

Analyse de fréquence des crues et sécurité des barrages

DANS LE CLIMAT DU 21^E SIÈCLE



CRÉDITS

Coordination du projet

Anne Frigon (Ouranos), Kristina Koenig (Manitoba Hydro).

Collaborateurs du groupe 1 – Plan de l'analyse de fréquence des crues

Jacinthe Clavet-Gaumont (Ouranos, maintenant à Hydro Québec), David Huard (Ouranos), Jean-Luc Martel (Lasalle-NHC, maintenant à l'ÉTS), Jonathan Jalbert (Polytechnique Montréal), Isabelle Demers (UQAM), David Godin (MELCC), Sébastien Langlois (Hydro-Québec), Matthew MacDonald (Ontario Power Generation), Alec Mercier (Rio Tinto), Getnet Muluye (Manitoba Hydro), John Perdikaris (Ontario Power Generation), Elaine Robichaud (Hydro-Québec), Gabriel Rondeau-Genesse (Ouranos), Kevin Sagan (Manitoba Hydro), Phil Slota (Manitoba Hydro), Nathalie Thiémonge (Hydro-Québec), Yibing Zhang (Ontario Power Generation).

Collaborateurs du groupe 2 – Analyse de fréquence des crues avec prise en compte de l'incertitude

David Huard (Ouranos), Kevin Sagan (Manitoba Hydro), Biljana Music (Ouranos), Marco Braun (Ouranos), Élyse Fournier (Ouranos), Alexis Hannart (Ouranos, maintenant à Axionable), Elmira Hassanzadeh (Polytechnique Montréal), Jonathan Jalbert (Polytechnique Montréal), Simon Lachance-Cloutier (MELCC), Sébastien Langlois (Hydro-Québec), Marco Latraverse (Rio Tinto), Matthew MacDonald (Ontario Power Generation), Alain Mailhot (INRS-ETE), John Perdikaris (Ontario Power Generation), Luc Perreault (Institut de recherche d'Hydro-Québec), Phil Slota (Manitoba Hydro), Nathalie Thiémonge (Hydro-Québec), Richard Turcotte (MELCC).

Collaborateurs du groupe 3 – Mesures d'adaptation

Phil Slota (Manitoba Hydro), Charles Poirier (MELCC), Kurt Kornelsen (Ontario Power Generation), Nathalie Thiémonge (Hydro-Québec), Elaine Robichaud (Hydro-Québec), Alec Mercier (Rio Tinto).

Auteurs

David Huard (Ouranos), Jacinthe Clavet-Gaumont (Ouranos, maintenant à Hydro-Québec), Phil Slota (Manitoba Hydro), Kurt Kornelsen (Ontario Power Generation), Charles Poirier (MELCC).

Comité consultatif

Leslie Dolcine (Hydro-Québec), David Godin (MELCC), Fanny Houdré (Hydro-Québec), Kurt Kornelsen (Ontario Power Generation), Sébastien Langlois (Hydro-Québec), Bruno Larouche (Rio Tinto), Jarrod Malenchak (Manitoba Hydro/Association canadienne des barrages), Jean-Luc Martel (Lasalle-NHC, maintenant à l'ÉTS), Marie-Claude Simard (Hydro-Québec).

CITATION RECOMMANDÉE

Ouranos, 2021. Analyse de fréquence des crues et sécurité des barrages dans le climat du 21^e siècle. Rapport soumis à la Division des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques, Ressources naturelles Canada, 40 p.

MATÉRIEL SUPPLÉMENTAIRE

pavics.ouranos.ca/cruesda

Les résultats et les opinions présentés dans ce document n'engagent que les auteurs et ne reflètent pas nécessairement le point de vue d'Ouranos ou de ses membres.

Tous droits réservés, 2021

REMERCIEMENTS

Ce projet a été réalisé avec le soutien financier de Ressources naturelles Canada par l'entremise du groupe de travail sur l'énergie de la Plateforme d'adaptation. Hydro-Québec, Manitoba Hydro, le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec (MELCC), Ontario Power Generation, Rio Tinto et Ouranos y ont également contribué.

Nous remercions Jonathan Jalbert, dont la contribution aux travaux du groupe 1 a été essentielle, en ce qu'il a proposé d'utiliser l'approche des maximums par bloc pour améliorer l'ajustement de la distribution de la valeur extrême généralisée. L'apport de Jean-Luc Martel a également permis au projet d'aller de l'avant en proposant d'utiliser de grands ensembles et en fournissant les jeux de données hydrologiques nécessaires sur 533 bassins versants canadiens afin de produire des cartes du changement dans la fréquence des crues au Canada. Ce projet n'aurait pu se réaliser sans la participation et l'implication des membres de chaque groupe qui ont conçu les méthodes et les approches pertinentes pour les besoins du projet et des gestionnaires de barrage.

En terminant, nous soulignons le soutien de nos collègues à Ouranos : Nathalie Aerens, Margarita Caycedo et Dominique Lenoir.



ENTREPRISES PARTICIPANTES

Hydro-Québec

Hydro-Québec, une société d'État, est le plus important producteur d'hydroélectricité en Amérique du Nord, et 99 % de son électricité provient de sources renouvelables sur le territoire du Québec.

Manitoba Hydro

Manitoba Hydro, une société d'État provinciale, fournit des services d'électricité et de gaz naturel, et environ 98 % de son électricité provient de l'hydroélectricité.

Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec (MELCC)

Le MELCC veille au respect de la *Loi sur la sécurité des barrages* et exploite 820 barrages pour le compte du gouvernement provincial. Travaillant étroitement avec d'autres parties prenantes, il gère le régime hydrique du Québec selon des critères de sécurité, d'équité et de développement durable. Il est également responsable de la maintenance et de l'exploitation du réseau hydrométrique de la province, des systèmes opérationnels de prévision des crues et de la mise au point de scénarios hydroclimatiques.

Ontario Power Generation (OPG)

Société ontarienne de la Couronne, OPG produit plus de la moitié de l'électricité consommée dans la province, provenant principalement de centrales hydroélectriques et nucléaires.

Ouranos

Établi à Montréal, le consortium Ouranos dirige et finance la recherche sur la climatologie régionale, les impacts du changement climatique et les mesures d'adaptation.

Rio Tinto

Le groupe Rio Tinto, l'un des plus grands producteurs de bauxite, d'alumine et d'aluminium, possède des installations hydroélectriques au Québec et en Colombie-Britannique qui alimentent ses opérations de fonderie.

TABLE DES MATIÈRES

Introduction	8
Analyse de fréquence des crues – Une explication	10
Description du projet	14
Méthodologies proposées	15
Plan de l'analyse de fréquence des crues – Méthodologie du groupe 1	15
Analyse de fréquence des crues avec prise en compte de l'incertitude – Méthodologie du groupe 2	20
Mesurer le risque dans un climat en constante évolution	23
Comparaison des méthodologies des groupes 1 et 2 pour du plan et de l'analyse de fréquence des crues avec minimisation du risque	24
Résultats de l'analyse de fréquence des crues extrêmes pour le Canada	26
Cartes du changement dans la fréquence des crues au Canada	27
Les barrages au 21^e siècle – Mesures d'adaptation	28
Contexte	28
Adaptation opérationnelle	28
Objectifs et contraintes	29
Normes réglementaires et approches par analyse du risque pour la sécurité des barrages	30
L'approche retenue	30
Étude de cas – Centrale du bassin versant de la rivière Winnipeg	31
Étape 1 : Examen du débit de crue de conception actuel et du seuil critique	32
Étape 2 : Examen des impacts du changement climatique et détermination du niveau de préoccupation	32
Étape 3 : Exploration des mesures d'adaptation	33
Étape 4 : Évaluation de la performance et de la faisabilité des mesures d'adaptation	33
Étape 5 : Détermination de la stratégie d'adaptation retenue pour considération future	34
Détection et attribution des extrêmes hydrologiques	35
Conclusion et recommandations	36
Acronymes	38
Références	39

INTRODUCTION

Au Canada, la réglementation des barrages est de compétence provinciale et s'appuie sur les normes établies dans les *Recommandations de sécurité concernant les barrages* de l'Association canadienne des barrages (ACB). Parmi les nombreux critères de conception et exigences d'inspection contenus dans les *Recommandations*, tous les barrages doivent être en mesure de faire face à des crues extrêmes, dont la gravité est déterminée selon l'ampleur des dommages que causerait la rupture des infrastructures. Les barrages qui présentent les risques les plus importants sont conçus de manière à résister à la crue maximale probable (CMP), c'est-à-dire « la plus forte crue plausible qui pourrait raisonnablement se produire en un lieu donné et à un moment de l'année, compte tenu de considérations météorologiques et hydrologiques » (Organisation météorologique mondiale, 2009). Les barrages appartenant à cette catégorie extrême comprennent, entre autres, les centrales du cours inférieur du fleuve Nelson, de La Grande et des fleuves Columbia et Saint-Jean. Les barrages qui présentent des risques moindres sont conçus pour faire face à des crues extrêmes, c'est-à-dire des crues dont les débits dépassent un seuil donné une seule fois en 1 000 ou 10 000 ans.

Pour estimer la fréquence des crues, les pratiques d'ingénierie courantes consistent à sélectionner et à ajuster une distribution statistique pour observer les débits fluviaux et calculer les percentiles correspondant à la fréquence de conception. Cette brève description dissimule de nombreuses difficultés auxquelles se heurtent les ingénieurs, par exemple, l'application de la méthode aux bassins versants non jaugés, les séries d'observations sur de courtes périodes, les données manquantes, les erreurs lors de la prise de mesures et les conditions climatiques changeantes. Comme le montrent les récentes observations

historiques et les simulations du changement climatique, la fréquence et l'intensité des événements de précipitations augmentent dans plusieurs régions du Canada. Certaines d'entre elles devraient aussi connaître des hivers plus courts et des accumulations de neige moins importantes, ce qui pourrait réduire les crues printanières. Ces facteurs ajoutent un élément de complexité à l'évaluation de la sécurité des barrages, car on s'attend de plus en plus à ce que les ingénieurs puissent démontrer que les infrastructures sont à l'épreuve du changement climatique.

Pour ce qui est de la sécurité des barrages, la question n'est plus de savoir s'il faut prendre en compte le changement climatique, mais bien comment s'y prendre. Plusieurs organismes réputés – l'International Hydropower Association (IHA), la Commission internationale des grands barrages (CIGB, comité technique sur le changement climatique), l'UNESCO (méthodologie CRIDA – Climate Risk Informed Decision Analysis) – se sont penchés sur la question et ont proposé des lignes directrices qui intègrent le changement climatique dans le processus décisionnel (CIGB, 2016; IHA, 2019; UNESCO, 2018). L'Organisation internationale de normalisation (ISO) a récemment publié une norme sur l'adaptation au changement climatique qui fournit des principes, exigences et lignes directrices (BSI Standards Publication, 2019). Ouranos a aussi publié des lignes directrices à l'intention des gestionnaires de barrage qui proposent des méthodes d'intégration du changement climatique dans la production d'énergie et l'évaluation de la valeur des actifs (Fournier *et al.*, 2020). Par ailleurs, il ne fait aucun doute que le changement climatique affecte l'hydrologie, mais il est encore difficile d'en prévoir les répercussions précises sur les crues.

La prise en compte du changement climatique dans l'établissement du critère de sécurité des barrages est complexe, en partie parce que les projections hydrologiques constituent la dernière étape d'une cascade de modèles et d'hypothèses dont les incertitudes individuelles s'additionnent. Un projet réalisé il y a quelques années consistait à estimer les crues maximales probables du futur au moyen des données de simulations de modèles climatiques et non des observations habituelles de patrons météorologiques (Ouranos, 2015). Ce projet-ci est la seconde phase de ce travail et s'intéresse aux effets du climat changeant sur la fréquence des crues extrêmes.

À l'heure actuelle, il n'existe aucun consensus sur la prise en compte du changement climatique dans la réglementation des crues. Malgré une importante littérature scientifique sur les impacts du changement climatique sur les crues, des lacunes demeurent quant à l'application de la science aux pratiques d'ingénierie courantes et à l'évaluation de la sécurité des barrages.

Pour aller de l'avant, Ouranos a réuni des groupes de travail formés de propriétaires de barrages, de représentants d'organismes de réglementation, de firmes d'ingénieurs, d'associations professionnelles, de scientifiques du climat et de chercheurs universitaires en hydrologie, climat et statistique. Cette collaboration vise à proposer une méthodologie pragmatique qui prend en compte les projections climatiques dans l'estimation des crues millénales et décennales afin d'évaluer la sécurité des barrages. Cet exercice a permis de fournir des pistes de réflexion quant aux mesures d'adaptation appropriées.

Après un aperçu de l'analyse de fréquence des crues – une explication, nous verrons la philosophie qui sous-tend le projet et la structure de collaboration avec les experts dans la section sur la description du projet. Suivront les sections sur les méthodologies proposées, puis les résultats de l'analyse de fréquence des crues extrêmes pour le Canada. Cette démarche prépare le terrain pour l'examen des barrages au 21^e siècle et des mesures d'adaptation avant de conclure avec quelques recommandations. Ce travail, espère-t-on, favorisera les discussions sur l'analyse de fréquence à la lumière du changement climatique et de son application aux pratiques d'ingénierie dans des contextes opérationnels.

ANALYSE DE FRÉQUENCE DES CRUES – UNE EXPLICATION

L'analyse de fréquence des crues, aussi appelée analyse fréquentielle, consiste à évaluer la fréquence moyenne de dépassement des seuils établis. Ceux-ci s'expriment sous forme de débits de pointe ou de volume de débits, et l'objectif est d'associer les valeurs de débits à leurs probabilités d'occurrence. Par exemple, il y a une chance sur cent qu'un débit de pointe particulier dépasse le seuil dans une année donnée. Cela serait assez simple à déterminer si les bassins versants ne changeaient pas dans le temps et si nous avions accès à des observations de débits sur des milliers d'années. Il suffirait d'aligner les débits et d'en calculer les percentiles : le 99^e percentile des maximums annuels est, par définition, la valeur dépassée une fois tous les cent ans en moyenne. Précisons toutefois qu'un événement qui se produit une fois en 100 ans pourrait se produire deux années de suite, mais l'intervalle moyen entre les événements est de 100 ans.

Dans la pratique cependant, comme les observations de débits en Amérique du Nord couvrent rarement plus de 100 ans, cette méthode ne conviendrait pas à l'évaluation des crues millénales et décennales¹. Pour contourner

le problème, l'analyse de fréquence permet de faire des hypothèses sur la relation entre l'ampleur des débits maximums annuels et leurs probabilités d'occurrence. Ces hypothèses sont codées au moyen d'un modèle paramétrique probabiliste, habituellement une distribution statistique dont les paramètres sont ajustés aux observations. C'est-à-dire que nous supposons que les maximums annuels sont tirés d'une distribution statistique, évaluons les paramètres de la distribution à partir des observations et utilisons les mêmes paramètres pour calculer le percentile qui nous intéresse. La figure 1 est une illustration conceptuelle décrivant ce processus, où les débits maximums sont déterminés par blocs de valeurs (habituellement un an) et ajustés à une distribution (côté droit).

Cette approche permet d'extrapoler à de très rares événements, mais la précision de l'estimation dépend de la distribution choisie et de ses paramètres. Dans la pratique, il s'agit de tester plusieurs distributions et de choisir celle qui convient le mieux. Cependant, cela va à l'encontre de la théorie statistique, selon laquelle seules les distributions

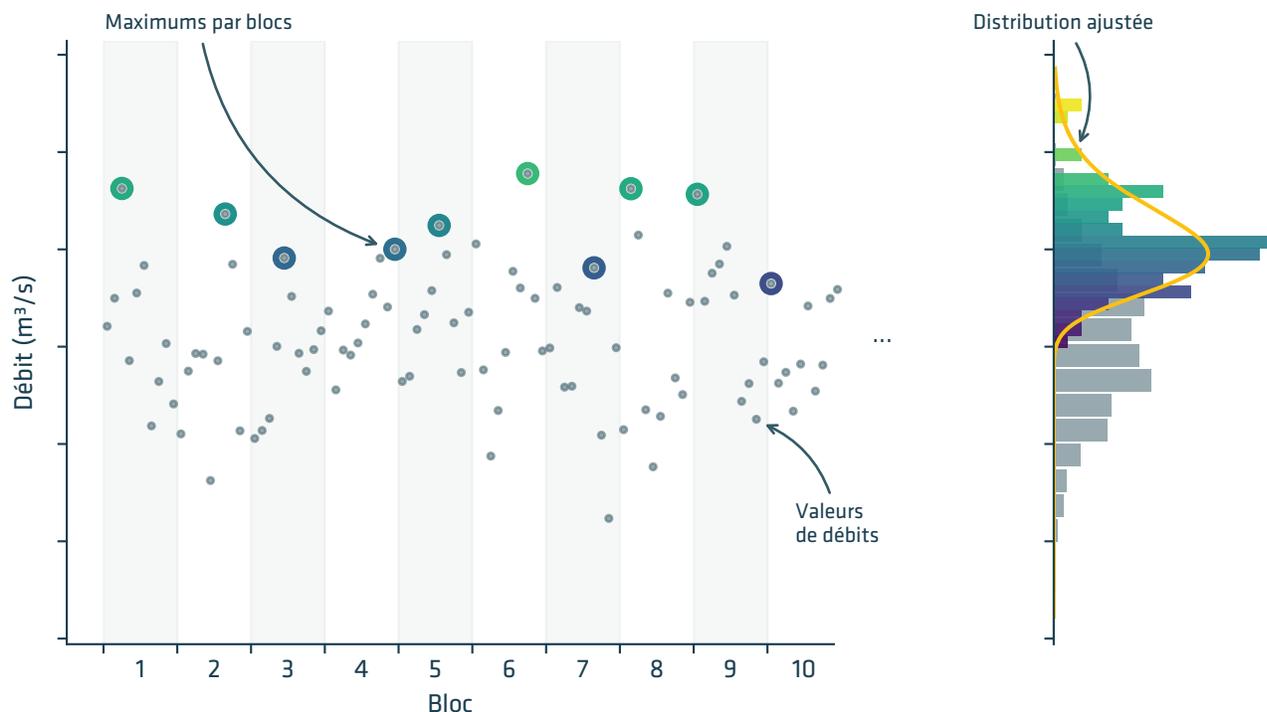


Figure 1 : La valeur des débits maximums par bloc est déterminée (côté gauche) et la série de maximums est ajustée à une distribution de valeurs extrêmes (côté droit). Dans la pratique, les blocs correspondent habituellement à des périodes d'un an.

