault, J. L. Martel, F. Brunet, F. Brissette et J. Mai. "Continuous streamflow prediction in ungauged basins: Long short-term memory neural networks clearly outperform traditional hydrological models," *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 27, n° 1, p. 139-157, janvier 2023. doi : 10.5194/hess-27-139-2023.
- [69] R. R. Shrestha, A. J. Cannon, M. A. Schnorbus et F. W. Zwiers. "Projecting future nonstationary extreme streamflow for the Fraser River, Canada," *Climate Change*, vol. 145, n° 3-4, p. 289-303, décembre 2017. doi : 10.1007/s10584-017-2098-6.
- [70] T. A. Stadnyk et coll. "Hydrological modeling of freshwater discharge into Hudson Bay using HYPE," *Elementa: Science of the Anthropocene*, vol. 8, janvier 2020, art. n° 43. doi : 10.1525/elementa.439.
- [71] J. R. Craig et coll. "Flexible watershed simulation with the Raven hydrological modelling framework," *Environmental Modelling & Software*, vol. 129, juillet 2020, art. n° 104728. doi : 10.1016/j.envsoft.2020.104728.
- [72] HydroSHEDS. "About." [En ligne]. Disponible : <https://www.hydrosheds.org>
- [73] MERIT Hydro. "Global hydrography datasets." [En ligne]. Disponible : http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/~yamada/merit_hydro/
- [74] Agence spatiale européenne. "ESA CCI land cover website." [En ligne]. Disponible : <https://www.esa-landcover-cci.org>
- [75] NASA. "LDAS: Land Data Assimilation System." [En ligne]. Disponible : <https://ldas.gsfc.nasa.gov/data>
- [76] F. Zhao et coll. "The critical role of the routing scheme in simulating peak river discharge in global hydrological models," *Environmental Research Letters*, vol. 12, n° 7, juin 2017, art. n° 075003. doi : 10.1088/1748-9326/aa7250.
- [77] A. A. G. Tefs. *Simulating hydroelectric regulation and climate change in the Hudson Bay drainage basin*, thèse de maîtrise, Département de génie civil, Université du Manitoba, Winnipeg, MB, Canada, 2018, 183 p. [En ligne]. Disponible : <http://hdl.handle.net/1993/33613>
- [78] S. Pokorny, T. A. Stadnyk, R. Lilhare, G. Ali, S. J. Déry et K. Koenig. "Use of ensemble-based gridded precipitation products for assessing input data uncertainty prior to hydrologic modeling," *Water*, vol. 12, n° 10, 2020, art. n° 2751. doi : 10.3390/w12102751.
- [79] M. Tarek, F. P. Brissette et R. Arsenault. "Evaluation of the ERA5 reanalysis as a potential reference dataset for hydrological modelling over North America," *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 24, n° 5, p. 2527-2544, mai 2020. doi : 10.5194/hess-24-2527-2020.
- [80] Gouvernement du Canada. « Niveau d'eau et débit. » [En ligne]. Disponible : https://eau.ec.gc.ca/index_f.html (Consulté le 31 juillet 2022)

