

GROUPE CSA™

RECHERCHE SUR LES NORMES

Adaptation aux changements climatiques pour les barrages

Un examen des vulnérabilités climatiques, des mesures d'adaptation et des occasions de croissance dans le contexte des barrages canadiens

février 2022

Author

Lisa MacTavish, ing., M.Ing., WSP Canada

Gilles Bourgeois, ing., M.Sc.A., WSP Canada

Charlotte Lafleur, ing., M.Sc.A, WSP Canada

Ena Ristic, B.Sc., M.C.C., WSP Canada

Comité consultatif du projet

Marco Braun, Ouranos

André Roy, Parcs Canada

Andy Zielinski, HYDROSMS, ACB

John Ikonomopoulos, SPAC

Istemi Ozkan, NRC

Marie-Claude Simard, Hydro-Québec

Violeta Martin, Knight Piesold, ACB

Ana-Maria Tomlinson, Groupe CSA (chargée de projet)

Hélène Vaillancourt, Groupe CSA

Ivica Karas, Groupe CSA (chargé de projet)

Remerciements

Cette étude a été appuyée par de nombreuses parties prenantes de l'industrie de l'hydroélectricité et des barrages qui ont volontairement donné de leur temps pour fournir des commentaires sur l'adaptation aux changements climatiques pour les barrages au Canada. Leur expertise et leur expérience de première main ont été inestimables pour cette recherche.

Clause de non-responsabilité

Cette étude a été réalisée par WSP Canada et appartient à l'Association canadienne de normalisation. Elle vise à fournir des informations de nature générale sur le sujet traité. Les opinions exprimées dans cette publication sont celles des auteurs. WSP Canada et l'Association canadienne de normalisation ne sauraient être responsables d'aucune perte ni d'aucun dommage pouvant découler de votre confiance dans le contenu de cette publication et de son utilisation par vous.

Table des matières

Sommaire 5

1 Introduction 7

2 Méthodes 8

2.1 Analyse documentaire 8

2.2 Entrevues avec les parties prenantes 8

2.3 Ateliers 8

3 Analyse documentaire 8

3.1 Considérations juridictionnelles et réglementaires 8

3.1.1 Colombie-Britannique 9

3.1.2 Alberta 10

3.1.3 Ontario 10

3.1.4 Québec 10

3.1.5 Autres provinces et territoires 10

3.1.6 Industrie nucléaire du Canada 10

3.2 Lignes directrices nationales et fédérales 11

3.3 Normes internationales 11

3.4 Vulnérabilité des barrages aux changements climatiques 11

3.4.1 Exposition, dangers climatiques et tendances 11

3.4.2 Vulnérabilités des barrages 18

3.5 Normes, lignes directrices et meilleures pratiques en matière d'adaptation 23

3.5.1 Lignes directrices internationales sur la gestion des ressources en eau et l'adaptation au climat 23

3.5.2 Lignes directrices des États-Unis sur la gestion des ressources en eau et l'adaptation au climat 24

3.5.3 Changements climatiques dans les codes et lignes directrices au Canada 25

3.5.4 Politiques canadiennes 27

3.5.5 Déterminer les tendances climatiques régionales et les méthodologies d'évaluation des risques 27

3.5.6 Estimation des répercussions climatiques sur les crues de projet 28
3.5.7 Contrôle des crues 29
3.5.8 Production d'hydroélectricité 29
3.6 Limites de l'analyse documentaire 29
4 Engagement des parties prenantes 29
4.1 Principaux risques climatiques 30
4.2 Initiatives d'adaptation au climat 31
4.3 Obstacles à l'adaptation 32
4.4 Encadrement en matière d'adaptation au climat 34
5 Discussion 36
5.1 État des connaissances et lacunes 36
5.2 Motivation pour la mise en œuvre de l'adaptation aux changements climatiques pour les barrages 37
5.3 Sujets pour les conseils et la recherche 38
5.4 Processus d'adaptation au climat 40
5.5 Recommandations pour l'industrie du barrage 42
6 Conclusions 45
Références 47
Appendix A Entrevues avec les parties prenantes 57

Sommaire

On s'attend à ce que les changements climatiques au Canada produisent des températures plus chaudes, plus humides et plus imprévisibles, ce qui pourrait avoir des répercussions sur les barrages partout au pays. Dans l'industrie des barrages, les directives et règlements existants en matière de sécurité et d'exploitation des barrages ne portent pas particulièrement sur la façon d'adapter les barrages aux changements climatiques. Par conséquent, les répercussions que les changements climatiques peuvent avoir sur les barrages, la nécessité d'agir et la voie à suivre pour gérer les changements climatiques en ce qui a trait aux barrages ne sont pas encore bien comprises.