¹ Nous ne parlons pas ici de période de retour, car le terme manque de clarté dans un contexte non-stationnaire. Un événement décennal (1 : 10 000) a une chance sur 10 000 de dépasser un seuil établi dans une année donnée.

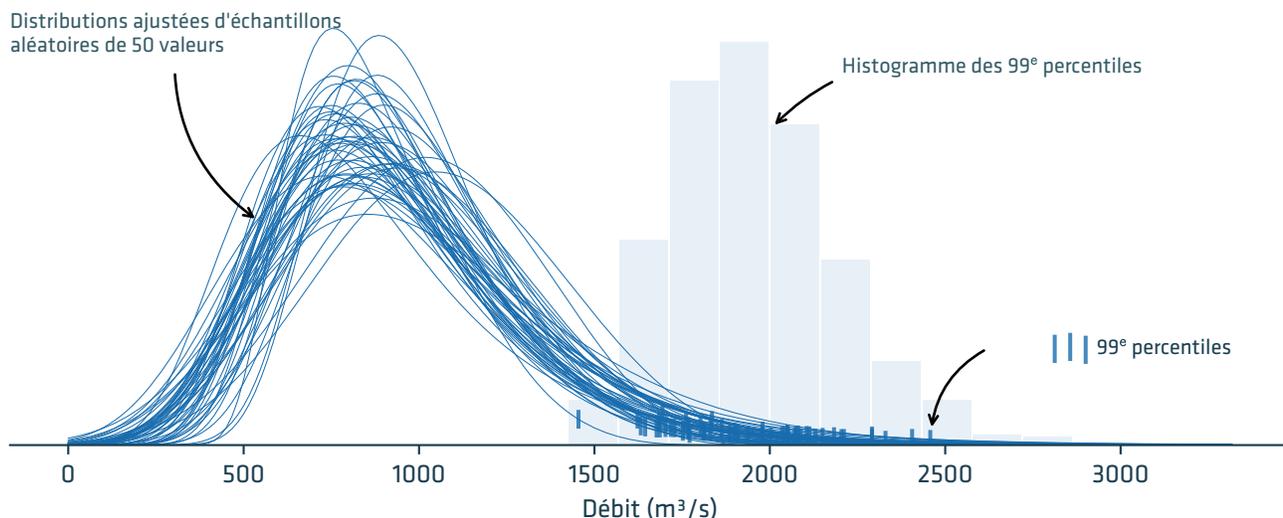


Figure 2 : Effet de l'incertitude liée à l'échantillonnage sur l'estimation des paramètres et des percentiles. Des échantillons aléatoires de 50 valeurs tirées d'une distribution de valeurs extrêmes sont générés et utilisés pour estimer les paramètres et calculer le 99^e percentile.

de la famille de distributions de valeurs extrêmes devraient être utilisées pour l'extrapolation aux événements rares, car ce sont aussi les seules dont les formes mettent en évidence le fait qu'elles décrivent une série de maximums, ce qui justifie l'extrapolation à des événements ne faisant pas partie des observations historiques². Les paramètres de la distribution, quant à eux, dépendent largement de la qualité et de la taille des observations. Dans la pratique, des observations sur de courtes périodes et des erreurs lors de la prise de mesures introduisent d'importantes incertitudes dans l'analyse de fréquence, surtout pour l'estimation de l'ampleur d'événements rares. La figure 2 montre de façon conceptuelle l'étendue de la variation possible lorsque l'estimation du 99^e percentile se fait à partir de 50 valeurs observées tirées d'un échantillon de distributions de valeurs extrêmes. Dans cet exemple simple, la marge d'erreur de l'estimation du 99^e percentile est de $\pm 25\%$, et elle est entièrement attribuable à l'incertitude des paramètres. Cela montre à quel point il est difficile d'isoler les signaux du changement climatique à travers un tel bruit de fond.

Les estimations de la fréquence des crues ne sont pas uniquement affectées par la durée des observations. Si les barrages, les diversions, l'utilisation des terres, l'érosion et les cycles climatiques ont affecté le débit, on ne peut pas supposer qu'une seule distribution statistique puisse décrire une observation complète. Par exemple, on peut décrire un changement dans le débit causé par une diversion selon deux distributions : une avant le changement et l'autre après. Pour décrire de lents changements graduels, une solution pratique consiste à supposer que les paramètres de la distribution varient constamment en fonction du temps. Définir ces fonctions exige toutefois des paramètres

supplémentaires, et leur estimation dépendra elle aussi d'observations sur de courtes périodes.

Il y a moyen de suppléer à l'absence d'observations plus longues. L'examen des couches sédimentaires peut révéler l'occurrence d'inondations passées. Par exemple, le pollen trouvé dans des carottes de sédiments de l'inlet Saanich, sur l'île de Vancouver, indique qu'il y a eu une inondation dans la vallée du Fraser il y a 11 000 ans (Blais-Stevens, Clague, Mathewes, Hebda et Bornhold, 2003). Ce type d'information est certes pertinent, mais n'est pas simple à intégrer dans l'analyse de risque et le débit de crue de conception. On peut aussi recueillir des données de bassins versants avoisinants ayant des caractéristiques climatiques et hydrologiques similaires. Cette approche, dite analyse de fréquence régionale, pose au départ que les distributions statistiques de plusieurs bassins versants ont des paramètres en commun. Ainsi, plutôt que de prolonger les observations dans le temps, on les prolonge dans l'espace.

Il est aussi possible d'obtenir plus de données au moyen de modèles climatiques et hydrologiques pour générer des séries de débits synthétiques. Les modèles climatiques consistent en des simulations climatiques planétaires qui comptent des centaines de variables : température, pression, vent, humidité, pluie, neige, courants, humidité du sol, etc. En comparaison des observations dans le monde réel, la performance des modèles climatiques est relativement bonne pour certaines variables, dont la température de l'air à la surface, mais l'est moins pour d'autres, comme les nombreuses variables liées à la formation des nuages. D'autres variables simulées laissent à désirer, notamment le ruissellement de surface

² Pour l'extrapolation à des événements extrêmes dont l'ampleur dépasse les observations, les distributions de valeurs extrêmes sont les seules distributions de probabilité qui satisfont à une théorie formelle et à de rigoureux arguments mathématiques (Coles, 2001).



Figure 3 : Étapes de la modélisation hydroclimatique. Les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (GES) et d'aérosols définissent l'évolution des GES et des aérosols dans l'atmosphère pour le prochain siècle, ce qui affecte les conditions météorologiques et climatiques simulées par les modèles climatiques. Les simulations des modèles climatiques produisent des séries temporelles de variables telles que la température et la précipitation, qui sont post-traitées pour mieux correspondre aux observations statistiques du passé récent. Ces séries temporelles corrigées servent ensuite à piloter un modèle hydrologique déjà étalonné sur un bassin versant donné au moyen de séries temporelles de données météorologiques et de débits observés.

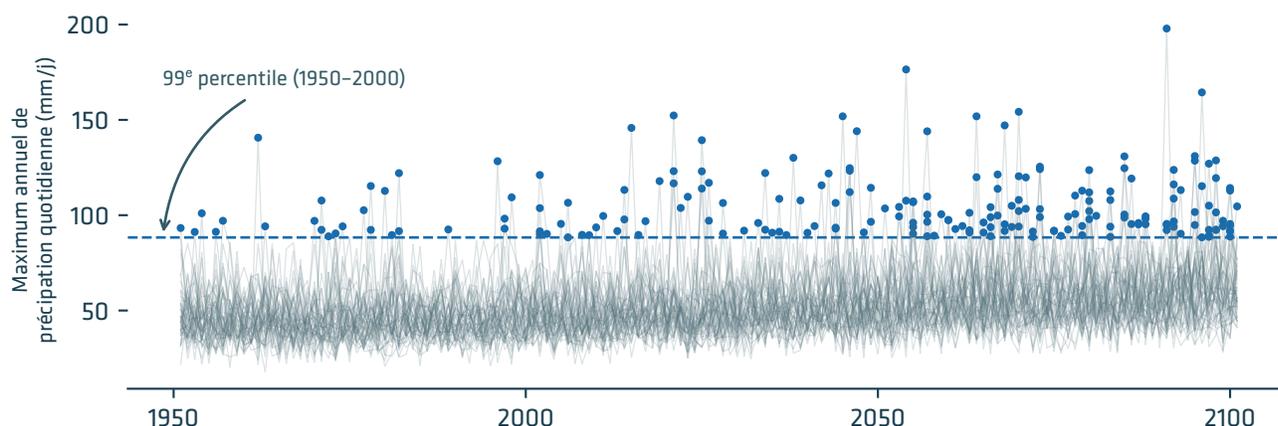


Figure 4 : Maximums annuels de la précipitation journalière sur la région de Toronto, simulés par le modèle climatique du CanESM2 sous le scénario d'émissions RCP 8.5. Chaque ligne représente la série de maximums annuels simulés par l'un des 50 membres de l'ensemble. Les traits horizontaux correspondent au 99^e percentile, c.-à-d., la valeur dépassée en moyenne une fois sur 100 au cours de la période 1950-2000. D'ici la fin du siècle, le modèle prévoit que les dépassements seront cinq fois plus nombreux (points bleus).

et l'infiltration, en partie à cause de la résolution spatiale grossière du modèle. Les hydrologues s'appuient sur des modèles hydrologiques, soigneusement étalonnés sur un bassin versant donné, pour convertir en séries de débits des séries temporelles de précipitation, de température, de radiation solaire, etc., simulées par des modèles climatiques.

Certaines conditions doivent être remplies pour produire des simulations hydrologiques vraisemblables. Par exemple, les valeurs moyennes des variables météorologiques simulées doivent correspondre aux observations saisonnières. Des écarts de quelques degrés seulement affecteront considérablement l'évapotranspiration et l'accumulation de neige, ce qui se

répercutera sur la vraisemblance des sécheresses estivales et des crues printanières. Quant à la précipitation, il est important de bien représenter non seulement les moyennes, mais aussi la queue des fortes précipitations qui contrôlent les crues estivales et automnales. En règle générale, les simulations de modèles climatiques ne remplissent pas tous ces critères, de sorte que les algorithmes de post-traitement, la réduction aux échelles locales et/ou la correction de biais sont habituellement appliqués aux variables des modèles climatiques pour mieux correspondre aux observations. Les algorithmes de post-traitement transforment essentiellement les distributions simulées pour qu'elles puissent correspondre aux distributions observées sur la période historique.

Étant donné la nature chaotique du climat, chaque simulation climatique individuelle est unique. Les simulations climatiques ont en commun des propriétés climatiques à long terme, mais leurs patrons journaliers sont indépendants les uns des autres. C'est ce qui permet d'exécuter des douzaines de simulations couvrant une période donnée (p. ex., 1950-2020) pour explorer de rares événements extrêmes qui ne se sont peut-être pas produits au cours de la période historique observée. Par exemple, les observations pourraient inclure quelques hivers très enneigés, mais sans que ceux-ci aient été combinés avec un hiver enneigé, l'avènement rapide de températures printanières chaudes et de fortes pluies, ce qui donnera lieu à une crue printanière intense. L'analyse de fréquence des événements extrêmes dans des simulations climatiques peut être vue comme une approche physique de l'analyse de fréquence des crues.

Cette approche de nature physique est particulièrement utile pour ce qui est du futur. L'augmentation des concentrations de GES et d'aérosols modifie le bilan radiatif de la terre, élève les températures de l'air à la surface et modifie le cycle hydrologique. L'exécution de simulations de modèles climatiques comprenant plusieurs scénarios d'émissions de GES nous donne une idée de l'éventail des conditions climatiques possibles en 2050 ou 2100. De même, l'exécution d'une cascade de modèles climatiques et hydrologiques laisse entrevoir les impacts éventuels du changement climatique sur la fréquence des crues extrêmes. Dans certaines régions, les débits de pointe printaniers pourraient diminuer en raison d'une accumulation de neige réduite, tandis que dans d'autres, ils pourraient augmenter en raison de précipitations plus intenses. À l'heure actuelle, le meilleur moyen de comprendre l'évolution possible du risque de crue dans un climat changeant est d'analyser la réponse des modèles aux GES et aux aérosols. À titre d'exemple, la figure 4 montre les séries temporelles des maximums annuels de précipitation journalière dans la région de Toronto tirées de 50 différentes simulations climatiques du modèle canadien du système terrestre de deuxième génération (CanESM2) sous le scénario d'émissions de GES et d'aérosols de la trajectoire de concentration représentative (RCP) 8.5. On y voit clairement l'influence des GES et des aérosols sur l'intensité des précipitations.

Dans la pratique, l'évaluation des risques d'inondation actuels et futurs au moyen des projections de modèles climatiques comporte de nombreuses difficultés. Entre autres, les résultats de ces modèles diffèrent les uns des autres, surtout sur de petites échelles locales. Même si l'influence des GES et des aérosols sur la radiation et les températures de l'air à la surface fait largement consensus, ses effets sur les nuages et les précipitations varient considérablement d'un modèle à l'autre. Aussi, différents modèles hydrologiques répondent différemment aux mêmes séries temporelles de précipitation et de température. Les percentiles élevés estimés à partir d'une série temporelle de débits dépendent largement de la distribution statistique et, parfois, de la méthode utilisée pour l'estimation des paramètres. À chaque étape, les scientifiques ont diverses options, et il n'est pas toujours évident de savoir laquelle est la meilleure, voire même s'il en existe une meilleure. Le présent rapport cherche à comprendre les options offertes par la science et à proposer des méthodes pragmatiques dans des contextes opérationnels, où le temps et les ressources sont limités.

DESCRIPTION DU PROJET

À lui seul, le nombre de choix méthodologiques pouvant affecter le résultat de l'analyse de fréquence du climat futur est parfois intimidant. Pour chaque choix (p. ex., GES et aérosols, modèle climatique, méthode de post-traitement, modèle hydrologique et sa méthode d'étalonnage, etc.), on peut s'en tenir à une seule option ou effectuer une analyse de sensibilité sur plusieurs. Le choix d'une seule option doit faire consensus, ce qui peut en soi entraîner des discussions sur les critères de décision et les analyses préliminaires pour établir la priorité des options. Comme le montre Kalra *et al.* (2014), cette approche qui consiste à s'entendre sur certaines hypothèses (« agree-on assumptions ») est vulnérable aux blocages et aux biais. La seconde option, en l'absence de consensus, consiste à prendre en compte une liste d'options et à réaliser une analyse de sensibilité. Si cette démarche permet à l'étude d'aller de l'avant, elle multiplie aussi le nombre de résultats à analyser et à examiner, ce qui finit par ralentir les progrès.

Pour simplifier le processus décisionnel, le projet a été confié à trois groupes de travail. Le groupe 1 devait concevoir une méthode d'analyse de fréquence des crues visant les trois objectifs suivants :

- ▷ répondre aux besoins des décideurs ayant une faible tolérance au risque;
- ▷ s'appliquer facilement aux bassins versants du Canada;
- ▷ exiger peu ou pas d'expertise en science du climat.

Le groupe 2 élaborerait une méthodologie prenant en compte autant d'incertitudes que possible. Face à un choix méthodologique, le groupe 1 choisirait le débit de crue de conception le plus élevé, tandis que le groupe 2 chercherait à prendre en compte toutes les options du groupe 1 et leur probabilité respective. Enfin, le groupe 3 se pencherait sur le choix des meilleures mesures d'adaptation pour les infrastructures existantes, compte tenu de risques en constante évolution.

Les membres des groupes de travail se composaient de gestionnaires de barrage, d'ingénieurs et d'hydrologues de Manitoba Hydro, Ontario Power Generation, Hydro-Québec, Rio Tinto et du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec (MELCC); de chercheurs de trois universités spécialisés en hydrologie, statistique et science du climat; et du personnel d'Ouranos affecté aux scénarios climatiques pour le secteur hydroélectrique. Un comité consultatif a supervisé les progrès des trois groupes, adaptant les échéanciers en fonction des horaires chargés des gestionnaires de barrage durant le printemps (crues) et des chercheurs universitaires durant l'automne (demandes de subventions).

de chercheurs universitaires. Au cours de la première année, les deux groupes, environ 9 à 15 participants, se réunissaient tous les mois pour une téléconférence d'une heure. Les responsables de groupes passaient en revue les progrès accomplis depuis la dernière réunion et proposaient des options pour les prochaines étapes. Les participants discutaient des recommandations pour la suite, échangeaient des rapports internes et suggéraient des publications scientifiques offrant des solutions. À intervalles réguliers, des rapports techniques de synthèse étaient soumis aux participants et au comité consultatif pour commentaires.

Une fois mises au point, les deux méthodologies proposées dans ce rapport ont été testées sur une poignée de bassins versants sélectionnés par les participants. Cette sélection a permis de s'assurer que les participants avaient une bonne connaissance des infrastructures existantes, de l'hydrologie et du climat des bassins versants, et étaient en mesure de fournir des données et des rapports pertinents qui seraient pris en compte dans les méthodologies. Des études de fréquence des crues basées sur des données observées étant disponibles, il a été facile de comparer et d'évaluer les méthodologies.

Au cours de la deuxième année, les méthodologies des groupes 1 et 2 ont été appliquées aux bassins versants sélectionnés et les résultats ont été comparés. La comparaison a montré que la méthodologie du groupe 1 ne dégageait pas toujours des résultats supérieurs aux estimations du groupe 2, et elle a donc été modifiée de façon à obtenir des valeurs plus proches du segment supérieur de l'enveloppe d'incertitudes du groupe 2. Le groupe 3 se composait de gestionnaires de barrage, de compagnies d'électricité et d'organismes gouvernementaux. Tandis que les deux premiers groupes élaboraient des méthodologies et généraient des résultats, le troisième passait en revue des lignes directrices publiées sur les mesures d'adaptation au changement climatique et formulait une méthodologie en vue de mettre au point des stratégies d'adaptation pour leurs sites d'intérêt. Le groupe 3 se réunissait pour discuter et passer en revue la méthodologie. Après avoir obtenu des résultats préliminaires des groupes de travail 1 et 2, ils ont proposé des stratégies d'adaptation et les ont présentées pour discussion dans un atelier d'une journée, en personne.