- [81] World Meteorological Organization. "New WHYCOS strategy." [En ligne]. Disponible : <https://hydrohub.wmo.int/en/new-whycos-strategy> (Consulté le 5 août 2023)
- [82] P. Spellman, V. Webster et D. Watkins. "Bias correcting instantaneous peak flows generated using a continuous, semi-distributed hydrologic model," *Journal of Flood Risk Management*, vol. 11, n° 4, décembre 2018, art. n° e12342. doi : 10.1111/jfr3.12342.
- [83] Ressources naturelles Canada. *Procédures hydrologiques et hydrauliques fédérales pour la délimitation des zones inondables*, Version 1.0, Ressources naturelles Canada, Ottawa (Ontario) Canada, 2019, 90 p. [En ligne]. Disponible : https://publications.gc.ca/collections/collection_2020/rncan-nrcan/m45/M45-113-2019-fra.pdf
- [84] NSERC FloodNet. "FloodNet." [En ligne]. Disponible : <https://www.nsercfloodnet.ca>
- [85] Z. Zhang, T. A. Stadnyk et D. H. Burn. "Identification of a preferred statistical distribution for at-site flood frequency analysis in Canada," *Canadian Water Resources Journal*, vol. 45, n° 1, p. 43-58, janvier 2020. doi : 10.1080/07011784.2019.1691942.
- [86] Z. Zhang et T. A. Stadnyk. "Investigation of attributes for identifying homogeneous flood regions for regional flood frequency analysis in Canada," *Water*, vol. 12, n° 9, septembre 2020, art. n° 2570. doi : 10.3390/w12092570.
- [87] C. T. Vidrio-Sahagún et J. He. "The decomposition-based nonstationary flood frequency analysis," *Journal of Hydrology*, vol. 612, septembre 2022, art. n° 128186. doi : 10.1016/j.jhydrol.2022.128186.
- [88] M. J. Machado, B. A. Botero, J. López, F. Francés, A. Díez-Herrero et G. Benito. "Flood frequency analysis of historical flood data under stationary and non-stationary modelling," *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 19, n° 6, p. 2561-2576, juin 2015. doi : 10.5194/hess-19-2561-2015.
- [89] J. M. Cunderlik et D. H. Burn. "Non-stationary pooled flood frequency analysis," *Journal of Hydrology*, vol. 276, n° 1-4, p. 210-223, mai 2003. doi : 10.1016/S0022-1694(03)00062-3.
- [90] Z. Micovic, M. G. Schaefer et G. H. Taylor. "Uncertainty analysis for Probable Maximum Precipitation estimates," *Journal of Hydrology*, vol. 521, p. 360-373, février 2015. doi : 10.1016/j.jhydrol.2014.12.033.
- [91] D. Huard, J. Clavet-Gaumont, P. Slota, K. Kornelsen et C. Poirier. *Analyse de fréquence des crues et sécurité des barrages*, Ouranos, Montréal (Québec), Canada, 2021, 44 p. [En ligne]. Disponible : <https://www.ouranos.ca/sites/default/files/2022-07/proj-201419-energie-koenig-rapportfinal.pdf>
- [92] N. P. Gillett et coll. "Human influence on the 2021 British Columbia floods," *Weather and Climate Extremes*, vol. 36, juin 2022, art. n° 100441. doi : 10.1016/j.wace.2022.100441.
- [93] S. Ashraf Vaghefi, M. Iravani, D. Sauchyn, Y. Andreichuk, G. Goss et M. Faramarzi. "Regionalization and parameterization of a hydrologic model significantly affect the cascade of uncertainty in climate-impact projections," *Climate Dynamics*, vol. 53, n° 5-6, p. 2861-2886, septembre 2019. doi : 10.1007/s00382-019-04664-w.
- [94] M. P. Clark et coll. "Characterizing uncertainty of the hydrologic impacts of climate change," *Current Climate Change Reports*, vol. 2, n° 2, p. 55-64, 2016. doi : 10.1007/s40641-016-0034-x.
- [95] M. D. Mastrandrea et coll. "The IPCC AR5 guidance note on consistent treatment of uncertainties: a common approach across the working groups," *Climate Change*, vol. 108, n° 4, p. 675-691, octobre 2011. doi : 10.1007/s10584-011-0178-6.

- [96] Gouvernement du Canada. « Programme d'identification et de cartographie des aléas d'inondation. » [En ligne]. Disponible : <https://ressources-naturelles.canada.ca/le-bureau-de-la-scientifique-principale/science-et-recherche/dangers-naturels/programme-didentification-et-de-cartographie-des-aleas-dinondation/24046> (Consulté le 5 août 2023)
- [97] FloodNet. "FloodNet Regional Frequency Analysis R-package." [En ligne]. Disponible : <https://rdr.io/github/floodnetProject16/floodnetRfa> (Consulté le 12 décembre 2023)
- [98] S. Mostofi Zadeh, D. H. Burn et N. O'Brien. "Detection of trends in flood magnitude and frequency in Canada," *Journal of Hydrology : Regional Studies*, vol. 28, avril 2020, art. n° 100673. doi : 10.1016/j.ejrh.2020.100673.
- [99] University of Saskatchewan. "Global Water Futures." [En ligne]. Disponible : <https://gwf.usask.ca>
- [100] Ouranos. « ESPO-G ESPO-G6-R2 : Ensemble de simulations post-traitées d'Ouranos - modèles globaux CMIP6 - RDRS v2.1/Ouranos Ensemble of Bias-adjusted Simulations - Global models CMIP6 - RDRS v2.1, » Ouranos, Montréal (Québec) Canada, 2023. [En ligne]. Disponible : <https://github.com/Ouranosinc/ESPO-G>
- [101] J. Lavoie et coll. « ESPO-G6-E5L : Ensemble de simulations post-traitées d'Ouranos - modèles globaux CMIP6 - ERA5-Land/Ouranos Ensemble of Bias-adjusted Simulations - Global Models CMIP6 - ERA5-Land, » Ouranos, Montréal (Québec) Canada, mars 2023. [En ligne]. Disponible : <https://zenodo.org/record/7764929> (Consulté le 5 août 2023)
- [102] P. Bourgault, T. Logan, J. Lavoie et M. Leduc. "Climate Portraits version 2.0: Technical note on projections of daily freeze-thaw cycles," Ouranos, Montréal (Québec) Canada, 2023, 10 p. [En ligne]. Disponible : https://pavics.ouranos.ca/pc-extra/config/gel_degel_en.pdf
- [103] University of Saskatchewan. "Global Water Futures: Core modelling and forecasting team." [En ligne]. Disponible : <https://gwf.usask.ca/core-modelling>
- [104] W. J. M. Knoben et coll. "Community workflows to advance reproducibility in hydrologic modeling: Separating model-agnostic and model-specific configuration steps in applications of large-domain hydrologic models," *Water Resources Research*, vol. 58, n° 11, 2022, art. n° e2021WR031753. doi : 10.1029/2021WR031753.
- [105] A. Mailhot, S. Bolduc, G. Talbot et P. Vaithinada. *Révision des critères de conception des ponceaux pour des bassins de drainage de 25 km² et moins dans un contexte de changements climatiques (CC06.2)*, Ministère des Transports, Québec (Québec) Canada, mars 2021, 328 p. [En ligne]. Disponible : <http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/mono/1260388.pdf>
- [106] R. Fernandes, V. Korolevych et S. Wang. "Trends in land evapotranspiration over Canada for the period 1960–2000 based on in situ climate observations and a land surface model," *Journal of Hydrometeorology*, vol. 8, n° 5, p. 1016-1030, octobre 2007. doi : 10.1175/JHM619.1.
- [107] Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, *Climate change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution du Groupe de travail III au sixième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*, P.R. Shukla et coll., éditeurs, Cambridge, Royaume-Uni : Cambridge University Press, 2022. [En ligne]. Disponible : doi : 10.1017/9781009157926.
- [108] Gouvernement du Canada. « Grands ensembles de données du modèle du système terrestre canadien. » [En ligne]. Disponible : <https://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/aa7b6823-fd1e-49ff-a6fb-68076a4a477c> (Consulté le 5 août 2023)