Cette recherche visait à aider à mieux comprendre les risques climatiques qui ont une incidence sur les barrages au Canada, les normes, les lignes directrices et les meilleures pratiques actuelles qui traitent de l'adaptation aux changements climatiques en ce qui a trait aux barrages, ce qui est actuellement fait pour régler le problème, et les solutions nécessaires. Cela s'est fait au moyen d'une analyse documentaire, d'entrevues avec les parties prenantes et d'un atelier, le tout ensuite validé par un comité consultatif d'experts de l'industrie.

L'examen documentaire a révélé que les principaux risques climatiques pour les barrages englobent des changements du cycle hydrologique pouvant avoir une incidence sur les charges de conception et les crues de projet; des changements à l'exploitation et à l'entretien pour répondre à différents besoins opérationnels, fréquences et conditions; des changements aux fondations en raison de la fonte du pergélisol; des problèmes d'accès au site en raison de tempêtes et d'événements météorologiques extrêmes; la contrainte supplémentaire imposée à l'approvisionnement en eau ayant une incidence sur l'exploitation et sur la fonctionnalité des barrages; les répercussions sur la production d'énergie hydroélectrique en raison d'un cycle hydrologique moins prévisible; et plus encore. L'examen a révélé que, souvent, les documents d'orientation sur la façon d'adapter l'infrastructure aux changements climatiques ne s'appliquent pas au contexte des barrages. Il existe un certain nombre de directives à l'échelle internationale sur l'adaptation aux changements climatiques pour les barrages, mais elles demeurent générales et difficiles à interpréter dans le contexte d'un bassin particulier. Il existe aussi d'autres directives régionales, mais celles-ci ne sont pas suffisamment détaillées ni applicables aux barrages partout au pays.

L'implication des parties prenantes a donné une perspective essentielle sur l'état et sur les besoins des parties prenantes du secteur des barrages en ce qui a trait à la gestion des répercussions des changements climatiques sur les barrages au Canada. Les occasions de recherche et de développement englobent une disponibilité en hausse des données climatiques et la capacité des parties prenantes à y accéder et à les interpréter correctement. La plupart des parties prenantes qui avaient commencé à s'attaquer aux risques climatiques liés aux barrages avaient effectué des évaluations des risques climatiques afin de déterminer les points où un système de barrage serait potentiellement vulnérable aux changements climatiques. Peu de mesures d'adaptation ou de projets réels ont été signalés, autres que des projets visant à cerner les risques climatiques les plus élevés. De nombreuses parties prenantes n'avaient pas pris de mesures pour évaluer les vulnérabilités climatiques ou s'y adapter au besoin. Certains ont exprimé un manque de clarté quant aux mesures à prendre, d'autres n'ont pas été incités à agir.

En raison d'un manque d'uniformité dans la prise en compte des risques climatiques et des vulnérabilités potentielles pour les barrages au Canada, il existe un besoin pour des conseils sur les mesures à prendre pour l'adaptation aux changements climatiques. Les parties prenantes souhaitaient voir des processus et des meilleures pratiques pour l'adaptation aux changements climatiques, mais certains obstacles ont également été découverts.

Parmi eux, la disponibilité et l'interprétation des données climatiques et une expérience limitée de l'industrie dans l'application de ces données pour évaluer les impacts et les mesures d'adaptation pour un site ou un bassin particulier. Les mesures suivantes ont été fournies comme une feuille de route vers l'adaptation aux changements climatiques afin de surmonter les obstacles actuels et de saisir les occasions d'harmoniser l'industrie :

1. Évaluer les besoins en données relatives aux changements climatiques et en tenir compte par l'entremise de la recherche et de la collaboration.
2. Établir les meilleures pratiques et préparer un document d'orientation pour mener des évaluations de la vulnérabilité et des risques liés aux changements climatiques pour les barrages.
3. Établir les meilleures pratiques pour la prise de décision fondée sur les risques en ce qui a trait aux barrages, que ce soit en fonction du climat ou non.
4. Créer un processus qui pourrait être utilisé pour guider la prise de décisions d'adaptation en consultant les parties prenantes et les chercheurs qui ont travaillé sur l'adaptation climatique propre aux barrages.
5. Effectuer d'autres recherches sur les répercussions des changements climatiques sur les petits barrages et préparer un document d'orientation comportant des considérations d'adaptation au climat propres aux barrages ayant peu de conséquences.