Au cours de la troisième année, la méthodologie modifiée du groupe 1 a été appliquée à un ensemble élargi des bassins versants à l'échelle du Canada. Cette confrontation avec la réalité a contribué à souligner les faiblesses résiduelles et les blocages éventuels pour une utilisation générale élargie. Le produit final, après révision par les participants, a été versé sur un serveur public, permettant aux utilisateurs d'importer les résultats du projet dans des systèmes d'information géographique sous forme de cartes superposées. Bien que celles-ci ne remplacent pas des études approfondies in situ, elles offrent un point de départ utile pour l'élaboration de stratégies d'adaptation des conditions hydroclimatiques changeantes.

MÉTHODOLOGIES PROPOSÉES

Cette section s'intéresse en particulier à la méthodologie du groupe 1, qui est plus simple et plus facile à reproduire que celle du groupe 2, et qui a été utilisée pour générer les résultats pour l'ensemble du Canada. Étant donné la complexité de la méthodologie du groupe 2, le rapport n'en présente que les grandes lignes.

Plan de l'analyse de fréquence des crues – Méthodologie du groupe 1

La méthodologie du groupe 1 devait être assez simple pour que les ingénieurs puissent facilement utiliser les ensembles de données disponibles, tout en générant des résultats plus prudents que ceux du groupe 2 qui, eux, s'appuyaient sur la meilleure méthode d'estimation. Pour que sa méthodologie soit suffisamment plausible et robuste pour les organismes de réglementation et raisonnablement conviviale pour les praticiens, le groupe 1 s'est basé sur la littérature actuelle et les pratiques de propriétaires de barrage. Le groupe 1 et le comité consultatif ont défini l'approche et se sont consultés tout au long du processus. Au départ, la méthodologie a été développée pour cinq bassins versants (voir la figure 5) et visait à produire des cartes du changement climatique de crues millénales et décennales au Canada.



Figure 5 : Les cinq bassins versants utilisés pour développer la méthodologie.

Les nombreux objectifs ont façonné le processus de développement et limité les décisions d'ordre méthodologique. Au départ, nous avions l'idée plutôt naïve d'utiliser directement les sorties de simulations climatiques pour estimer les crues extrêmes, croyant qu'avec une telle approche, il serait relativement facile de couvrir tous les bassins versants du Canada. Pour le groupe 1, toutefois, il était inacceptable d'utiliser le ruissellement simulé par les modèles climatiques, car celui-ci était loin de correspondre au ruissellement observé. Une seconde option, soit d'utiliser des approximations de débits établies en fonction de la précipitation, s'est avérée impraticable puisque les bassins versants à l'étude étaient fortement influencés par la fonte de neige. Il a donc fallu se résoudre à simuler les débits au moyen de modèles hydrologiques.

La modélisation hydrologique exige un bon ensemble d'observations de débits pour que le modèle de chaque bassin versant soit correctement étalonné et validé. Cela ne posait pas problème pour les cinq bassins versants choisis, les données étant facilement disponibles, mais les transposer sur d'autres bassins n'a pas été aussi simple. Pour respecter l'échéancier du projet, il fallait trouver des ensembles de données existants qui permettraient d'avoir accès à des simulations hydrologiques pour un grand nombre de bassins versants canadiens. Le groupe 1 a jugé que le travail de Martel *et al.* (2021) était acceptable, c'est-à-dire un modèle hydrologique étalonné sur plus de 700 bassins versants sur les débits naturels observés de l'ensemble de données HYSETS (Arsenault *et al.*, 2020). Les chercheurs universitaires ont utilisé le modèle de génie rural à quatre paramètres journaliers (GR4), couplé au module de fonte de neige CemaNeige (Valery, 2010), une combinaison qui a donné de bons résultats. Le choix d'un seul modèle simple global pour toute l'étude n'était pas idéal, mais justifiable en raison des contraintes de temps et de ressources. Dans un contexte opérationnel, les hydrologues préfèrent utiliser un modèle plus élaboré et étalonné de manière à reproduire les débits sur des sous-bassins versants et prendre en compte le routage au sein du réservoir³.

³ Dans un monde idéal, chaque modèle serait exécuté avec différents ensembles de paramètres également plausibles. De plus, différents modèles pourraient servir à créer des ensembles multiparamètres et multimodèles. Nous nous attendons à ce que les débits extrêmes soient sensibles à ces choix.

La figure 6 résume l'approche élaborée par le groupe 1 et inspirée de Martel *et al* (2021).

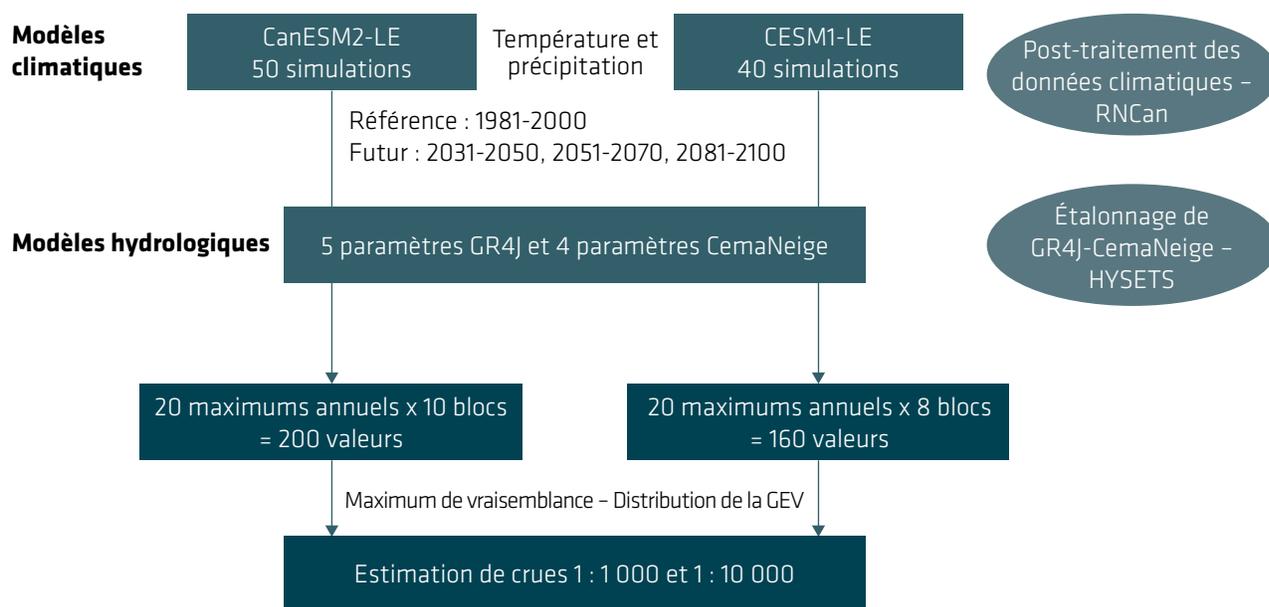


Figure 6 : Approche élaborée par le groupe 1 et inspirée de Martel *et al.* (2021).

L'aspect du changement climatique serait pris en compte par les simulations du GR4J et de CemaNeige pilotées par les sorties de séries temporelles quotidiennes de précipitation et de température issues de deux modèles climatiques globaux (MCG) : le CanESM2 (modèle du système terrestre canadien de deuxième génération) et le CESM1 (modèle du système terrestre communautaire de première génération). Des expériences de grands ensembles, soit un nombre élevé de simulations de modèles climatiques (appelées membres de l'ensemble), avaient été menées au moyen de chacun de ces modèles avec des conditions initiales légèrement différentes afin d'évaluer la variabilité naturelle du climat. Les simulations du CanESM2 comptent 50 membres (Fyfe *et al.*, 2017) et celles du CESM1, 40 (Kay *et al.*, 2015). Les deux ensembles couvraient la période allant jusqu'aux années 2100 et simulaient le climat sous le scénario de la trajectoire de concentration représentative (RCP) 8.5 de futures émissions de gaz à effet de serre et d'aérosols (Meinshausen *et al.*, 2011). Cette trajectoire est celle qui suit de plus près les émissions observées sur la période 2005-2020 et devrait continuer à les suivre jusqu'en 2030 (Schwalm, Glendon et Duffy, 2020). Aux environs de 2050, le scénario d'émissions intermédiaire de l'Agence internationale de l'énergie devrait se situer à peu près entre les RCP 4.5 et 8.5. Selon certains, les émissions projetées de la RCP 8.5 au-delà de 2050 sont moins probables, car elles s'appuient sur une utilisation du charbon cinq fois plus élevée qu'à l'heure actuelle, alors que l'on considère que le pic a été

atteint en 2013 (Hausfather et Peters, 2020). Néanmoins, la RCP 8.5 peut être vue comme un scénario utile à explorer dans le cadre d'une réponse au changement climatique dans la fourchette supérieure⁴.

Avant l'exécution du modèle hydrologique GR4J et de CemaNeige, les données des deux ensembles de modèles climatiques (séries de précipitations et de températures journalières) ont d'abord été post-traitées au moyen de la méthode de cartographie des quantiles (« quantile mapping »; Chen, Brissette, Chaumont et Braun, 2013). L'ensemble de données de référence utilisé pour le post-traitement est l'ensemble de données sur grille de Ressources naturelles Canada (Hutchinson *et al.*, 2009). Les débits de crue maximums annuels simulés ont ensuite été extraits pour quatre périodes de 20 ans : 1981-2000, 2031-2050, 2051-2070 et 2081-2100. Chacune compte 1 000 maximums annuels simulés (20 × 50) par le CanESM2-LE et 800 (20 × 40) par le CESM1-LE.

Notre sélection de modèles climatiques est contestable. Selon les meilleures pratiques actuelles en matière d'études sur le changement climatique, on recommande d'utiliser suffisamment de modèles climatiques pour couvrir un vaste éventail de réponses climatiques plausibles aux émissions de GES et d'aérosols. L'agrégation des résultats de nombreux modèles réduit l'influence des erreurs provenant de modèles individuels et dégage ainsi des résultats plus robustes. En

⁴ Dans un cas d'école, ce sont les scénarios de concentration de GES et d'aérosols, et non les scénarios d'émissions qui pilotent les modèles climatiques. Les concentrations du RCP 8.5 se situent dans la fourchette inférieure des concentrations compatibles avec les émissions du RCP 8.5 (Booth *et al.*, 2012).

règle générale, les études d'impacts se font avec quelques douzaines de modèles provenant du Projet de comparaison de modèles couplés (CMIP). L'utilisation de seulement deux modèles s'écarte nettement de la norme, et la raison de cet écart s'explique par les propriétés des valeurs extrêmes et le besoin d'observations de maximums annuels sur de longues périodes.

Pour mieux illustrer ce compromis, nous avons comparé les anomalies du changement climatique pour la précipitation et la température des deux ensembles avec les simulations du CMIP5 (Taylor, Stouffer et Meehl, 2012). Jusqu'en 2050, les deux ensembles montrent des changements considérables dans la température et couvrent un vaste éventail de changements dans la précipitation. Par souci de prudence, il est rassurant de savoir que les deux modèles utilisés comptent parmi ceux qui montrent les changements les plus grands dans la température et, par conséquent, le plus fort impact que la hausse de la température pourrait avoir sur les crues. Après 2050, les résultats des deux grands ensembles ne comptent pas parmi les choix les plus prudents; d'autres modèles climatiques dégagent des hausses de température plus élevées.

Par ailleurs, nos grands ensembles ne tiennent pas compte de la possibilité d'un futur moins chaud (représenté par les simulations de la RCP 4.5). Ces projections, quelque peu contre-intuitives, pourraient aboutir aux risques de crues les plus élevés. Par exemple, pour des niveaux de réchauffement modérés, une humidité accrue venant de l'océan peut parfois compenser des saisons froides plus courtes et, ce faisant, accroître l'épaisseur de la neige et les risques de crues dans les régions nordiques (Gaur, Gaur et Simonovic, 2018).

Comme il a été mentionné plus tôt, l'analyse de fréquence des crues extrapole à de rares événements de crues en fonction d'une distribution statistique ajustée aux observations. Pour effectuer cette extrapolation, le groupe 1 a utilisé diverses méthodes, dont des mécanismes permettant de sélectionner la distribution la mieux adaptée ou, encore, en imposant une distribution basée sur des pratiques institutionnelles. Faute d'avoir trouvé un consensus, les membres du groupe ont convenu d'un arrangement en revenant à des considérations théoriques. Tout compte fait, la valeur extrême généralisée (GEV) est la seule distribution statistique convenable qui extrapole les maximums à des percentiles élevés encore non observés (Coles, 2001). Bien que les hydrologues utilisent très rarement cette distribution dans la pratique, l'argument théorique et le besoin d'une seule distribution applicable pour l'ensemble du Canada nous ont amenés à sélectionner cette GEV. Aussi à l'appui de cette décision, Zhang, Stadnyk et Burn (2020) ont trouvé que la distribution de la GEV était préférable à toute autre distribution considérée (logistique, Pearson de type III, log Pearson de type III) pour l'application

d'une distribution statistique préférée de la fréquence des crues à l'échelle de la station. L'étude a montré que la GEV n'était pas seulement acceptable pour le plus grand nombre de séries de débits de pointe au Canada, mais aussi qu'elle offrait la meilleure performance prédictive pour l'estimation des percentiles d'une crue en 25 ans, et ce, tant pour le biais que pour l'incertitude.

Pendant, le choix d'une distribution unique pour tous les bassins versants a soulevé un problème épineux. Pour certains bassins versants, nous avons constaté que la GEV dégageait un ajustement médiocre sur les données et que le biais dans les percentiles estimés était suffisamment important pour que les participants le jugent inacceptable. Cela s'explique par les propriétés de la GEV, qui est la distribution limite pour les maximums d'une séquence de variables aléatoires indépendantes et également distribuées. Pour bon nombre de bassins versants canadiens, le débit maximum annuel survient une fois par année, soit au moment de la fonte de neige printanière. Comme il n'y a qu'un seul événement de fonte de neige par année, on pourrait avancer qu'il n'y a pas de séquence à partir de laquelle on pourrait choisir un maximum et, par conséquent, les conditions d'applicabilité de la GEV ne sont pas remplies.

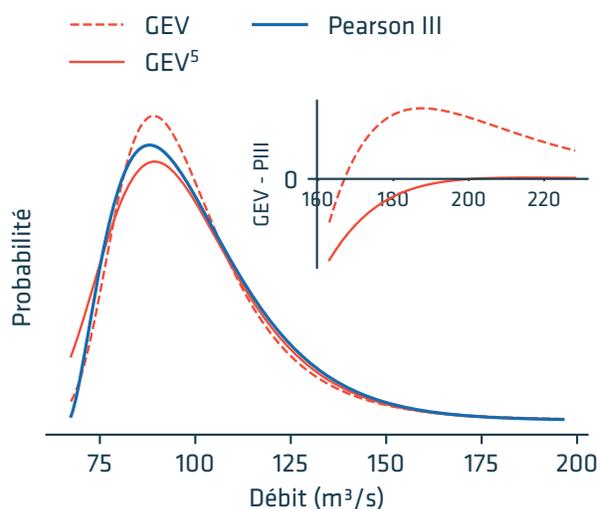


Figure 7 : Bien que la GEV ne reflète peut-être pas la distribution des débits annuels, elle peut représenter la forme des valeurs extrêmes dans la partie supérieure. Dans cet exemple, un échantillon de 5 000 valeurs tirées de la distribution Pearson de type III est ajusté par une GEV et une GEV⁵ (maximums par blocs de cinq valeurs, puis transformation de variable). La GEV et la GEV⁵ ne correspondent pas au mode de la distribution, mais la différence entre la distribution Pearson de type III et la GEV⁵ est proche de zéro pour les percentiles élevés.

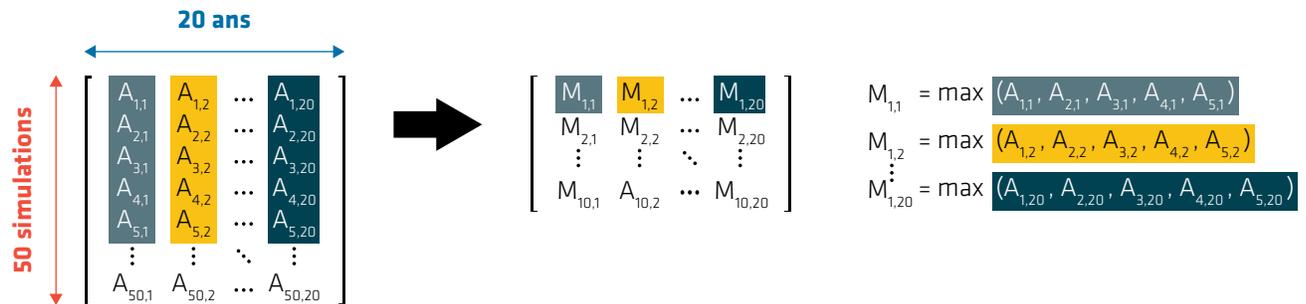


Figure 8 : Description de l'approche des maximums par blocs, qui consiste à prendre d'abord le débit maximum annuel pour chaque année (A), puis pour chaque bloc de cinq membres (M).

Ce problème a été résolu en prenant les maximums sur plusieurs années. Donc, plutôt que de les calculer sur une seule année, nous les avons calculés sur une séquence de cinq ans. La distribution ajustée représente ainsi une distribution de maximums multiannuels, et les paramètres sont transformés pour décrire la probabilité des maximums annuels. En d'autres mots, même si la vraie distribution des débits annuels peut suivre une distribution log Pearson de type III, en prenant les maximums multiannuels, il est possible d'utiliser la GEV pour approximer correctement la queue de la distribution et d'extrapoler à des percentiles élevés non observés (voir la figure 7).

De fait, en utilisant des séquences plus longues, on obtient des échantillons plus petits, et les petits échantillons entraînent évidemment une incertitude dans les paramètres. Voilà pourquoi les grands ensembles sont si utiles. Plutôt que d'extraire des maximums sur plusieurs années, on peut extraire les maximums de plusieurs membres de divers ensembles et obtenir quand même un échantillon de taille raisonnable.