- [109] WCRP CORDEX. "The North American CORDEX program." [En ligne]. Disponible : <https://na-cordex.org> (Consulté le 12 décembre 2023)
- [110] N. Mizukami et coll. "MizuRoute version 1: A river network routing tool for a continental domain water resources applications," *Geoscientific Model Development*, vol. 9, n° 6, p. 2223-2228, juin 2016. doi : 10.5194/gmd-9-2223-2016.
- [111] I. Vandervelde et coll. "Evaluating a reservoir parametrization in the vector-based global routing model mizuRoute (v2.0.1) for Earth system model coupling," *Geoscientific Model Development*, vol. 15, n° 10, p. 4163-4192, juin 2022. doi : 10.5194/gmd-15-4163-2022.
- [112] S. L. Dingman. *Physical Hydrology*, 3^e édition, Long Grove, IL, États-Unis : Waveland Press, 2014. 643 p. [En ligne]. Disponible : <https://www.waveland.com/browse.php?t=382>
- [113] J. Li et coll. "Joint effects of the DEM resolution and the computational cell size on the routing methods in hydrological modelling," *Water*, vol. 14, n° 5, mars 2022, art. n° 797. doi : 10.3390/w14050797.
- [114] D. T. Myers, D. L. Ficklin, S. M. Robeson, R. P. Neupane, A. Botero-Acosta et P. M. Avellaneda. "Choosing an arbitrary calibration period for hydrologic models: How much does it influence water balance simulations?" *Hydrological Processes*, vol. 35, n° 2, février 2021, art. n° e14045. doi : 10.1002/hyp.14045.
- [115] W. J. M. Knoben, J. E. Freer et R. A. Woods. "Technical note: Inherent benchmark or not? Comparing Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiency scores," *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 23, n° 10, p. 4323-4331, octobre 2019. doi : 10.5194/hess-23-4323-2019.
- [116] D. N. Moriasi, M. W. Gitau, N. Pai et P. Daggupati. "Hydrologic and water quality models: performance measures and evaluation criteria," *Trans ASABE*, vol. 58, n° 6, p. 1763-1785, décembre 2015. doi : 10.13031/trans.58.10715.
- [117] Gouvernement des États-Unis. *The OSTRICH Calibration Toolkit*, United States Bureau of Reclamation, Washington, DC, États-Unis, 2023. [En ligne]. Disponible : <https://usbr.github.io/ostrich/index.html> (Consulté le 12 décembre 2023)
- [118] H. K. McMillan. "A review of hydrologic signatures and their applications," *WIREs Water*, vol. 8, n° 1, janvier 2021, art. n° e1499. doi : 10.1002/wat2.1499.
- [119] M. D. Wilkinson et coll. "The FAIR guiding principles for scientific data management and stewardship," *Scientific Data*, vol. 3, n° 1, 2016, art. n° 160018. doi : 10.1038/sdata.2016.18.

Recherche du Groupe CSA

Dans le but de favoriser l'adoption de solutions normatives fondées sur le consensus afin d'accroître la sécurité et de favoriser l'innovation, le Groupe CSA soutient et effectue des recherches dans des domaines qui visent les industries nouvelles ou émergentes ainsi que sur des sujets et des questions qui touchent une vaste gamme de parties prenantes actuelles et potentielles. Les résultats de nos programmes de recherche étayeront l'élaboration de solutions normatives futures, ils offriront aux industries des directives provisoires sur la conception et l'adoption de nouvelles technologies et ils contribueront à démontrer notre engagement continu envers l'édification d'un monde meilleur, plus sécuritaire et plus durable.