Pour profiter de ces occasions, il faudrait mettre en œuvre des recherches et des consultations pour fixer le niveau de détail approprié afin d'assurer la faisabilité et la robustesse des documents d'orientation. Cette étude a conclu que les meilleures pratiques en matière d'adaptation aux changements climatiques, rassemblées dans une norme ou dans des lignes directrices, seraient utiles aux propriétaires et aux praticiens dans le domaine canadien des barrages, car elles pourraient leur fournir des connaissances sur les risques inconnus et sur les outils d'adaptation appropriés pour les changements climatiques.



« Les impacts que le changement climatique peut avoir sur les barrages et la nécessité d'agir ne sont pas encore bien compris, et la voie à suivre pour faire face aux changements climatiques sur les barrages est encore moins claire. »

1 Introduction

Le Canada est une nation géographiquement diversifiée, riche en rivières et en lacs d'eau douce, un pays dans lequel la construction de barrages d'eau se produit depuis des siècles. Les barrages d'eau vieillissants, tout comme les barrages neufs, sont affectés par le cycle hydrologique et les conditions environnementales et climatiques dans les régions où ils existent. On s'attend à ce que les changements climatiques produisent des températures plus chaudes, plus humides et plus imprévisibles, ce qui pourrait avoir des répercussions sur les barrages partout au pays. Alors que le Canada s'adapte aux effets des changements climatiques, les propriétaires d'infrastructure essentielle doivent tenir compte de l'incidence des changements climatiques sur leurs actifs et leurs activités.

Dans l'industrie canadienne des barrages, les directives et règlements existants en matière de sécurité et d'exploitation des barrages ne portent pas particulièrement sur la façon d'adapter les barrages aux changements climatiques. Par conséquent, les parties prenantes se trouvent à différents points du parcours d'adaptation aux conditions climatiques futures changeantes. Bien qu'il existe des lignes directrices générales de classe mondiale sur l'adaptation aux changements climatiques et sur la sécurité des barrages, la combinaison de ces deux éléments est insuffisante. Les répercussions éventuelles des changements climatiques sur les barrages, et la nécessité d'agir ne sont pas encore bien comprises. La voie à suivre pour gérer les changements climatiques en ce qui a trait aux barrages l'est encore moins.

Dans ce contexte, il est nécessaire de mieux comprendre les risques climatiques qui ont une incidence sur les barrages au Canada, les normes, les lignes directrices et les meilleures pratiques actuelles qui traitent de l'adaptation climatique pour les barrages, ce qui est actuellement fait pour régler le problème et les solutions nécessaires. Cette étude examine les tendances climatiques pertinentes et les vulnérabilités des barrages au Canada, ainsi que les publications et la documentation connexes actuelles. L'étude évalue l'état actuel de l'adaptation aux changements climatiques dans les organisations canadiennes, y compris les meilleures pratiques, les ressources et les obstacles à l'adaptation. En fin de compte, elle cherche à repérer des occasions d'adaptation aux changements climatiques au moyen de diverses solutions telles que des normes, des lignes directrices, des outils et des recherches qui ont la capacité d'apporter la valeur la plus marquée à l'industrie des barrages.

Bien que cette étude porte sur les barrages d'eau, plusieurs des vulnérabilités et des mesures d'adaptation décrites s'appliqueront également aux barrages miniers. Toutefois, la documentation, les normes et les meilleures pratiques sont différentes dans l'industrie minière, et, par conséquent, les conclusions de cette étude devront être adaptées aux particularités des barrages miniers.