Dans ce cas-ci, des blocs de 5 années hydrologiques ont été considérés comme un compromis acceptable. Les simulations du CansESM2-LE (50 membres) et du CESM1-LE (40 membres) ont été réparties en 10 et 8 blocs respectivement de 5 membres chacun. Pour chaque année et chaque bloc de 5 membres, les débits maximums par bloc ont été extraits (voir la figure 8). Cela a donné des échantillons finaux de 200 et 160 maximums par période de 20 ans pour le CanESM2-LE et le CESM1-LE, respectivement. Malgré cette réduction radicale de nos échantillons initiaux de 1 000 et 800 années hydrologiques, nous avons considéré qu'il était préférable de travailler avec une incertitude liée aux paramètres plus importante mais quantifiable plutôt que de travailler avec des biais plus importants mais non quantifiables liés à l'ajustement de la GEV.

Les paramètres de la distribution de la GEV ont ensuite été estimés à partir d'échantillons de maximums sur 5 ans de chaque modèle et une période de 20 ans, au moyen de la méthode du maximum de vraisemblance⁵. Une transformation a ensuite été appliquée aux paramètres pour décrire des événements annuels plutôt que des événements sur 5 ans. Ces paramètres de la GEV ont ensuite servi à calculer les 99,9 et 99,99^e percentiles, correspondant à des événements d'une probabilité annuelle de dépassement d'une fois en 1 000 et 10 000 ans respectivement.

Les participants ont reconnu que la saisonnalité et le volume des crues étaient des aspects importants, mais n'ont pas pu les inclure dans la méthodologie. Ceux-ci exigent une bonne connaissance des bassins versants étudiés quant au moment d'occurrence des saisons ainsi qu'à la durée des volumes de crues. Il se peut aussi que ces deux aspects changent dans le contexte du changement climatique et des analyses particulières doivent être effectuées à l'échelle des bassins versants. Au bout du compte, nous avons considéré qu'il s'agissait de questions complexes, surtout étant donné le nombre élevé de bassins versants dans cette étude. Néanmoins, ces questions sont utiles dans le cadre des mesures d'adaptation. Soulignons aussi qu'une crue printanière ne se gère pas comme une crue estivale ou automnale, où les niveaux d'eau dans les réservoirs sont probablement élevés.

⁵ Pour estimer l'incertitude liée aux paramètres, nous avons utilisé la méthode de rééchantillonnage bootstrap avec 10 000 prélèvements.

En résumé, voici les principales étapes de la méthodologie du groupe 1 appliquée à chaque bassin versant.

1. Étalonage du modèle hydrologique GR4J et du module CemaNeige sur les observations météorologiques et de débits.

Pour chaque simulation du modèle climatique :

2. Post-traitement de la simulation climatique en regard des observations météorologiques pour la température et la précipitation journalières.

Pour chaque période de 20 ans :

3. Exécution de simulations hydrologiques avec simulations climatiques post-traitées comme intrants
4. Extraction des débits maximums sur des blocs de 5 ans
5. Ajustement de la distribution de la GEV sur les maximums par blocs de 5 ans au moyen du maximum de vraisemblance
6. Transformation des paramètres de la GEV pour décrire des maximums sur 1 an
7. Calcul des crues millénales et décennales à partir des paramètres ajustés et transformés de la GEV
8. Rééchantillonnage bootstrap avec 10 000 prélèvements et répétition des étapes 4 à 7

Analyse de fréquence des crues avec prise en compte de l'incertitude – Méthodologie du groupe 2

Le groupe 2 avait pour tâche de développer un cadre général pour l'estimation du risque futur de crue tout en tenant compte de diverses sources d'information et de leur incertitude respective. Il a proposé d'inclure l'information de bassins versants avoisinants, de mesures du débit en amont, d'autres observations de débit et de projections de modèles hydroclimatiques. La combinaison de sources d'information indépendantes est avantageuse en ce que les erreurs aléatoires s'annulent mutuellement, ce qui entraîne des estimations plus précises. La figure 9 illustre ce processus par un simple exemple : trois mesures et la répartition de leurs erreurs sont combinées afin d'inférer la vraie valeur. Ce processus d'inférence donne plus de poids aux observations précises (étroite fourchette d'incertitudes) qu'aux vagues mesures (large fourchette d'incertitudes). Le groupe 2 voulait inférer la vraie valeur des paramètres de la GEV pour décrire la probabilité des débits maximums annuels.

En règle générale, on suppose implicitement que les observations de débits sont exactes. En fait, le débit entrant dans le réservoir est souvent indirectement estimé au moyen d'une équation qui fait le bilan entre les mesures journalières du niveau d'eau et le débit sortant total. Ce débit peut être estimé au moyen de mesures à une station de jaugeage en aval ou de calculs de l'énergie produite par les turbines et des déversements aux écluses. Le vent au-dessus du réservoir peut affecter les mesures locales du niveau d'eau et donner l'illusion que l'eau entre ou sort. Avec le temps, les turbines perdent de leur efficacité et le même débit génère moins d'électricité. Si le

débit sortant est estimé à partir de la production d'énergie, l'équipement vieillissant peut donner l'impression qu'il baisse. Selon le groupe 2, si l'estimation des paramètres de la GEV se fait directement à partir des observations, mais sans prendre en compte les sources d'erreur connues de celles-ci, la confiance accordée à l'estimation de la fréquence des crues pourrait être trop grande.

Pour se faire une idée des débits extrêmes au fil du temps, le groupe 2 a utilisé plusieurs observations : mesures de jauge hydrométrique en amont, débits entrants dans le réservoir estimés à partir du bilan hydrique, cours d'eau avoisinants et débits simulés au moyen de modèles hydroclimatiques. Il a ensuite défini un modèle probabiliste⁶ intégrant diverses sources d'information où les paramètres de la GEV évoluent lentement dans le temps pour reproduire les changements survenus dans les modèles climatiques et les observations.

L'incertitude liée aux mesures provient de diverses sources. Dans les cas des mesures de débits aux stations hydrométriques, les erreurs d'observations peuvent être causées par de la glace ou des débris qui restreignent l'écoulement, des changements dans la morphologie du lit de la rivière, des défaillances de l'équipement ou d'une extrapolation de la courbe de tarage. Bien que cette estimation pose des difficultés, celles-ci peuvent être atténuées par une surveillance continue de la qualité des données par des hydrologues et la maintenance continue et adaptative des instruments hydrométriques. Les débits entrants au réservoir sont habituellement estimés au moyen d'équations du bilan

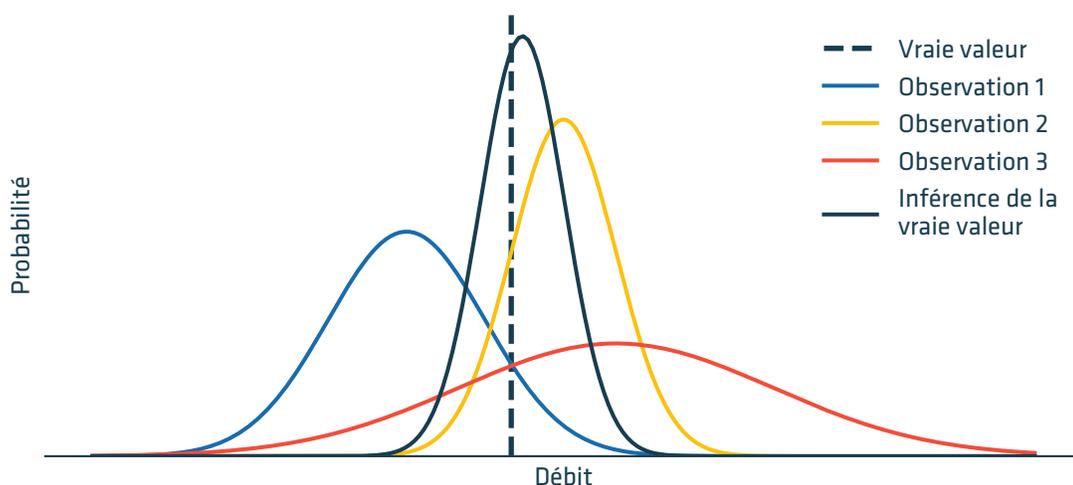


Figure 9 : La vraie valeur d'une certaine quantité (ligne pointillée) est mesurée par trois observations, chacune ayant sa propre incertitude (lignes colorées). En utilisant la théorie de la probabilité, il est possible de combiner l'information de toutes les observations pour calculer la distribution de probabilité de la vraie valeur (ligne noire).

hydrique, où les effets du vent, de l'équipement vieillissant, de fuites du réservoir et de l'évaporation peuvent influencer les calculs, mais des techniques de filtrage et la surveillance de la qualité des données peuvent réduire certaines incertitudes. Idéalement, chaque mesure devrait comporter une estimation du niveau de confiance. Malheureusement, les fournisseurs de données donnent rarement des estimations d'incertitude pour les observations. Pour remédier à cela, on peut définir des modèles d'erreur simplifiés, soit des distributions de probabilité donnant une représentation simplifiée des processus liés à la mesure des incertitudes. Par exemple, un modèle d'erreur utilisé par le groupe 2 suppose que les erreurs de mesure aux jauges modernes ont une distribution normale autour de la vraie valeur, avec un écart-type égal à 10 % de la valeur mesurée. Il s'agit bien sûr d'une simplification importante, car certaines erreurs hydrométriques sont asymétriques et varient de façon complexe selon les années et les saisons.

Analyse fondée sur les observations

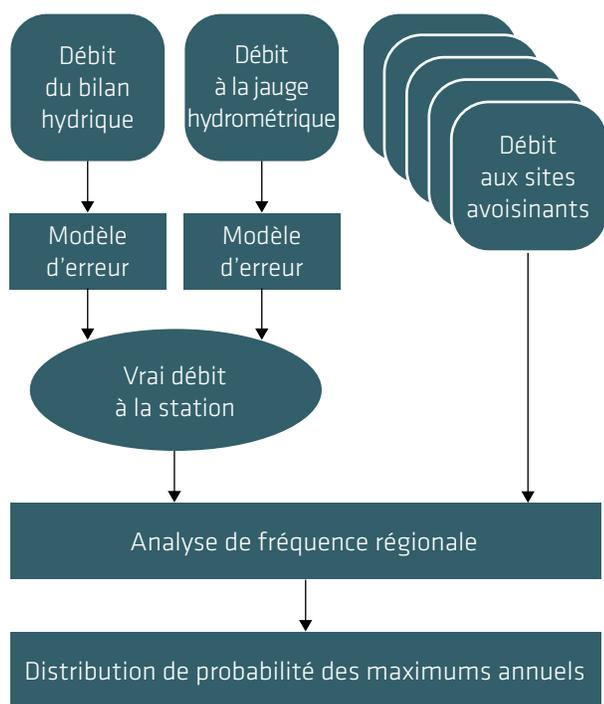


Figure 10 : Information sur les débits historiques à l'échelle de la station et de la région précisant les paramètres de la distribution de la GEV. Les paramètres de la GEV dépendant du temps sont inférés à partir des débits maximums annuels à l'échelle de la station et de la région au moyen d'une analyse de fréquence régionale probabiliste.

Pour les projections de débits futurs, définir de tels modèles d'erreur est très controversé. Les futurs débits simulés dépendent habituellement du modèle hydrologique et de son étalonnage, du scénario d'utilisation des terres, du modèle climatique et du scénario d'émissions de GES et d'aérosols.

Il n'existe aucun consensus sur la probabilité respective des divers scénarios de GES et d'aérosols, aucune mesure évidente pour déterminer si les modèles climatiques performant adéquatement pour les projections des débits maximums annuels futurs, aucune certitude que les biais du modèle seront encore là dans le futur et aucune garantie que la performance actuelle d'un modèle hydrologique se sera la même dans le futur. Dans ce contexte, il est très difficile de déterminer *a priori* des estimations d'erreur pour les projections de débits. Le groupe 2 a donc choisi une approche empirique fondée sur une pondération de modèles appliquée aux paramètres de la GEV, plutôt que de définir explicitement des modèles d'erreur sur les projections de débit.

La confiance relative aux observations par rapport aux projections climatiques dans le temps soulève une autre difficulté. Devant deux informations, à savoir des observations historiques de débits et des simulations de débits futurs, laquelle mérite le plus notre confiance pour la période 2020-2100? Pour 2020, les observations sont nettement plus convaincantes, mais le seront-elles encore en 2100? Dans quelles circonstances faut-il faire davantage confiance aux projections des modèles et à toutes leurs hypothèses qu'aux observations historiques? Or, il faut répondre à ces questions pour combiner adéquatement les débits historiques et projetés en une seule estimation.

Pour éviter d'avoir à définir des modèles d'erreur complexes dépendant du temps pour les projections de débits, le groupe 2 a pondéré les paramètres de la GEV estimés pour chaque projection. Les paramètres inférés à partir d'observations à l'échelle de la station et de la région sont combinés aux paramètres inférés à partir des projections des modèles selon des pondérations qui varient dans le temps. Cela produit un échantillon mixte de paramètres de la GEV estimés à partir de l'analyse historique à la station et l'analyse de projections, pondérés en fonction du temps selon les préférences de l'utilisateur.

La méthode génère un échantillon de paramètres de la GEV décrivant la probabilité d'observer dans le temps des débits maximums annuels. On peut tirer de l'information de cet échantillon de deux façons. La première, soit la loi prédictive *a posteriori*, consiste à générer des valeurs aléatoires distribuées de la GEV à partir de la distribution *a posteriori* inférée⁷ de l'ensemble de paramètres et à trouver les percentiles d'intérêt (99,9 % et 99,99 %). La seconde, soit la loi prédictive *a posteriori* des percentiles, consiste à calculer le percentile d'intérêt pour chaque échantillon de paramètres de la GEV. Il en résulte une distribution *a posteriori* de percentiles, qui donne une mesure du degré de confiance accordé à l'estimation du percentile. La figure 13 montre ces deux méthodes. La loi prédictive *a posteriori* a l'avantage de fournir une valeur unique qui prend en compte les incertitudes, ce qui est très utile et précieux pour les analyses du risque.

7 En termes bayésiens, on parle de distributions *a priori* et *a posteriori* pour décrire notre connaissance avant et après l'analyse des données.

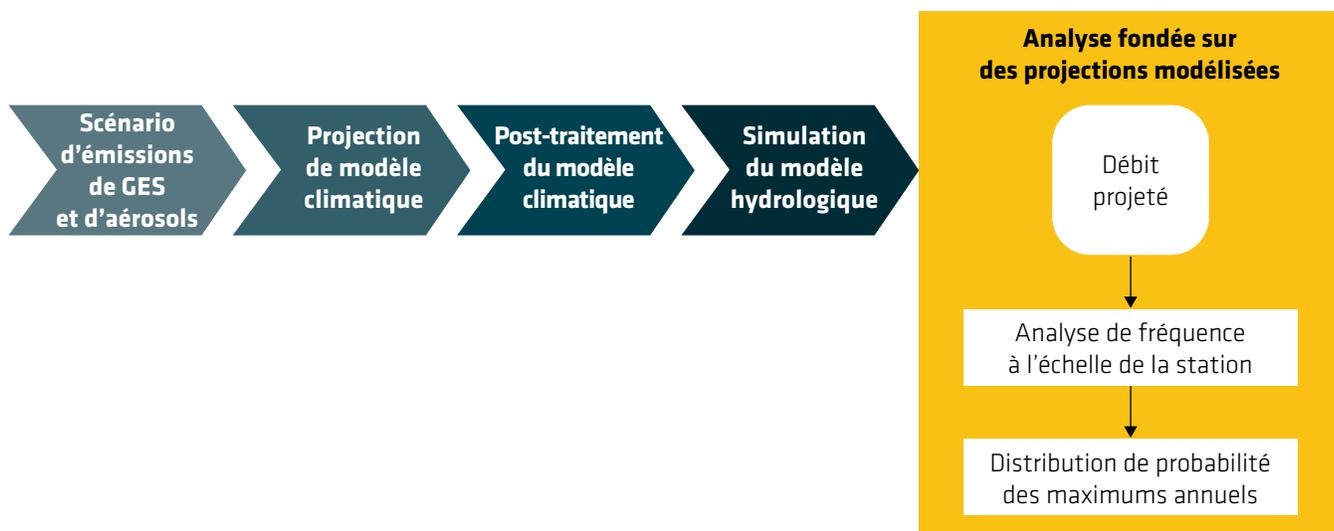


Figure 11 : Information sur les débits provenant de projections de débits futurs. Pour chaque projection du modèle hydroclimatique, les paramètres de la GEV dépendant du temps sont estimés à partir d'une simulation des débits maximums annuels.

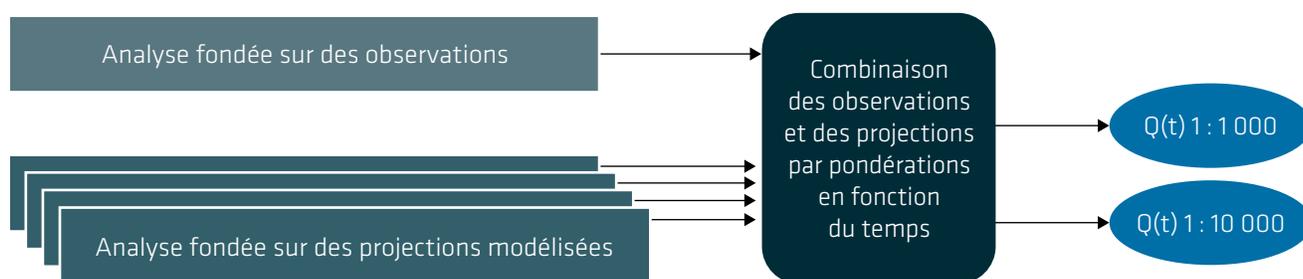


Figure 12 : Combinaison des observations historiques et des projections futures. Les paramètres de la GEV inférés au moyen de l'analyse de fréquence régionale sont combinés aux paramètres de la GEV inférés à partir de chaque projection du modèle hydroclimatique au moyen de pondérations dépendant du temps.