2 Méthodes

Cette étude comprenait principalement une analyse documentaire, des entrevues et un atelier dans le cadre desquels étaient représentées des parties prenantes clés de partout au Canada. L'examen documentaire et les entrevues ont éclairé les discussions et les conclusions préliminaires, qui ont ensuite été validées et étoffées dans le cadre de l'atelier.

2.1 Analyse documentaire

L'analyse documentaire portait principalement sur les ressources canadiennes en français et en anglais ayant été mentionnées dans certaines publications internationales. L'examen a synthétisé des documents qui, directement ou indirectement, abordaient les répercussions des changements climatiques sur les barrages au Canada. L'objectif était de comprendre le paysage actuel de l'adaptation aux changements climatiques pour les barrages, y compris les vulnérabilités, les stratégies d'adaptation actuelles, les meilleures pratiques et les obstacles à l'adaptation. L'examen n'a pas permis d'analyser l'intégralité des documents techniques sur les sciences climatiques et hydrologiques, ni de détailler toutes les vulnérabilités climatiques, mesures d'adaptation et meilleures pratiques possibles utilisées dans le monde entier. La discussion porte plutôt sur les vulnérabilités et les mesures d'adaptation les plus pertinentes au contexte canadien. Les résultats se trouvent aux sections 3 et 4 et sont discutés à la section 5.

2.2 Entrevues avec les parties prenantes

L'objectif des entrevues était de recueillir des connaissances d'un groupe diversifié de parties prenantes dans l'industrie des barrages en matière d'adaptation aux changements climatiques sur les plans de la conception, de l'exploitation et de la réglementation. Le contenu de chaque entrevue différait en fonction de la nature de l'organisme, mais des questions d'entrevue générales avaient été préparées (voir l'annexe A). Les discussions ont exploré la vulnérabilité des barrages aux changements climatiques, si et comment les changements climatiques sont pris en compte au sein de l'organisme (p. ex., politiques, recherche, évaluation des risques, méthodologies de gestion des actifs, etc.), les obstacles à l'adaptation, les ressources clés et une discussion sur le besoin potentiel d'une ligne directrice, d'un outil ou d'une norme au Canada.

Des entrevues de groupe ont été menées dans le cadre desquelles les parties prenantes représentaient le même organisme, la même association, ou encore avaient des intérêts et une expertise semblables, mais portaient sur deux facettes distinctes des questions d'entrevue. La plupart des entrevues ont été menées avec deux à cinq participants, ce qui s'est bien prêté à un échange collaboratif de connaissances. Au total, 14 entrevues ont été menées auprès de 35 parties prenantes représentant 16 organismes, dont des propriétaires de barrages publics et privés, des régulateurs, des services publics, des scientifiques et des chercheurs, ainsi que des associations industrielles. Certaines lacunes en matière de représentation ont été cernées à l'étape de l'entrevue. Ces lacunes devaient être comblées au cours de l'atelier en incluant des représentants des communautés des Premières Nations, des provinces de l'Atlantique et des provinces du centre.

2.3 Ateliers

Les résultats préliminaires de la recherche provenant de l'analyse documentaire et des entrevues avec les parties prenantes ont été présentés à un groupe de parties prenantes, puis validés et discutés dans le cadre d'un atelier. Il y avait 22 parties prenantes présentes, dont plusieurs interviewées et quelques participants supplémentaires. Les participants pouvaient commenter les résultats préliminaires lors d'une discussion en grand groupe et discuter plus en détail des certains sujets choisis en petits groupes. Les lacunes géographiques dans la recherche et les entrevues ont aussi été comblées en obtenant les impressions de représentants de ces secteurs.

3 Analyse documentaire

3.1 Considérations juridictionnelles et réglementaires

La construction, l'exploitation, l'entretien et la mise hors service des barrages au Canada sont régis par les lois des provinces et des territoires [1]. Il n'existe pas d'organisme de réglementation fédéral ni de pouvoir prépondérant qui servirait à mandater la gestion sécuritaire des barrages. Les exceptions à cette règle englobent les barrages construits dans des eaux navigables, situés sur la frontière avec les États-Unis (par l'intermédiaire de la Commission mixte internationale) [2], construits et exploités par

l'industrie nucléaire canadienne (par l'entremise de la Commission de sûreté nucléaire) [3], ainsi que les barrages qui peuvent impliquer la *Loi sur les pêches* [4], la *Loi sur les espèces en péril* [5], la *Loi sur l'environnement* [6], et la *Loi sur la sûreté et la réglementation nucléaires* [7].

Au Canada, les barrages appartiennent au gouvernement fédéral ainsi qu'aux gouvernements provinciaux et municipaux, ainsi qu'aux entreprises de services publics, industrielles et minières, aux districts d'irrigation, aux organisations non gouvernementales (ONG), aux sociétés privées et aux particuliers. Les barrages appartenant au gouvernement fédéral sont exempts de la réglementation provinciale [7].

Les provinces de l'Alberta, de la Colombie-Britannique, de l'Ontario et du Québec ont divers degrés d'exigences réglementaires personnalisées, tandis que d'autres territoires se fient aux meilleures pratiques de l'industrie publiées par l'Association canadienne des barrages (ACB)[1] [7]. La plupart des territoires ont une version ou une autre d'une loi portant sur la protection de l'eau qui doit être observée par les propriétaires et les exploitants de barrages. Certains barrages peuvent également se trouver entre deux territoires s'ils traversent, ou si leurs systèmes traversent, des frontières provinciales. Dans ce cas, ils peuvent être assujettis à plus d'un ensemble de règlements.

3.1.1 Colombie-Britannique

Les barrages dans la province de la Colombie-Britannique sont régis par le Dam Safety Regulation (2016) [8] en vertu de la *Water Sustainability Act* (2016) [9]. Ce règlement tient les propriétaires de barrages responsables de la sécurité de leurs barrages et de tout dommage causé par leur construction, leur fonctionnement ou leur défaillance. Les propriétaires sont tenus d'inspecter leurs propres barrages, d'effectuer un entretien adéquat et de s'assurer que leurs barrages se conforment aux normes d'ingénierie courantes. Le Dam Safety Program, établi en 1967 [10], qui comprend la politique du programme de vérification de la sécurité des barrages, existe en vertu de ce règlement. La politique exige que les barrages classés comme ayant un niveau de conséquence important, très important et considérable soient évalués en vue de la conformité aux normes au moins une fois tous les cinq ans, alors que les barrages classés comme ayant un niveau de conséquence moyen (un échelon sous « important ») soient évalués tous les 10 ans. Les propriétaires qui ne se conforment pas à la réglementation sont assujettis à des mesures d'exécution de la part du Ministry of Forests, Lands, Natural Resource Operations, and Rural Development (MFLNRO). De nombreuses lignes directrices provinciales non normatives ont également été élaborées, notamment les Legislated Dam Safety Reviews in B.C. [11] et le Site Characterization for Dam Foundations [12] d'Engineers and Geoscientists British Columbia (EGBC)[2].

Dans le contexte juridictionnel de la Colombie-Britannique, il y a peu de mentions de barrages et de changements climatiques. La *Water Sustainability Act* contient une petite mention encourageant les décideurs à tenir compte des effets des changements climatiques au cours de l'examen trentenaire de leurs ententes de licence. La majeure partie de l'information sur les changements climatiques se trouve dans les documents de lignes directrices de l'EGBC. Le 2019 Professional Practice Guideline Site Characterization for Dam Foundations in BC V1.2 souligne que les changements climatiques pourraient être considérés comme un facteur de risque clé lors de la réalisation des caractérisations des sites et fournit des recommandations sur les considérations climatiques à inclure dans les rapports.

Les 2016 Legislated Dam Safety Reviews in BC-APEGBC Professional Practice Guidelines V3.0 mentionnent que les examens de sécurité des barrages devraient tenir compte des répercussions des changements climatiques sur l'état de sécurité du barrage au moment du rapport d'examen. Toutefois, les lignes directrices concèdent que la période de validité du rapport d'examen de la sécurité du barrage est très courte par rapport au rythme des changements climatiques. La ligne directrice provinciale la plus complète est 2018 Legislated Flood Assessments in a Changing Climate in BC V2.1. Elle décrit une approche fondée sur les risques pour intégrer les changements climatiques à la conception et à l'exploitation des barrages [13].

1 L'Association canadienne des barrages (ACB) est un organisme bénévole créé dans les années 1980 pour fournir aux propriétaires de barrages, exploitants, consultants, fournisseurs et organismes gouvernementaux un forum national pour discuter des questions de sécurité des barrages au Canada.