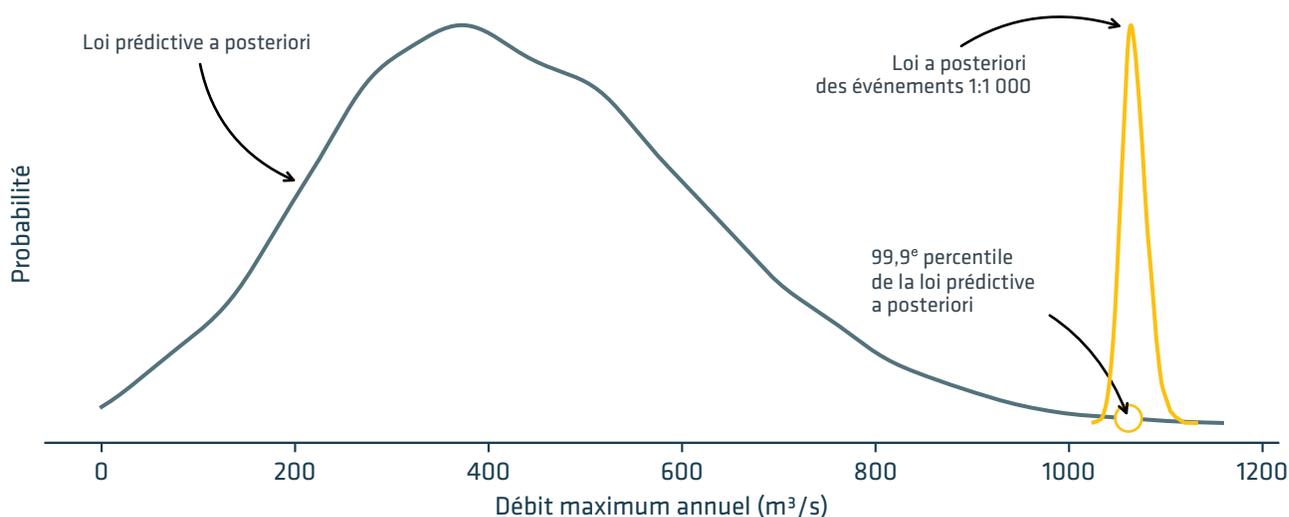


Figure 13 : Figure conceptuelle montrant la loi prédictive a posteriori des débits maximums annuels (ligne noire) et la distribution a posteriori (ligne jaune) pour le percentile 1 : 1 000. La loi prédictive a posteriori et le percentile de la loi prédictive a posteriori sont tracés sur deux différentes échelles verticales.

Mesurer le risque dans un climat en constante évolution

Dans un contexte stationnaire, la période de retour est bien définie. Par exemple, si la probabilité de dépassement d'une valeur de conception est de 10 %, on s'attendra à ce que celle-ci soit dépassée une fois tous les 10 ans. Dans un contexte non stationnaire, la relation entre la période de retour et la probabilité de dépassement ne tient plus parce que la probabilité de dépassement pour un même événement varie dans le temps. Pour prendre en compte cette non-stationnarité, le groupe 2 a suggéré l'approche minimax pour évaluer les critères de conception. Selon cette approche, la valeur minimax de conception correspond à l'événement de crue dont la probabilité de dépassement maximale au cours de la durée de vie nominale de l'ouvrage n'excède pas un pourcentage donné (Rootzén et Katz, 2013). Si les crues extrêmes gagnent en intensité dans le temps, la valeur minimax correspondra aux conditions à la fin de la durée de vie nominale. Si, au contraire, elles diminuent d'intensité, elle correspondra au début de la durée de vie nominale. Les critères minimax analysent essentiellement l'entière durée de vie nominale et en extraient le scénario du pire. La figure 14 montre comment calculer les durées de vie de conception selon l'approche minimax à partir d'un profil de risque en constante évolution.

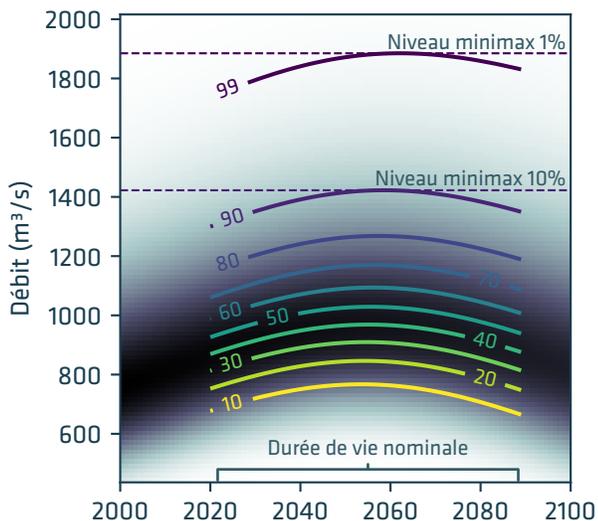


Figure 14 : La valeur minimax de conception est définie de façon que la probabilité de dépassement maximale dans une année donnée de la durée de vie nominale de l'ouvrage n'excède pas un pourcentage donné. Dans cet exemple, les lignes horizontales pointillées correspondent à 1% et à 10% de la durée de vie nominale calculée sur la vie de l'ouvrage. Les lignes continues correspondent aux contours de la fonction de densité cumulée des débits maximaux annuels.

Avec l'approche minimax, il faut souligner que l'incertitude affecte directement le débit de crue de conception. La probabilité de dépassement d'un seuil donné reflète non seulement la réalité des processus hydroclimatiques sous-jacents, mais aussi notre propre évaluation subjective des incertitudes. Pour illustrer cela, la figure 15 montre deux distributions de maximums annuels qui prennent en compte la distribution des incertitudes paramétriques. La première distribution est estimée à partir d'un échantillon de 30 valeurs et la deuxième, d'un échantillon de 100 valeurs, les deux provenant de la même population. La première est plus aplatie et plus large, ce qui indique que les valeurs sont moins certaines. Étant donné la queue plus large, le 99^e percentile (cercle) de la distribution plus incertaine est supérieur à celui de la deuxième distribution, et les deux 99^e percentiles probabilistes sont plus élevés que les 99^e percentiles (triangle) qui ne prennent pas en compte l'incertitude paramétrique.

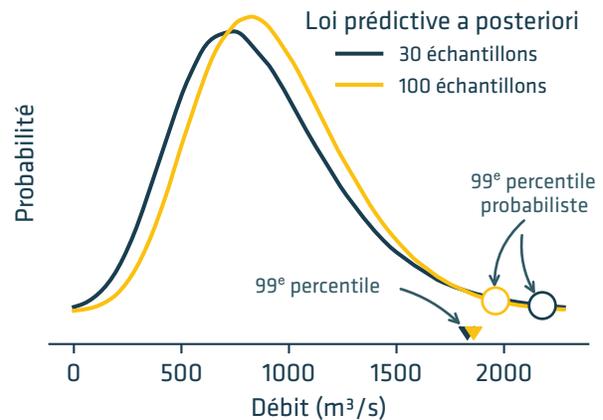


Figure 15 : Probabilité a posteriori des débits maximaux annuels estimés à partir d'échantillons de 30 et de 100 valeurs. Un petit nombre d'échantillons entraîne une incertitude plus élevée, aplatisant la distribution et donnant des valeurs plus élevées pour les percentiles supérieurs (cercles). Les 99^e percentiles estimés sans prise en compte des incertitudes (triangles) sont moins élevés.

Comparaison des méthodologies des groupes 1 et 2 pour du plan et de l'analyse de fréquence des crues avec minimisation du risque

Les groupes 1 et 2 ont abordé différemment l'analyse des maximums annuels. Le groupe 1 a analysé ceux-ci sur des périodes de 20 ans, en supposant que les paramètres de la GEV demeuraient constants dans chaque période. Le groupe 2, en revanche, a considéré que les paramètres de la GEV évoluaient tout au long de la période 1950-2100⁸. La figure 16 montre les résultats pour la période 2080-2100 (par rapport à la référence 1990-2010), en regroupant les résultats du groupe 2 dépendant du temps pour la période de 20 ans.

Grosso modo, les méthodes et les ensembles de données ont dégagé des résultats généralement cohérents pour ce qui est du changement relatif dans les débits maximums annuels (côté droit de la figure). Avec une meilleure prise en compte de l'incertitude, le groupe 2 a obtenu des distributions de maximums annuels plus larges que celles du groupe 1 (deuxième rangée vs la première), élargissant ainsi la fourchette de changements relatifs potentiels. Par ailleurs, la différence dans l'écart des résultats du CanESM2-LE et du CMIP5 a causé une certaine surprise. Le CanESM2-LE compte 50 membres, alors que la plupart des simulations du CMIP5 n'en comptent qu'un seul. On s'attendrait à ce qu'un moins grand nombre de données dans CMIP5 dégage des résultats plus incertains, donc une fourchette de changements relatifs plus large, mais on observe le contraire. Cela peut être dû au fait que l'analyse du CanESM2-LE comporte des blocs de maximums de 5 ans, et celle du CMIP5, de 1 an – ce qui, à notre avis, sous-estime les maximums. Cette option a été retenue parce qu'en prenant des maximums par blocs de 5 ans sur des séries de 80 ans (4 périodes de 20 ans), on obtiendrait des séries de 16 valeurs, ce qui est insuffisant pour estimer les trois paramètres de la GEV et leur évolution temporelle. En rétrospective, il aurait peut-être été préférable de grouper tous les divers modèles en un modèle probabiliste, mais cela aurait nécessité d'autres recherches.

Bien que les résultats des groupes 1 et 2 correspondent assez bien dans ce cas-ci, on ne peut en dire autant pour tous les bassins versants et toutes les périodes, surtout pour ce qui est des événements millénaux et décennaux. Les résultats du groupe 1 varient considérablement d'une période à l'autre, alors que ceux du groupe 2 évoluent de façon régulière – en raison de contraintes appliquées aux paramètres de la GEV –, tandis que l'incertitude paramétrique ne peut à elle seule expliquer l'ampleur des fluctuations entre les périodes du groupe 1. Après examen, ces fluctuations pourraient être attribuées au modèle hydrologique et à ses paramètres. Des expériences similaires réalisées avec d'autres modèles hydrologiques simples globaux ou le même modèle ayant un ensemble de paramètres différents mais également plausibles ont donné des résultats nettement différents pour les événements millénaux et décennaux. Autrement dit, la queue de la distribution de la GEV est très sensible à des changements apparemment mineurs dans le comportement du modèle hydrologique.

Cette comparaison aux résultats du groupe 2 et aux expériences de modélisation supplémentaires qui visaient à mieux comprendre les résultats entre les périodes souligne la sensibilité des débits millénaux et décennaux aux hypothèses de modélisation statistique et hydrologique. Un seul modèle hydrologique simple global a l'avantage de faciliter l'étude de centaines de bassins versants, comme on le verra dans la prochaine section. Cependant, étant donné la configuration simpliste du modèle hydrologique, les résultats des bassins versants individuels ne seraient pas assez robustes pour être pris en compte dans une évaluation du risque.

Vu ces incertitudes et l'objectif du projet, soit de fournir des lignes directrices pour un processus décisionnel qui minimise le risque, on utilise la queue supérieure de l'enveloppe d'incertitudes du groupe 1 (le 90^e percentile dans la distribution des changements relatifs) pour faire une estimation prudente.

⁸ Selon l'approche du groupe 2, seuls les paramètres d'emplacement et d'échelle varient dans le temps, et le paramètre de forme demeure constant. Cela pourrait entraîner une sous-estimation des changements futurs dans les valeurs extrêmes; pour assouplir cette hypothèse, il faudrait cependant en formuler d'autres sur l'évolution temporelle du paramètre de forme.

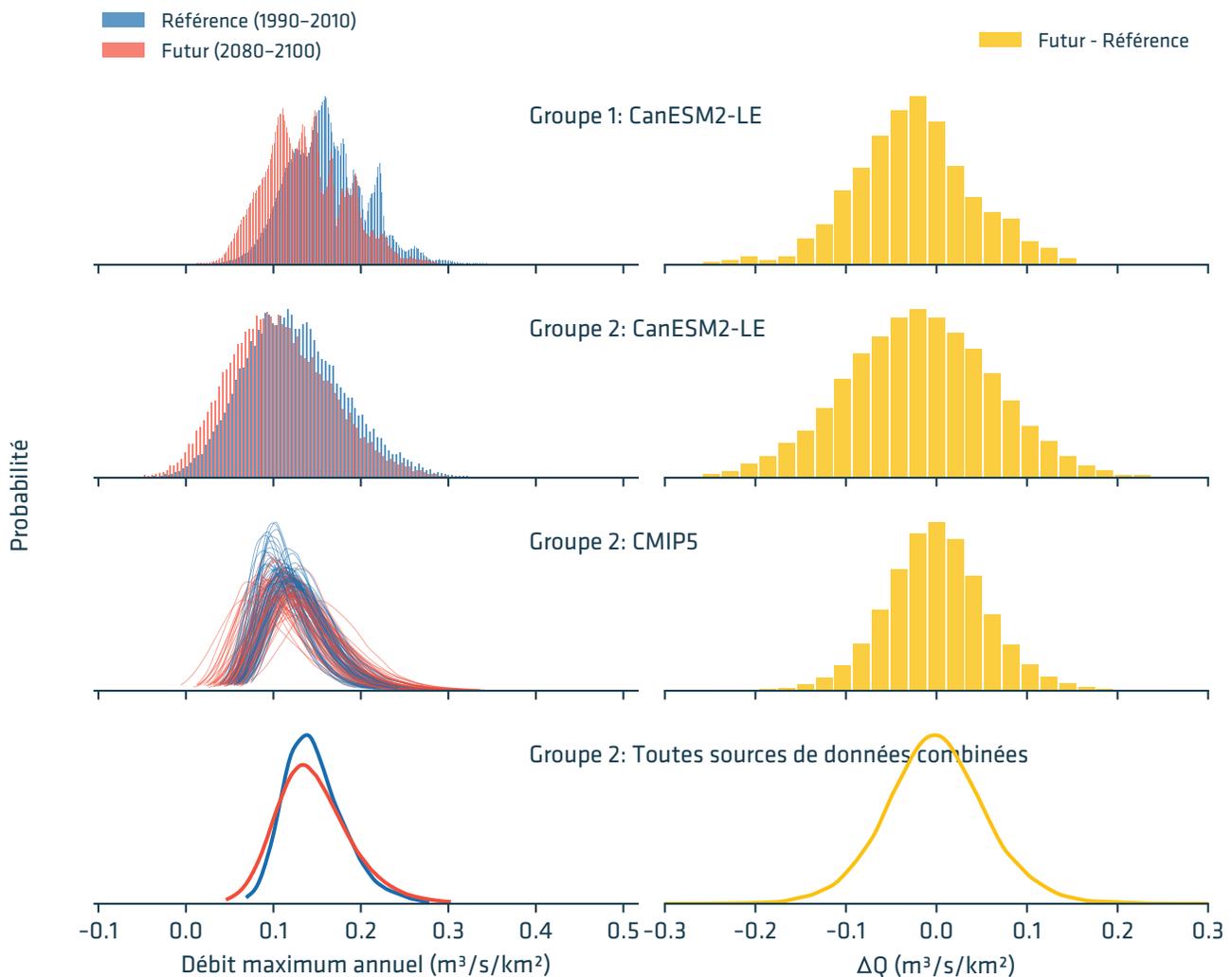


Figure 16 : Comparaison des résultats des groupes 1 et 2 pour le bassin versant de Kénogami. Le côté gauche de la figure montre la distribution des débits maximums annuels pour la période de référence (1990-2010) et future (2080-2100), et le côté droit, la différence entre les deux. Le premier histogramme montre les résultats de l'analyse d'incertitude bootstrap du groupe 1 pour le CanESM2-LE. Le deuxième montre les résultats de l'approche du groupe 2 appliquée au CanESM2-LE seulement. Le troisième montre les résultats de 69 projections de modèles hydroclimatiques, comptant 29 différents MCG du CMIP5 pilotés par quatre scénarios d'émissions de GES et d'aérosols : RCP 2.6 (9), RCP 4.5 (26), RCP 6.0 (7) et RCP 8.5 (27). Les distributions de la référence et du futur sont montrées individuellement, tandis que le graphique de droite montre le delta agrégé, donnant ainsi la même pondération à chaque simulation hydroclimatique. Le dernier graphique montre les résultats du groupe 2, où toutes les sources de données ont été combinées. Cela comprend les observations à l'échelle de la station et de la région, les résultats du CESM1-LE et du CanESM2-LE, et les projections du CMIP5.

RÉSULTATS DE L'ANALYSE DE FRÉQUENCE DES CRUES EXTRÊMES POUR LE CANADA

La méthodologie du groupe 1 a été appliquée à 533 bassins versants du Canada. Les débits maximums annuels simulés par le GR4J et CemaNeige avec les scénarios climatiques du CanESM2-LE et du CESM1-LE (sorties post-traitées) ont été tirés de Martel *et al.* (2021). S'appuyant sur les résultats comparatifs des groupes 1 et 2, les résultats pour l'ensemble du Canada ont été générés au moyen d'une version légèrement modifiée de la méthode du groupe 1. Les trois changements suivants y ont été apportés. D'abord, les cartes ont été créées pour la période 2080-2100 seulement, et ce, parce qu'en captant le signal climatique le plus fort possible, on préciserait le signe du changement. De faibles tendances dans le changement

climatique ont moins de chances d'émerger du bruit de fond sur de courts horizons temporels. Ensuite, l'estimation des paramètres de la GEV a été réalisée selon la méthode du moment pondéré en fonction de la probabilité plutôt que la méthode du maximum de vraisemblance. Cela réduit les coûts de calcul et fournit souvent des paramètres plus robustes. Enfin, au lieu de considérer les changements dans la meilleure estimation possible pour le futur et la référence, nous avons calculé le changement entre la référence et le futur pour chaque percentile bootstrap, puis avons choisi le 90^e percentile du changement (voir la figure 17). On réduit ainsi la probabilité de sous-estimer les impacts du changement climatique.