2 EGBC est le nom commercial de l'organisme, qui a changé en 2014. Le nom légal de l'organisme est demeuré Association of Professional Engineers and Geoscientists BC.

3.1.2 Alberta

Les barrages dans la province de l'Alberta sont régis par la *Province of Alberta Water Act* (2000) [14], The Alberta Dam and Canal Safety Directive (2018) [15], et le Water (Ministerial) Regulation (2020) [16]. La *Water Act* régit la conservation et la gestion de l'eau, y compris son allocation et son utilisation. L'Alberta Dam and Canal Safety Directive est une directive non normative qui fournit des directives sur l'application et l'autorisation de nouveaux barrages, la classification des conséquences, la gestion de la sécurité, l'enquête, la conception, la construction, les évaluations et les appréciations, l'exploitation, l'entretien et la surveillance, la gestion des urgences, les avis au directeur et la mise hors service, la fermeture et l'abandon. Le Water (Ministerial) Regulation encadre les activités et les utilisations de l'eau en Alberta.

Il n'y a aucune mention particulière des changements climatiques dans les lignes directrices ou dans les bulletins provinciaux de l'Alberta.

3.1.3 Ontario

Les barrages de l'Ontario sont réglementés par le ministère du Développement du Nord, des Mines, des Richesses naturelles et des Forêts (DNMRNF) en vertu de la *Loi sur l'aménagement des lacs et des rivières* (2019) [17]. La Loi autorise le DNMRNF à réglementer l'emplacement, la conception, la construction, la mise hors service, l'exploitation, et l'entretien des barrages. Le DNMRNF a créé une série de bulletins techniques et de meilleures pratiques de gestion avec des exigences obligatoires, des conseils techniques et des meilleures pratiques [18].

Il n'y a aucune mention particulière des changements climatiques dans les directives ou les bulletins provinciaux de l'Ontario.

3.1.4 Québec

Les barrages de la province de Québec sont régis par le Règlement sur la sécurité des barrages [19] (établi en vertu de la Loi sur la sécurité des barrages [20]), *la Loi sur le régime des eaux* [21], la *Loi sur la qualité de l'environnement* [22], et la *Loi sur la conservation et la mise en valeur de la faune* [23]. La *Loi sur la sécurité des barrages* accorde au ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELC) l'autorité nécessaire pour superviser l'administration et la réglementation de la Loi. L'objectif de la Loi est d'accroître la sécurité des barrages. La Loi s'applique aux personnes et aux biens et les protège contre les risques associés aux barrages en fournissant des exigences minimales aux propriétaires de barrages. En vertu de la Loi, chaque propriétaire de barrage de grande capacité doit soumettre ses barrages à un examen de la sécurité périodique par un ingénieur. Le Québec diffère également des autres provinces en ce sens que le niveau de conséquence des barrages est principalement basé sur l'infrastructure touchée, y compris les bâtiments résidentiels, plutôt que sur le risque de perte de vie en cas de rupture d'un barrage.

Il n'y a aucune mention particulière des changements climatiques dans les lois ou règlements provinciaux du Québec concernant les barrages.

3.1.5 Autres provinces et territoires

Toutes les autres provinces et tous les autres territoires n'ont pas de réglementation ou de loi distincte pour les barrages. Toute réglementation concernant les barrages est plutôt visée par la loi provinciale sur l'eau ou l'environnement. Cela comprend la *Water Security Agency Act* de la Saskatchewan (2020)[24], la *Loi sur les droits d'utilisation de l'eau* du Manitoba (2021) [25], la *Loi sur l'assainissement de l'eau* du Nouveau-Brunswick (1989) [26], *l'Environment Act-Regulation* de la Nouvelle-Écosse (1994) [27], le *Water Resources* Act de Terre-Neuve-et-Labrador (2002) [28], la *Water Act* de l'Île-du-Prince-Édouard (2021) [29], la *Loi sur les eaux* du Yukon (2003) [30], la *Loi sur les eaux* du Nunavut et le Tribunal des droits de surface du Nunavut (2002) [31], et la *Loi sur la gestion des ressources de la vallée du Mackenzie* (1998) [32] ainsi que la *Loi sur les eaux – Justice* (2014) des Territoires du Nord-Ouest [33]. S'il n'existe pas d'exigences provinciales officielles, l'industrie retient pour norme de suivre les lignes directrices de l'ACB [34].

Il n'y a aucune mention particulière des changements climatiques dans ces lignes directrices provinciales ou de l'ACB.

3.1.6 Industrie nucléaire du Canada

Les barrages liés à l'industrie nucléaire du Canada sont réglementés par la Commission canadienne de sûreté nucléaire (CCSN) en vertu de la *Loi sur la sûreté et la réglementation nucléaires* (2000) [35]. Les barrages dans les installations et sites nucléaires du Canada sont réglementés par les activités de permis et de

conformité de la CCSN. Cet encadrement par la CCSN est fondé sur une approche axée sur le risque et est mené pour obtenir l'assurance que les barrages sont conçus de manière appropriée et entretenus en vertu d'une provision adéquate pour la sécurité des barrages et pour la protection de la santé et de la sécurité des personnes et de l'environnement. Tout barrage sur des sites nucléaires sera examiné par le personnel de la CNSC et des experts internes avant d'être approuvé.

Il n'y a aucune mention particulière des changements climatiques dans les documents de la CCSN.

3.2 Lignes directrices nationales et fédérales

Il n'existe pas de lignes directrices nationales sur l'adaptation aux changements climatiques et les barrages au Canada. Le document de lignes directrices le plus utilisé est celui des Recommandations pour la sécurité des barrages l'ACB, publié en 2007 et mis à jour en 2013. Les Recommandations sont devenues un document de référence important pour la sécurité des barrages au Canada et rassemblent des principes applicables à tous les barrages, ainsi qu'un aperçu des processus et des critères de gestion de la sécurité des barrages conformément aux principes. Les recommandations de l'ACB sont appuyées par un ensemble de neuf documents techniques publiés en 2007 et révisés au besoin [7].

Au niveau fédéral, à l'exception des listes des lois de l'article 3.1.1, il n'existe qu'une seule directive générale élaborée par Parcs Canada pour les barrages sous sa supervision. Le document Directive du programme de sécurité des barrages pour les barrages et les structures de rétention d'eau de Parcs Canada a été créé à titre de guide de gestion pour les barrages et les structures de rétention d'eau de Parcs Canada tout au long de leur cycle de vie. Ces directives fournissent des directives nationales cohérentes pour la conception, la construction, l'inspection et l'entretien des barrages [36]. Cette directive ne tient pas compte des changements climatiques.

3.3 Normes internationales

Aucune norme internationale particulière tenant compte des répercussions des changements climatiques et des barrages n'a été identifiée. L'ISO (Organisation internationale de normalisation) a élaboré plusieurs lignes directrices pertinentes, notamment :

- *ISO 24516-2:2019 Guidelines for the management of assets of water supply and wastewater systems – Part 2: Waterworks*, qui comprend l'examen des réservoirs, mais qui ne tient pas compte des changements climatiques;
- *ISO 31000 Risk Management*, qui est une ligne directrice commune sur l'évaluation des risques qui ne tient pas compte des changements climatiques en particulier; cependant, elle est référencée par l'Optique des changements climatiques d'Infrastructure Canada comme une méthode appropriée pour mener des évaluations de résilience aux changements climatiques;
- *ISO 14090, Adaptation to climate change – Principles, requirements and guidelines,* qui ne mentionne pas les barrages, mais qui se concentre sur les bases de l'adaptation aux changements climatiques; et
- *ISO 14091:2021 Adaptation to climate change – Guidelines on vulnerability, impacts and risk assessment,* qui ne mentionne pas les barrages, mais qui se concentre sur les bases de l'évaluation de la vulnérabilité, des impacts et des risques liés au climat.

La CIGB présente plusieurs bulletins sur la sécurité des barrages, notamment le bulletin 59 Sécurité des barrages (1987), le bulletin 167 *Regulation of Dam Safety: An overview of current practice world wide* et le bulletin 189 *Current State-Of-Practice in Risk-Informed Decision-Making for The Safety of Dams and Levees.* D'autres bulletins traitent des changements climatiques, comme le bulletin 169 de la *CIGB, Global Climate Change, Dams, Reservoirs and related Water Resources* lesquels sont discutés plus en détail à la section 3.5.1.