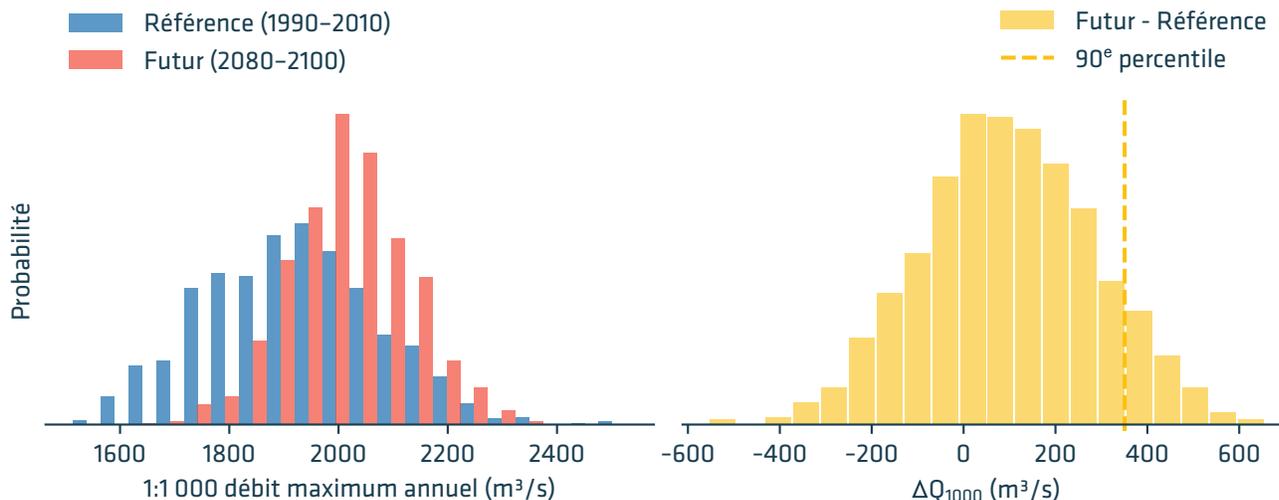


Figure 17 : Du côté gauche, histogrammes des débits maximums annuels pour la référence et le futur ayant une chance sur 1 000 de se produire, obtenus par bootstrap. Du côté droit, différence entre les valeurs du futur et de la référence, dont le 90^e percentile est indiqué par la ligne pointillée. Les valeurs proviennent du bassin versant d'Ashuapmushuan et du CESM1-LE.

Cartes du changement dans la fréquence des crues au Canada

Les cartes du changement relatif dans les événements de crues millénaux et décennaux pour la période 2080-2100 par rapport à la référence (historique; 1990-2010) ont été produites pour le CanESM2-LE dans les figures 18 et 19. Le changement relatif est calculé comme suit :

$$\Delta = \frac{\text{futur} - \text{référence}}{\text{référence}} \times 100$$

avec un code de couleur attribué à chaque bassin versant. Les bassins versants hachurés sont ceux pour lesquels les deux ensembles s'accordent quant au signe du changement.

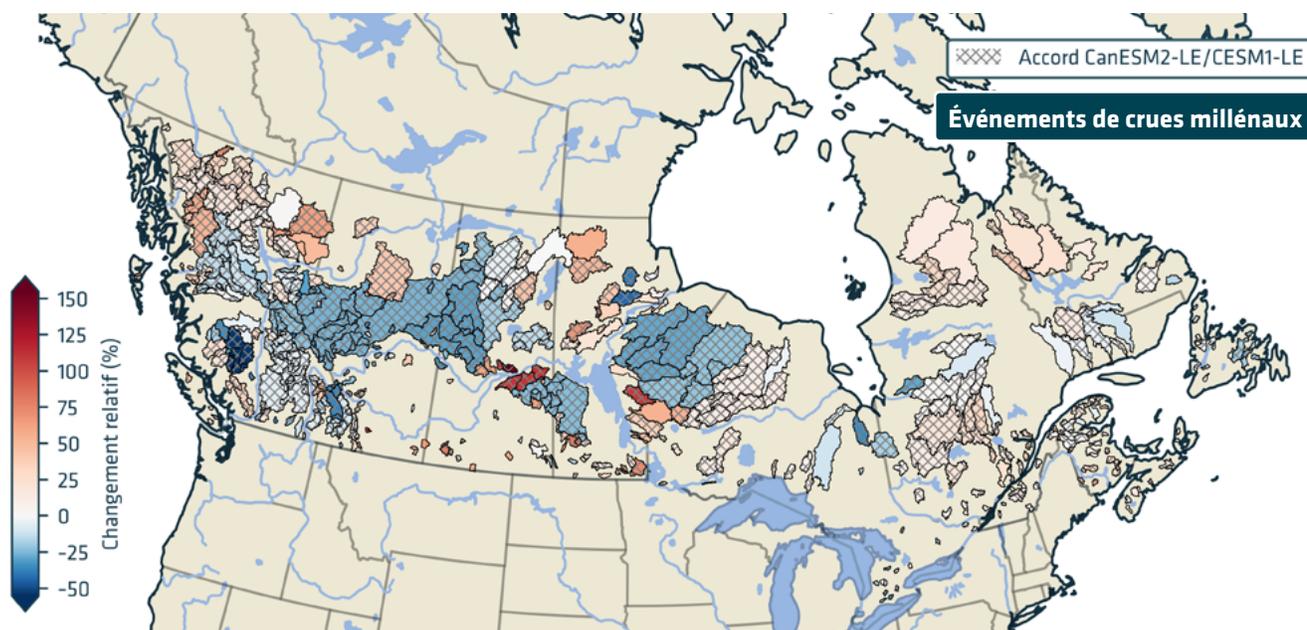


Figure 18 : Changement relatif entre 1990–2010 et 2080–2100 dans les événements de crues millénaux au Canada, estimé selon l'approche du groupe 1 appliquée au CanESM2-LE et utilisant le 90^e percentile de l'échantillon bootstrap.

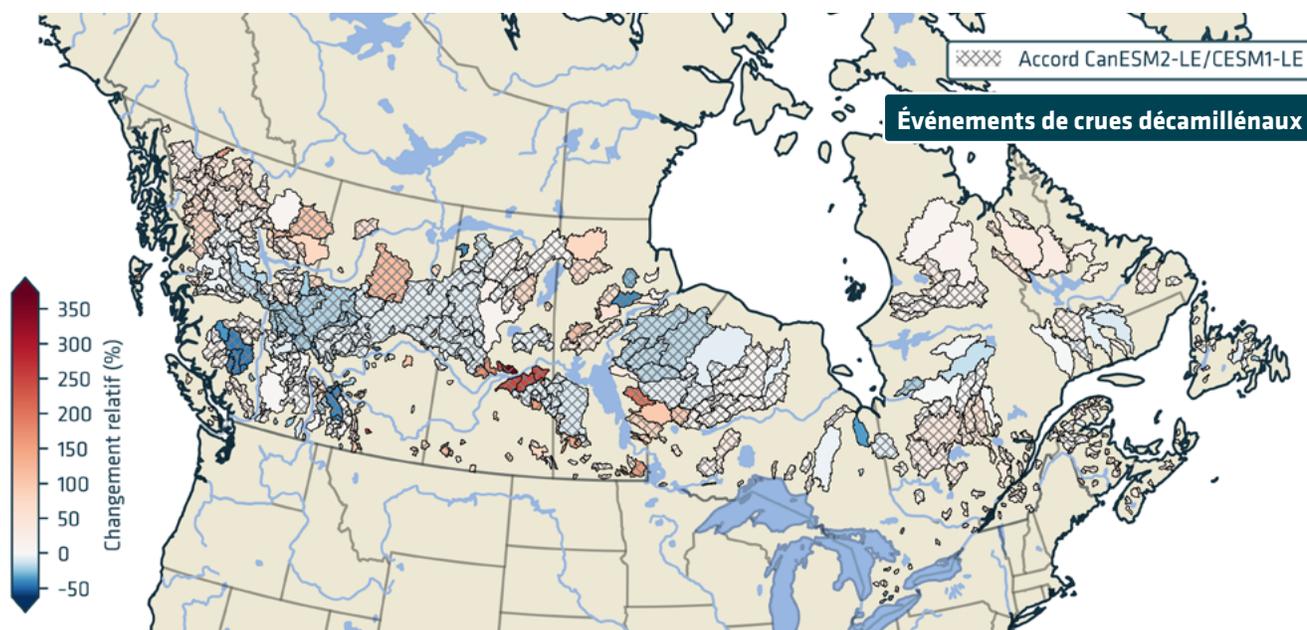


Figure 19 : Changement relatif entre 1990–2010 et 2080–2100 dans les événements de crues décennales au Canada, estimé selon l'approche du groupe 1 appliquée au CanESM2-LE et utilisant le 90^e percentile de l'échantillon bootstrap.

LES BARRAGES AU 21^E SIÈCLE – MESURES D’ADAPTATION

Contexte

Bien que les groupes 1 et 2 aient élaboré les méthodes d'évaluation des impacts du changement climatique sur le débit de crue de conception, c'est au groupe 3 que revenait la tâche d'élaborer une méthode ou un outil permettant aux propriétaires de barrage d'étudier ces impacts et de proposer des solutions d'adaptation aux changements projetés. Cette tâche était complexe à plusieurs égards.

La sécurité des barrages est habituellement gérée en posant dès le départ que la vie fonctionnelle de l'actif se déroule dans un climat de stationnarité hydrologique. Les organismes de réglementation et autres parties prenantes reconnaissent de plus en plus les impacts que le changement climatique peut avoir sur la sécurité des barrages. Cependant, il y a peu de lignes directrices sur la manière d'inclure le risque futur du changement climatique dans la gestion de la sécurité des ouvrages existants et planifiés (ACB, 2007; FEMA, 2013; IHA, 2019). Certains organismes ont commencé à ébaucher des politiques d'adaptation au changement climatique. Toutefois, leurs efforts demeurent largement préliminaires (p. ex., Corps du génie de l'armée de terre des États-Unis – USACE, 2014, 2016; Bureau of Reclamation – USBR, 2014) et

sont principalement axés sur la mise à jour des processus de planification visant à reconnaître formellement le besoin de prendre en compte les risques du changement climatique plutôt que de proposer des méthodes prescriptives pour la planification de l'adaptation.

Il est très important de reconnaître que l'élaboration de solutions d'adaptation dépend fortement des contraintes d'exploitation des bassins versants et systèmes réglementés propres aux stations et aux ouvrages. Bien que le système de réglementation ajoute à la complexité de l'évaluation du changement climatique, la modification du système ou l'adaptation opérationnelle constitue une mesure initiale à faible regret pour la gestion du changement hydroclimatique potentiel.

Dans les cas où l'adaptation opérationnelle ne peut à elle seule accommoder le changement hydroclimatique futur, l'adaptation structurelle représente une méthode secondaire pour la prise en compte des impacts projetés du changement climatique. La modification et la modernisation des ouvrages en vue de les adapter à de fortes crues sont

Adaptation opérationnelle

Pour illustrer les enjeux de l'adaptation des ouvrages existants, prenons le cas hypothétique d'un réservoir aux prises avec de fortes hausses des niveaux d'eau (débit de pointe et volume) en raison du changement climatique. Il serait possible d'accroître la capacité de stockage du réservoir pour atténuer le risque de crue en réduisant le niveau normal d'exploitation tout au long de l'année – ce qui est considéré comme une stratégie d'adaptation à faible regret (c.-à-d., coûts peu élevés et avantages importants). Cette mesure atténue le risque accru d'un débit de crue de conception plus élevé, mais réduirait probablement la performance opérationnelle de l'ouvrage et la capacité de production dans les conditions climatiques actuelles; par conséquent, ce ne serait pas une véritable solution à faible regret. Néanmoins, elle démontre le potentiel de mise en œuvre d'une mesure efficace qui ne requiert pas de changements physiques à l'infrastructure existante.

Toutefois, ce simple cas n'est pas représentatif de la plupart des bassins versants et des réseaux aux prises avec les défis que pose l'adaptation au changement climatique. La plupart des bassins comportent un réseau de plusieurs réservoirs gérés au moyen de systèmes et de politiques complexes pour optimiser la performance et répondre aux demandes de diverses parties prenantes. Malgré cela, l'adaptation opérationnelle au changement climatique demeure une solution viable. Dans les dernières années, le MELCC a déployé avec succès des projets interdisciplinaires pour évaluer l'adaptation au changement climatique de trois bassins versants gérés par des barrages sur le cours supérieur de la rivière Saint-François (Lachaut et Tilmant, 2020; Tilmant, Lachaut, Mercille, Marceau et Faucher, 2019).

des pratiques bien établies dans le domaine des barrages. Cependant, ces mesures plus coûteuses exigent un effort considérable en matière de planification, de conception et de construction. D'autres facteurs tels que l'autorisation environnementale et l'exploitation à long terme peuvent aussi limiter la faisabilité et la désirabilité de ces mesures.

Enfin, l'adaptation réglementaire peut être vue comme un troisième moyen de tenir compte du risque supplémentaire du changement climatique à un site particulier. Ce type d'adaptation consiste à reconsidérer la base du débit de crue de conception d'un ouvrage et son mode d'opération, sachant que ces deux critères ont été formulés suivant l'hypothèse fondamentalement réductrice de la stationnarité hydroclimatique. Par exemple, en reconsidérant le risque de crue à un site non pas en fonction du débit de crue de conception standard, mais plutôt du débit de crue de conception prenant en compte le risque, on pourrait constater que la capacité actuelle d'évacuation des crues est adéquate pour les conditions climatiques futures.

Par ailleurs, les parties prenantes pourraient découvrir de nouvelles ou de meilleures solutions d'exploitation et d'adaptation si elles discutaient ouvertement d'éventuels compromis entre des contraintes opérationnelles servant leurs intérêts ou des contraintes favorisant une plus grande résilience climatique. La mise en œuvre de ces solutions exige bien sûr l'adhésion des organismes de réglementation et des parties prenantes; par conséquent, la faisabilité de la mise en œuvre variera considérablement.

Les nombreuses spécificités des mesures d'adaptation déjà mentionnées limitent la faisabilité d'une approche uniforme pour prendre en compte les impacts du changement climatique. La disponibilité des données relatives aux estimations du débit de crue de conception et la performance des stations exercent aussi une influence sur le niveau de détail et de complexité pour un site donné. Les solutions d'adaptation prises en considération requièrent donc une certaine flexibilité pour tenir compte des nombreuses conditions auxquelles on pourrait s'attendre.

Objectifs et contraintes

À un niveau élevé, le travail du groupe 3 partait de la prémisse voulant qu'un barrage donné ait la capacité de résister à un risque de crue particulier (c.-à-d. le débit de crue de conception) ou de le gérer en toute sécurité. Cependant, il y a une limite – un seuil ou une ampleur de crue – à ce qu'un ouvrage peut gérer en toute sécurité. Le groupe 3 s'est donc concentré sur une démarche qui permettrait aux propriétaires de barrage d'utiliser les résultats des groupes 1 et 2 : d'une part pour comprendre les impacts du changement climatique sur le risque futur de crues dépassant le seuil critique d'un ouvrage et, d'autre part, pour déterminer les mesures d'adaptation faisables pour gérer le changement potentiel du risque décrit par les futurs scénarios climatiques.

La démarche devait être assez flexible pour que les responsables de la sécurité des barrages puissent l'utiliser dans divers contextes. En voici les principaux éléments :

- ▷ Disponibilité et richesse relatives des études ou outils hydrotechniques actuels et des estimations du débit de crue de conception pour les ouvrages d'intérêt;
- ▷ Type d'information disponible sur les scénarios climatiques du futur (débits de pointe, volumes de crue) et description de l'incertitude;
- ▷ Adaptabilité de la gestion des réservoirs aux diverses politiques de gestion capables d'améliorer l'adaptation, idéalement selon des approches sans regret;

- ▷ Adaptabilité des caractéristiques physiques des ouvrages hydroélectriques quant aux améliorations structurelles ou ajustements de conception;
- ▷ Ouverture d'esprit des parties prenantes pour examiner des moyens novateurs d'aborder les contraintes de gestion, y compris l'acceptation d'une certaine perte de performance en échange d'une robustesse accrue aux impacts du changement climatique.

Il était devenu évident qu'un examen préalable de haut niveau serait l'approche idéale, car bon nombre de parties prenantes reconnaissaient qu'il s'agirait probablement de leur première tentative de solution au problème d'adaptation et que l'examen serait mené avec l'information et les ressources limitées disponibles. Ces parties prenantes reconnaissaient aussi que, dans certains cas, le risque de crues futures pour un barrage ou un ouvrage serait fortement dépendant de la réponse du réseau au changement climatique. Malgré les limites mentionnées ci-dessus, le recours à un examen de haut niveau comme première étape fournissait de précieuses informations et un contexte encadrant l'exploration d'études quantitatives exhaustives et approfondies qu'un propriétaire de barrage aimerait réaliser pour peaufiner sa mesure d'adaptation préférée.

Normes réglementaires et approches par analyse du risque pour la sécurité des barrages

Le but ultime de la gestion de sécurité est la gestion du risque, soit de déterminer ce qui pourrait mal tourner, en évaluer la probabilité et les conséquences potentielles (ACB, 2013).

L'approche conventionnelle de l'évaluation hydrologique de la sécurité des barrages est normative. Elle comporte des facteurs de sécurité prudents, conçus pour minimiser les risques pour les communautés en aval. Au Canada, la plupart des cadres réglementaires sont conformes aux *Recommandations pour la sécurité des barrages* de l'ACB. Le facteur sécurité qui y est décrit correspond au débit de crue de conception. Pour un barrage donné, ce débit est déterminé en fonction de la gravité des conséquences possibles (p. ex., faibles, élevées, extrêmes) d'une rupture. Les décès potentiels en sont une conséquence. Pour un barrage à faibles conséquences, l'ACB recommande un débit de crue de conception pour un événement millénal, alors que pour un barrage à conséquences élevées et extrêmes, on recommande un débit de crue décennal ou la crue maximale probable (CMP). Dans certains territoires, ces dispositions sont inscrites dans la législation et s'appuient sur une approche statistique déterministe pour les événements millénaux et décennaux.

L'approche tenant compte du risque recommandée par l'ACB (2013) caractérise divers événements non souhaitables en fonction de leur probabilité et de leurs conséquences potentielles. Elle considère de nombreux facteurs, dont le débit, la performance structurelle, les marges de sécurité, les facteurs humains et les opérations, et comporte une analyse des modes de défaillance. La tolérance au risque y est traitée comme un choix politique explicite qui établit clairement les compromis entre l'efficacité économique et l'équité sociale. Son objectif sous-jacent est de faire en sorte que les risques liés aux barrages soient réduits au niveau le plus bas que l'on peut raisonnablement atteindre. Bien que cette approche exige une analyse plus approfondie, elle permet aux propriétaires et aux organismes de réglementation de mettre dans la balance les divers risques et d'affecter les ressources là où elles sont les plus nécessaires pour obtenir les résultats voulus en matière de sécurité (ACB, 2013).

L'approche retenue

Pour atteindre les objectifs cités précédemment, le groupe 3 a retenu la méthodologie d'examen préalable de haut niveau. Celle-ci consiste à déterminer la vulnérabilité relative d'un ouvrage du bassin versant au changement climatique et à générer un ensemble élémentaire d'options conceptuelles que des études ultérieures pourront considérer en vue d'améliorer la résilience. La méthode élaborée par le groupe 3 s'appuie sur les lignes directrices publiées dans les documents *Global Climate Change, Dams, Reservoirs, AMD Related Water Resources* (CIGB, 2016) et *Climate Risk Informed Decision Analysis (CRIDA): Collaborative Water Resources Planning for an Uncertain Future* (UNESCO et ICIWaRM, 2018).

La figure 20 donne un aperçu de haut niveau des cinq principales étapes de la méthode du groupe 3.



Figure 20 : Méthodologie du groupe 3.

La performance et la faisabilité de mesures d'adaptation opérationnelles et structurelles potentielles ont été évaluées à l'aide de quatre scénarios élaborés par la CIGB (2016) (voir la figure 21) pour l'étape 4 de la méthodologie.

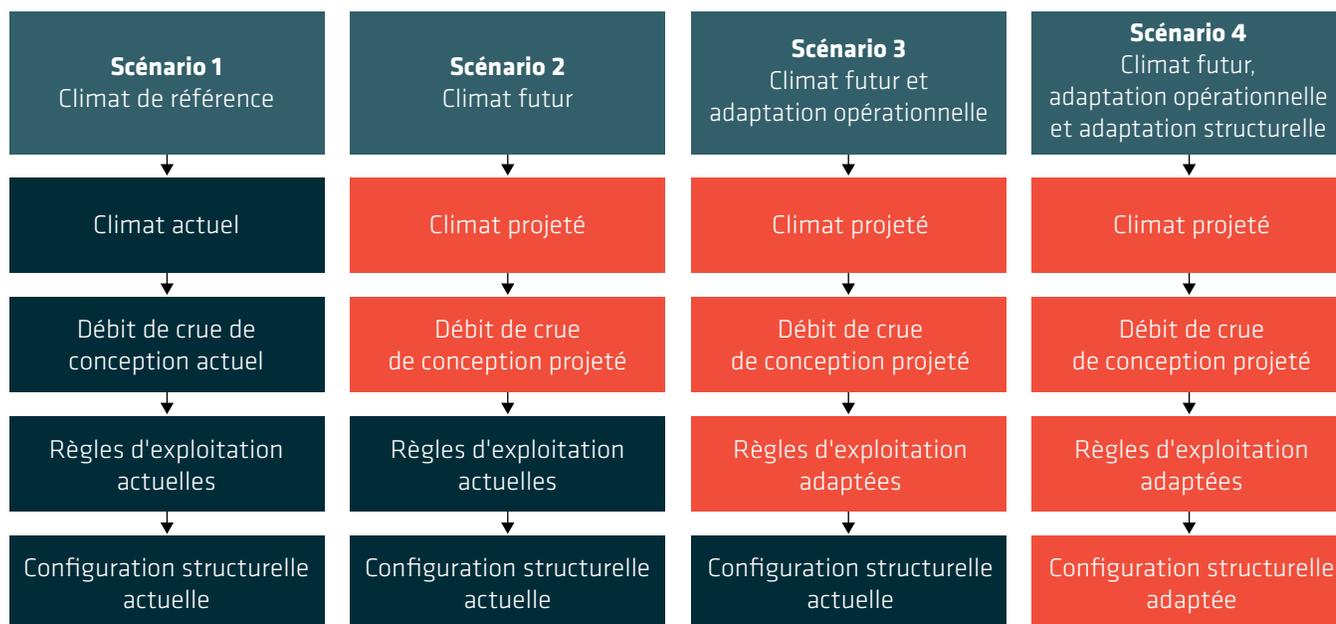


Figure 21 : Quatre scénarios, chacun comportant quatre étapes pour l'évaluation de mesures d'adaptation potentielles (CIGB, 2016).

Étude de cas – Centrale du bassin versant de la rivière Winnipeg

À titre d'illustration, la méthodologie du groupe 3 appliquée à une centrale existante du bassin versant de la rivière Winnipeg est décrite ci-dessous.

Figure 22 : Centrale du bassin versant de la rivière Winnipeg





Figure 23 : Bassin versant de la rivière Winnipeg.

Le bassin versant de la rivière Winnipeg, situé dans la partie est du Bouclier canadien, couvre une grande région du nord-ouest de l'Ontario et de petites régions du sud-est du Manitoba et du nord du Minnesota. Il draine une région d'environ 150 000 km² et se jette dans le lac Winnipeg. De là, l'eau coule vers le nord jusqu'au fleuve Nelson, puis dans la baie d'Hudson. Riche en lacs et en vastes forêts, le bassin se compose généralement de sols peu profonds recouvrant un substrat rocheux. Cette région peu peuplée abrite d'importantes installations de pâtes et papiers, plusieurs communautés des Premières Nations, des chalets saisonniers et une industrie touristique florissante. Le bassin versant a une longue histoire de développement et de réglementation hydroélectriques, et plusieurs centrales y ont été construites au tournant du 20^e siècle.

L'étude de cas porte sur un ouvrage vieillissant mais bien entretenu caractéristique de plusieurs centrales du bassin versant. Le barrage se situe à proximité d'un important lotissement urbain et de nombreux chalets saisonniers. Le bief amont de la centrale dispose d'une étroite marge d'exploitation et un espace de stockage actif minimal; les opérations des ouvrages de contrôle et des centrales en amont (propriété de multiples agences) influencent fortement le débit entrant. La centrale demeure économiquement viable et aucun plan de démantèlement n'est prévu dans un avenir prévisible.

Étape 1 : Examen du débit de crue de conception actuel et du seuil critique

Selon les *Recommandations* de l'ACB, un barrage classé moyen ou important doit résister à un débit de crue de conception millénale. Les plus récents rapports et études de sécurité indiquent que le barrage est conforme à cette norme, bien qu'une certaine surcharge dépassant le niveau total d'apport soit requise. Le dernier examen de sécurité mentionne que la classification du barrage en termes de débit de crue de conception pourrait passer à « très important », tout dépendant du prochain examen des conséquences d'une rupture du barrage.

Selon cette information, il a été déterminé que le débit de crue de conception actuel devrait être considéré comme le seuil critique et que toute augmentation des risques futurs de crues pourrait exiger des mesures d'adaptation.

Étape 2 : Examen des impacts du changement climatique et détermination du niveau de préoccupation

Les tableaux 1 et 2 résument les projections du climat futur pour le débit de crue de conception de la centrale de la rivière Winnipeg.

Tableau 1 : Changement relatif projeté de la crue maximale annuelle pour la période de référence (1981-2000) estimé par le groupe 1.

Probabilité de dépassement annuel	Changement relatif (%) 2031-2050		Changement relatif (%) 2051-2070		Changement relatif (%) 2081-2100	
	CanESM2-LE	CESM1-LE	CanESM2-LE	CESM1-LE	CanESM2-LE	CESM1-LE
1 : 100	-8	-1	-4	-4	-1	-11
1 : 1 000	-12	5	-4	-3	2	-7
1 : 10 000	-17	12	-4	-2	5	-3

Tableau 2 : Changement relatif projeté du critère de conception minimax estimé par le groupe 2 au moyen de la loi prédictive a posteriori des observations, de la combinaison des observations et des projections de l'ensemble CMIP5 pour trois seuils de probabilité évalués pour la période 2000-2050.

Probabilité de dépassement annuel	Changement relatif (%) 2000-2050
1 : 100	-6
1 : 1 000	-3
1 : 10 000	-7

Les résultats résumés ci-dessus démontrent un fort degré d'incertitude lié aux changements projetés du débit de crue de conception du site. Selon une évaluation prudente du groupe 1, on peut considérer qu'une hausse de 5 % du débit de crue de conception serait le pire scénario pour cet ouvrage. Toutefois, cette hausse est incertaine si l'on tient compte des impacts potentiels des résultats du groupe 2. Il est important de souligner que la crue maximale annuelle à cette station ne s'est pas toujours produite au printemps; l'incertitude relative au type de crue et au moment d'occurrence peut influencer le risque de crue. Les résultats montrent donc que le changement climatique apporte une incertitude considérable sur une valeur extrême déjà incertaine.

Étape 3 : Exploration des mesures d'adaptation

Une équipe d'experts en sécurité des barrages et d'ingénieurs de diverses disciplines (hydraulique, hydrologie, structure, géotechnique, environnement) qui connaissent le site se sont réunis au cours d'un remue-méninges pour explorer l'éventail des mesures d'adaptation potentielles. Pour orienter la séance, elle a dressé une liste des mesures et les a réparties dans trois catégories :

- ▷ Adaptation opérationnelle
- ▷ Adaptation structurelle
- ▷ Adaptation réglementaire

Cette liste a été établie à partir d'études réalisées à la station, d'examen de sécurité des barrages et de revues de travaux et rapports de divers experts en la matière, entre autres le document intitulé *Crues maximales probables et sécurité des barrages dans le climat du 21^e siècle* (Ouranos, 2015).

L'équipe a examiné les points suivants pour chaque mesure :

- ▷ Avantages et inconvénients
- ▷ Faisabilité
- ▷ Désirabilité et applicabilité
- ▷ Accommodation possible de l'étendue des débits
- ▷ Flexibilité de la mise en œuvre
- ▷ Expérience antérieure et préoccupations éventuelles des parties prenantes

S'appuyant sur des études actuelles et des expériences antérieures, les membres de l'équipe ont mis en commun leurs idées. Ils ont recueilli moins de commentaires pour les mesures considérées ni faisables ni désirables. Quant aux mesures jugées faisables et désirables, certaines méritaient un examen plus approfondi ainsi que des consultations avec d'autres experts pour suppléer à un manque relatif d'expérience ou d'expertise.

Étape 4 : Évaluation de la performance et de la faisabilité des mesures d'adaptation

Compte tenu de la disponibilité de projections du changement climatique et des résultats du remue-méninges, l'équipe s'est penchée sur les mesures d'adaptation et les a classées en fonction de la faisabilité de la mise en œuvre et de la capacité de prise en compte du risque futur de crue. Les mesures présentées dans le tableau 3 permettent d'atteindre un niveau de performance raisonnable dans les conditions climatiques existantes.

Tableau 3 : Évaluation de la performance et de la faisabilité des mesures d'adaptation pour la centrale du bassin versant de la rivière Winnipeg.

Mesures les plus réalistes/faisables	Mesures les moins réalistes/ possiblement faisables	Mesures irréalistes/ infaisables
<p>Adaptation structurelle</p> <ul style="list-style-type: none"> ▷ Modifications au déversoir de service ▷ Construction d'un déversoir auxiliaire <p>Adaptation réglementaire</p> <ul style="list-style-type: none"> ▷ Revue de la classification du barrage et de l'estimation du débit de crue de conception ▷ Détermination du débit de crue de conception avec prise en compte du risque 	<p>Adaptation structurelle</p> <ul style="list-style-type: none"> ▷ Relèvement des digues/du barrage ▷ Remise à niveau de l'ouvrage 	<p>Adaptation structurelle</p> <ul style="list-style-type: none"> ▷ Remplacement du déversoir ▷ Démantèlement ▷ Amélioration des conduites d'eau <p>Adaptation opérationnelle</p> <ul style="list-style-type: none"> ▷ Capacité utile insuffisante à la centrale pour accommoder un débit de crue de conception plus élevé (même en baissant le niveau du réservoir) ▷ Plus grande capacité/réglementation contrôlée en amont par d'autres agences

Comme toute hausse du débit de crue de conception pourrait dépasser le seuil critique et entraîner une reclassification du risque, les mesures d'adaptation les plus réalistes consistaient à augmenter la capacité du déversoir (adaptation structurelle) et/ou à revoir la méthode de sélection et de calcul du débit de crue de conception (adaptation réglementaire). La modification des opérations au réservoir serait une mesure à faible regret pour tenir compte d'un débit de crue de conception plus élevé (adaptation opérationnelle), la centrale ayant un très petit réservoir avec une capacité utile minimale pour atténuer les crues. De même, comme les agences fédérales et internationales réglementent les grands réservoirs en amont capables d'atténuer les crues, la re-réglementation a été jugée infaisable aux fins de cette évaluation initiale.

Étape 5 : Détermination de la stratégie d'adaptation retenue pour considération future

Bien que les résultats du groupe 1 ont montré qu'un débit de crue de conception plus élevé dans l'avenir (hausse allant jusqu'à 5 %) ajoutait un important risque potentiel, les analyses des groupes 2 et 1 ont montré un degré élevé d'incertitude dans les futurs impacts des scénarios de crues extrêmes. Comme l'a montré le modèle décisionnel CRIDA (voir la figure 24), étant donné le niveau de risque futur et l'incertitude analytique y étant associée, il devenait évident que des mesures d'adaptation robustes et flexibles offraient les choix les plus stratégiques pour une étude et une évaluation plus approfondies (Quadrant IV).

Le site comportait un enjeu particulier, à savoir que très peu de mesures robustes et flexibles pouvaient être immédiatement mises en œuvre. Une adaptation opérationnelle aurait été une bonne stratégie à faible regret pour tenir compte de l'incertitude du risque futur, mais les caractéristiques du site limitaient la faisabilité des mesures d'ordre opérationnel.

Le remue-méninges (étape 3) a permis de dégager des mesures d'ordre réglementaire en réponse au risque accru mais incertain du changement climatique futur. Par exemple, en déterminant le débit de crue de conception avec l'approche par analyse du risque, on constaterait peut-être que la capacité de déversement totale existante est adéquate. Cette approche exigerait un investissement et une analyse technique considérables, mais le coût global pourrait être inférieur à toute autre adaptation structurelle et, en prime, elle procurerait une bien meilleure connaissance de la résilience de la station aux risques futurs et actuels. Et même si on concluait qu'une capacité de déversement supplémentaire était nécessaire, la stratégie d'adaptation pourrait améliorer l'efficacité et la performance d'autres mesures structurelles.

Malgré ses avantages potentiels, l'approche par analyse du risque ne doit pas exclure le besoin d'augmenter la capacité d'évacuation des crues. L'analyse réalisée à l'étape 3 a fait ressortir deux mesures d'ordre structurel qui méritent un examen plus approfondi : l'installation d'une vanne fusible dans une passe à billes et la conversion d'une section du barrage non déversant en un seuil à crête épaisse.

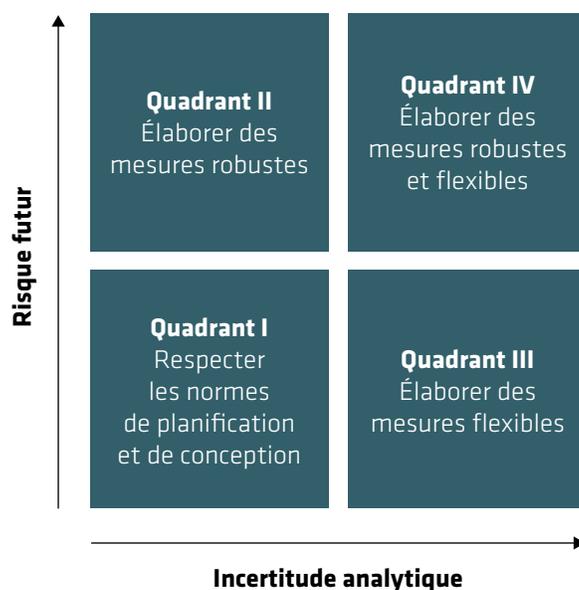


Figure 24 : Modèle de décision pour la sélection de mesures d'adaptation, adapté de CRIDA (UNESCO et ICIWaRM, 2018).

Ces deux mesures pourraient résister à un large éventail d'augmentations futures du débit, n'exiger qu'un niveau de maintenance relativement faible et être mises en œuvre assez facilement sans entraver les opérations en cours dans les conditions hydroclimatiques actuelles.

Avec une surveillance accrue et des analyses supplémentaires, on pourrait mieux comprendre le risque actuel de crue et

mieux déterminer le moment où les changements structurels doivent être réalisés. La surveillance de changements dans les événements extrêmes représente tout un défi, mais des observations et des scénarios supplémentaires du changement climatique futur pourraient enrichir nos connaissances et apporter des arguments plus solides quant à la nécessité de solutions robustes.

Détection et attribution des extrêmes hydrologiques

La détection-attribution est une branche de la science du climat qui s'intéresse aux liens de causalité entre le climat observé et les forçages naturels et anthropiques, dont les émissions de GES et d'aérosols et les changements dans l'utilisation des terres. La détection cherche à isoler les signaux du changement climatique (p. ex., les tendances dans la température de l'air) du bruit de fond de la variabilité naturelle du climat. L'attribution, quant à elle, cherche à déterminer les causes d'un changement donné. Elle peut aussi aider à cerner les phénomènes à l'origine d'une forte crue, par exemple, des précipitations anormales, un enneigement exceptionnel, une humidité du sol préalable, un sol gelé, ou une combinaison de ces facteurs. Elle permet aussi d'évaluer la probabilité d'occurrence de l'événement dans des conditions préindustrielles en quantifiant l'influence anthropique. Les études de détection-attribution s'intéressent aux phénomènes mondiaux à long terme, comme les tendances dans la température et l'élévation du niveau des mers (Bindoff *et al.*, 2013) ou explorent les patrons régionaux. Par exemple, une étude menée dans l'ouest des États-Unis a détecté un changement dans le moment d'occurrence d'une crue induite par la fonte de neige, attribuée avec confiance aux émissions de GES et d'aérosols et aux changements dans l'utilisation des terres (Hidalgo *et al.*, 2009).

Les études portent aussi sur des événements extrêmes individuels, comme des vagues de chaleur, des sécheresses et des inondations. Au Canada, des études d'attribution ont été réalisées pour l'inondation en Alberta en 2013 (Teufel *et al.*, 2017) et celle de Montréal en 2017 (Teufel *et al.*, 2019) as flow from the upstream Ottawa River basin (ORB). Des expériences de modélisation régionale du climat ayant différentes conditions initiales pour les sols, l'humidité atmosphérique et l'enneigement, ainsi que la comparaison des précipitations actuelles avec les conditions préindustrielles simulées, ont permis de déterminer les mécanismes à l'origine de ces inondations ainsi que l'influence probable du changement climatique (l'empreinte). L'influence se fait sentir dans l'intensité et la fréquence accrues de fortes précipitations, mais l'effet concurrent d'un manteau neigeux plus mince et d'une fonte plus lente (Musselman, Clark, Liu, Ikeda et Rasmussen, 2017) brouille l'influence du changement climatique sur les débits de pointe. Bien que le degré de confiance dans les tendances de détection-attribution pour les crues induites par la fonte de neige soit considéré comme étant moyen, une meilleure connaissance des causes sous-jacentes des événements extrêmes nous aidera à axer nos efforts de surveillance sur les phénomènes dont le risque de dommages futurs est plus probable.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

En lançant ce projet, nous avions l'espoir naïf d'obtenir à même les sorties des modèles climatiques de l'information sur les changements attendus dans les débits de crue de conception. Des approximations, éventuellement fondées sur la précipitation ou le ruissellement simulés par les modèles climatiques, donneraient alors une mesure des changements relatifs dans les crues de pointe causés par l'augmentation des émissions de GES et d'aérosols. Nos espoirs ont été vite déçus. La résolution spatiale du ruissellement dans les modèles climatiques donnait des débits de pointe irréalistes, et l'influence des processus de fonte de neige invalidait tout raccourci reposant uniquement sur la précipitation. Sans une chaîne de modélisation complète comprenant des modèles hydrologiques étalonnés sur le bassin versant d'intérêt, les praticiens n'auraient aucune confiance dans les résultats.

Il nous fallait une approche pragmatique pour l'estimation du débit de crue de conception avec prise en compte du changement climatique. Nous avons donc choisi des modèles hydrologiques parcimonieux et étalonnés automatiquement, puis utilisé de grands ensembles de simulations de modèles climatiques ainsi qu'une distribution de la GEV avec des maximums par bloc de 5 ans (une touche originale dans une analyse de fréquence). Alors que ces ajustements ont permis d'appliquer l'approche à des centaines de bassins versants, le modèle hydrologique utilisé et le type d'étalonnage automatique étaient trop simplistes pour pouvoir en tirer des conclusions robustes sur les impacts du changement climatique sur des bassins versants individuels et remplacer une véritable analyse de fréquence sur un site spécifique.

Cela dit, même une analyse approfondie d'un seul bassin versant n'allait pas être de tout repos. L'interaction entre l'intensité du manteau neigeux, de la fonte et de la précipitation pourrait donner lieu à des augmentations pendant un certain temps, puis suivies d'une baisse. Différents modèles hydrologiques étalonnés sur les mêmes jeux de données peuvent produire des résultats contraires en ce qui a trait à la réponse au changement climatique. L'extrapolation statistique à des percentiles très élevés amplifie encore plus chaque source d'incertitude. Par exemple, le même modèle hydrologique exécuté avec deux ensembles de paramètres également plausibles peut, dans certains cas, donner des réponses contraires pour les événements de crue millénaux et décennaux. Cela pose des difficultés particulières pour les propriétaires de barrage qui s'efforcent d'intégrer le changement climatique dans les décisions concernant la gestion des actifs de leurs installations existantes.

En fait, l'analyse de fréquence conventionnelle n'est pas à l'abri de l'incertitude. Des erreurs lors de la prise de mesures affectent les séries de débits observés et l'incertitude liée aux paramètres d'une distribution statistique exerce une forte

influence sur l'extrapolation à des événements extrêmes. Malgré cette incertitude, l'analyse de fréquence est encore prise en compte dans l'établissement de la réglementation et des normes. Les régimes réglementaires sont habituellement basés sur une approche normative, et les barrages doivent avoir la capacité voulue pour évacuer une crue d'une ampleur particulière, soit un événement décennal.

La réalité du changement climatique a donné lieu à un changement de paradigme, invalidant les hypothèses classiques de la stationnarité dans l'analyse des événements extrêmes. Les responsables de la sécurité des barrages reconnaissent le besoin de tenir compte de la gestion du risque et des normes établies; en 2018, l'Alberta a mis à jour son cadre réglementaire concernant les risques liés à un ouvrage et la désignation de la classification des conséquences (<https://www.alberta.ca/dam-and-canal-safety-regulatory-framework.aspx>). Les *Recommandations de sécurité concernant les barrages* de l'ACB servent de lignes directrices pour les provinces réglementées (Alberta, Colombie-Britannique, Québec et Ontario) et de pratiques exemplaires pour les provinces et territoires non réglementés. Reconnues au pays et à l'étranger, elles abordent la gestion du risque et les normes (voir l'encadré Normes réglementaires et approches par analyse de risque pour la sécurité des barrages).

Pour prendre en compte l'incertitude inhérente et la non-stationnarité qui font maintenant partie des conditions environnementales et climatiques changeantes, tout en atteignant les objectifs de sécurité des barrages fondée sur des normes, il faut des mises à jour réglementaires. Bien que la science hydroclimatique à ce jour n'offre pas le degré de confiance requis pour une approche normative de l'évaluation des impacts du changement climatique, l'ampleur des changements projetés dans les patrons de précipitation et de neige à l'échelle du pays donne à penser que les analyses du risque de crue devraient prendre en considération l'influence du changement climatique.

Cette étude porte sur certains enjeux du changement climatique et de l'estimation des événements extrêmes aux fins de la sécurité des barrages. Les résultats montrent une dépendance spatiale et temporelle sur l'ampleur des événements de crues millénaux et décennaux au Canada. Pour la plupart des bassins versants, le CanESM2-LE et le CESM-LE s'entendent sur la direction du changement, mais pas sur l'ampleur d'un événement de crue pour un intervalle de confiance et une méthode d'évaluation donnés, ce qui n'est pas étonnant. Cela complique les choses pour les propriétaires de barrage qui s'efforcent d'intégrer le changement climatique dans leurs décisions de gestion des actifs de leurs installations actuelles.

L'ACB a publié ses premières *Recommandations de sécurité concernant les barrages* en 1995 et les a révisées en 1999, 2007 et 2013. Des mises à jour réglementaires et normatives doivent non seulement répondre aux exigences, mais aussi tenir compte de l'incertitude inhérente et de la non-stationnarité qu'engendrent les conditions environnementales et climatiques changeantes. En adoptant l'approche par analyse du risque des processus liés à la sécurité des barrages, les propriétaires auraient la flexibilité voulue pour mettre dans la balance l'évolution des risques relatifs au changement climatique et les contraintes de l'adaptation d'un barrage existant. Ce faisant, ils auraient accès à un plus grand nombre d'approches pour l'analyse du risque de crue.

Nous proposons ici quelques recommandations concernant l'évaluation des risques futurs de crues fondées sur les résultats du projet.

- ▷ L'estimation des risques futurs de crues exige des modèles hydrologiques étalonnés de manière à reproduire les crues saisonnières et annuelles. L'incertitude des modèles devrait être quantifiée au moyen d'ensembles multimodèles ou de divers ensembles de paramètres également plausibles.
- ▷ Sur certains bassins versants, une pluie estivale ou automnale intense, plutôt que la fonte printanière, pourrait induire de futures crues de pointe annuelles. L'analyse de fréquence devrait établir une nette différence entre les crues de pointe induites par la fonte de neige et celles induites par la pluie. Cela s'applique également aux volumes de crues, une donnée souvent nécessaire pour les évaluations de la sécurité des barrages.
- ▷ D'ici à ce que la communauté scientifique assigne des probabilités aux scénarios de futures émissions de GES et d'aérosols, les analyses du risque devraient porter à tout le moins sur les scénarios les plus optimistes et les plus pessimistes.
- ▷ Un ensemble de modèles hydrologiques devrait être piloté par divers modèles climatiques. Ceux-ci devraient couvrir plusieurs sensibilités climatiques (la réponse de la température au doublement de la concentration de GES et d'aérosols) et, idéalement, fournir plusieurs réalisations pour obtenir une mesure de la variabilité naturelle du climat.
- ▷ L'extrapolation à des événements rares devrait s'appuyer sur des distributions de valeurs extrêmes. D'autres distributions pourraient être mieux ajustées au mode de distribution, mais ne pourraient pas garantir la vraisemblance de l'extrapolation à des événements rares. Dans tous les cas, les résultats devraient intégrer une distribution de l'incertitude paramétrique.

La prise en compte des impacts du changement climatique dans l'estimation du débit de crue de conception et la planification de l'adaptation est une tâche ardue mais nécessaire. Les responsables de la sécurité des barrages sont tenus de protéger le public et l'environnement des effets d'une rupture de barrage et d'exercer une diligence raisonnable à toutes les étapes du cycle de vie du barrage. Même si le risque posé par les impacts du changement climatique pour les barrages comporte d'importantes incertitudes, les propriétaires doivent relever le défi et prendre en compte ces impacts dans la conception et l'exploitation de ces infrastructures essentielles. La sécurité des barrages a une longue histoire, faite de praticiens qui s'emploient à gérer les incertitudes liées aux événements extrêmes en tirant parti de nouvelles informations et méthodes pour établir et peaufiner les pratiques exemplaires. Le changement climatique n'est que le dernier chapitre de cette histoire, et les praticiens doivent maintenant considérer les incertitudes du passé et du futur pour veiller à ce que les barrages qu'ils conçoivent, possèdent et exploitent soient sécuritaires pour les générations futures.

ACRONYMES

ACB	Association canadienne des barrages	GEV	Valeur extrême généralisée
CanESM2-LE	Modèle du système terrestre canadien de deuxième génération - large ensemble	GR4J	Modèle génie rural à 4 paramètres journalier
CESM1-LE	Modèle du système terrestre communautaire de première génération - large ensemble	HYSETS	Hydrometeorological Sandbox, École de technologie supérieure (ÉTS)
CIGB	Commission internationale des grands barrages (ICOLD en anglais; International Commission on Large Dams)	ICIWaRM	International Center for Integrated Water Resources Management
CMIP5	Projet de comparaison de modèles couplés, phase 5	IHA	International Hydropower Association
CMP	Crue maximale probable	MCG	Modèle climatique global
CRIDA	Climate Risk Informed Decision Analysis (modèle de décision intégrant le risque climatique)	MELCC	Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec
GES	Gaz à effet de serre	OPG	Ontario Power Generation
		RCP	Trajectoire de concentration représentative
		RNCan	Ressources naturelles Canada

RÉFÉRENCES

- Arsenault, R., Brissette, F., Martel, J.-L., Troin, M., Lévesque, G., Davidson-Chaput, J., ... Poulin, A. (2020). HYSETS - A 14425 watershed Hydrometeorological Sandbox over North America. <https://doi.org/10.17605/OSF.IO/RPC3W>
- Association canadienne des barrages (2013). *Dam Safety Guidelines 2007 - 2013*. Retrieved from https://issuu.com/canadiandamassociation/docs/cda_dam_safety_guidelines_2013_edit
- Bindoff, N., Stott, P., AchutaRao, K., Allen, M., Gillett, N., Gutzler, D., ... Zhang, X. (2013). Detection and Attribution of Climate Change: from Global to Regional. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 867-952. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.022>
- Blais-Stevens, A., Clague, J. J., Mathewes, R. W., Hebda, R. J., & Bornhold, B. D. (2003). Record of large, Late Pleistocene outburst floods preserved in Saanich Inlet sediments, Vancouver Island, Canada. *Quaternary Science Reviews*, 22(21-22), 2327-2334. [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(03\)00212-9](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(03)00212-9)
- Booth, B. B. B., Bernie, D., McNeill, D., Hawkins, E., Caesar, J., Boulton, C., ... Sexton, D. (2012). Scenario and modelling uncertainty in global mean temperature change derived from emission driven Global Climate Models. *Earth System Dynamics Discussions*, 3(2), 1055-1084. <https://doi.org/10.5194/esdd-3-1055-2012>
- BSI Standards Publication. (2019). *Adaptation to climate change - Principles, requirements and guidelines (ISO 14090:2019)*.
- Coles, S. (2001). *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*. (Springer, Ed.) (3rd edition). <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-3675-0>
- Commission internationale des grands barrages (2016). *Bulletin 169: Global Climate Change, Dams, Reservoirs and Related Water Resources*.
- Fournier, E., Lamy, A., Pineault, K., Braschi, L., Kornelsen, K., Hannart, A., ... Merleau, J. (2020). *Valuation of Hydropower Assets and Climate Change Physical Impacts - A Guidebook to Integrate Climate Data in Energy Production for Value Modelling*. Montreal. 208 p. <https://www.ouranos.ca/programmes/evaluation-de-la-valeur-des-actifs-hydroelectriques/>
- Fyfe, J. C., Derksen, C., Mudryk, L., Flato, G. M., Santer, B. D., Swart, N. C., ... Jiao, Y. (2017). Large near-Term projected snowpack loss over the western United States. *Nature Communications*, 8, 1-7. <https://doi.org/10.1038/ncomms14996>
- Gaur, A., Gaur, A., & Simonovic, S. P. (2018). Future changes in flood hazards across Canada under a changing climate. *Water (Switzerland)*, 10(10). <https://doi.org/10.3390/w10101441>
- Hausfather, Z., & Peters, G. P. (2020). Emissions - the 'business as usual' story is misleading. *Nature*, 577(7792), 618-620. <https://doi.org/10.1038/d41586-020-00177-3>
- Hidalgo, H. G., Das, T., Dettinger, M. D., Cayan, D. R., Pierce, D. W., Barnett, T. P., ... Nozawa, T. (2009). Detection and attribution of streamflow timing changes to climate change in the Western United States. *Journal of Climate*, 22(13), 3838-3855. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2470.1>
- IHA. (2019). *Hydropower Sector Climate Resilience Guide*. London, United Kingdom. Retrieved from <https://www.hydropower.org/publications/hydropower-sector-climate-resilience-guide>
- Kalra, N., Hallegate, S., Lempert, R., Brown, C., Fozzard, A., Gill, S., & Shah, A. (2014). *Agreeing on Robust Decisions New Processes for Decision Making Under Deep Uncertainty* (Policy Research Working Paper No. 6906). Retrieved from <http://hdl.handle.net/10986/18772>
- Kay, J. E., Deser, C., Phillips, A., Mai, A., Hannay, C., Strand, G., ... Vertenstein, M. (2015). The community earth system model (CESM) large ensemble project: A community resource for studying climate change in the presence of internal climate variability. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(8), 1333-1349. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00255.1>
- Lachaut, T., & Tilmant, A. (2020). Possibilistic response surfaces combining fuzzy targets and hydroclimatic uncertainty in flood vulnerability assessment. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, (July), 1-30. <https://doi.org/10.5194/hess-2020-214>
- Martel, J. L., Brissette, F., & Mailhot, A. (2021). Impacts of climate change on daily extreme streamflow estimated from three large climate simulation ensembles over North American watersheds. In preparation.

- Meinshausen, M., Smith, S. J., Calvin, K., Daniel, J. S., Kainuma, M. L. T., Lamarque, J.-F., ... van Vuuren, D. P. P. (2011). The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change*, 109(1-2), 213-241. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0156-z>
- Musselman, K. N., Clark, M. P., Liu, C., Ikeda, K., & Rasmussen, R. (2017). Slower snowmelt in a warmer world. *Nature Climate Change*, 7(3), 214-219. <https://doi.org/10.1038/nclimate3225>
- Organisation météorologique mondiale (2009). *Manual on Estimation of Probable Maximum Precipitation (PMP)*, WMO-No 1045. ISBN 978-92-63-11045-9
- Ouranos. (2015). *Crues maximales probables et sécurité des barrages dans le climat du 21^e siècle*. Rapport présenté à la Division des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques, Ressources naturelles Canada, 39 p.
- Rootzén, H., & Katz, R. W. (2013). Design Life Level: Quantifying risk in a changing climate. *Water Resources Research*. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20425>
- Schwalm, C. R., Glendon, S., & Duffy, P. B. (2020). RCP8.5 tracks cumulative CO2 emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117(33), 19656-19657. <https://doi.org/10.1073/PNAS.2007117117>
- Sun, X., Lall, U., Merz, B., & Dung, N. V. (2015). Hierarchical Bayesian clustering for nonstationary flood frequency analysis: Application to trends of annual maximum flow in Germany. *Water Resources Research*, 51(8), 6586-6601. <https://doi.org/10.1002/2015WR017117>
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., & Meehl, G. A. (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4), 485-498. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>
- Teufel, B., Diro, G. T., Whan, K., Milrad, S. M., Jeong, D. I., Ganji, A., ... Sushama, L. (2017). Investigation of the 2013 Alberta flood from weather and climate perspectives. *Climate Dynamics*, 48(9-10), 2881-2899. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3239-8>
- Teufel, B., Sushama, L., Huziy, O., Diro, G. T., Jeong, D. I., Winger, K., ... Nguyen, V. T. V. (2019). Investigation of the mechanisms leading to the 2017 Montreal flood. *Climate Dynamics*, 52(7-8), 4193-4206. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4375-0>
- Tilmant, A., Lachaut, T., Mercille, A., Marceau, J.-P., & Faucher, X. (2019). *Étude visant l'adaptation de la gestion des barrages du système hydrique du Haut-Saint-François à l'impact des changements climatiques dans le cadre du Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques (PACC 2020)*. Rapport préparé pour la Direction. Québec, Canada.
- UNESCO. (2018). *Climate Risk Informed Decision Analysis (CRIDA): collaborative water resources planning for an uncertain future - UNESCO Bibliothèque Numérique*. Retrieved from <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000265895>
- Zhang, Z., Stadnyk, T. A., & Burn, D. H. (2020). Identification of a preferred statistical distribution for at-site flood frequency analysis in Canada. *Canadian Water Resources Journal*, 45(1), 43-58. <https://doi.org/10.1080/07011784.2019.1691942>