3.4 Vulnérabilité des barrages aux changements climatiques

3.4.1 Exposition, dangers climatiques et tendances

Les conditions et les tendances actuelles et prévues en ce qui a trait au climat reposent largement sur l'emplacement géographique et sur le temps. En raison de la taille du pays et de ses paysages diversifiés, le climat du Canada est très varié et varie naturellement d'une année à l'autre, et d'une décennie à l'autre. La section suivante vise à donner un aperçu des tendances nationales prévues en matière de climat, mais ces conditions peuvent varier d'un endroit à l'autre. Les paramètres climatiques énumérés ci-

dessous ont été choisis en fonction de l'analyse documentaire et des discussions avec des experts de l'industrie concernant leurs répercussions potentielles sur les barrages.

La variabilité naturelle des systèmes climatiques est un facteur important qui doit être pris en compte lors de toute discussion sur les changements climatiques et sur leurs répercussions potentielles sur les barrages. La variabilité naturelle du climat fait référence aux fluctuations à court terme du climat moyen à un endroit particulier ou dans une région particulière. Une certaine variabilité naturelle est susceptible de se produire sur des échelles géographiques ou temporelles plus vastes, comme l'oscillation australe El Niño (ENSO), qui produit des températures plus chaudes et des conditions plus sèches dans la plupart des régions du pays [37]. Les changements climatiques sont une toile de fond à rythme plus lent, et à long terme, pour ces fluctuations naturelles plus courtes. Ils pourraient modifier la variabilité moyenne et naturelle.

La section suivante porte sur les observations historiques des changements climatiques ainsi que sur les prévisions. Les projections climatiques reposent en partie sur des données historiques sur le climat. Bien que la majeure partie du sud du pays ait des registres constants pour les années 1900, les régions du nord et le Canada, dans son ensemble, ne couvrent qu'une période débutant en 1948 [37]. De même, les sites d'observation sont souvent répartis densément autour des zones urbaines et du sud et sont beaucoup plus rares dans les régions du nord. Entre-temps, de nombreux barrages, surtout avec des structures plus grandes, sont situés dans des régions nordiques ou éloignées.

Les modèles climatiques utilisent des intrants appelés « scénarios d'émissions » pour déterminer les prévisions climatiques futures. Les scénarios d'émissions sont des images de la façon dont l'avenir pourrait se dérouler en fonction de facteurs déterminants tels que le développement démographique, le développement socio-économique et le changement technologique, ainsi que de leur incidence sur les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Un scénario de faibles émissions suppose des réductions rapides et marquées des émissions, et des émissions quasi nulles au cours du présent siècle, tandis qu'un scénario d'émissions élevées suppose une croissance continue des émissions au cours du présent siècle. Au total, il existe quatre scénarios d'émissions couramment utilisés conçus pour s'adapter aux différents contextes possibles de l'avenir, appelés « profils représentatifs d'évolution de concentration » ou « RCP » [37]. Dans la mesure du possible, cette étude a utilisé les données de projection provenant d'un scénario d'émissions élevées (RCP 8.5) pour rester prudente lorsqu'on envisage les répercussions potentielles. Lorsqu'un autre autre scénario a été utilisé en raison d'un manque de données, ceci est indiqué. Les changements prévus aux paramètres climatiques et aux dangers sont présentés ci-dessous afin de mieux expliquer l'exposition du Canada aux changements climatiques. La vulnérabilité des barrages aux changements climatiques est abordée dans d'autres sections. Le risque est la combinaison de l'exposition et de la vulnérabilité; par conséquent, ces sections fournissent une discussion sur les risques climatiques potentiels pour les barrages au Canada.

Tableau 1 : Variations observées de la température moyenne annuelle et saisonnière entre 1948 et 2016 pour six régions et pour le Canada

Région	Variations de température en °C				
	Annuelles	Hiver	Printemps	Été	Automne
Colombie-Britannique	1,9	3,7	1,9	1,4	0,7
Prairies	1,9	3,1	2,0	1,8	1,1
Ontario	1,3	2,0	1,5	1,1	1,0
Québec	1,1	1,4	0,7	1,5	1,5
Atlantique	0,7	0,5	0,8	1,3	1,1
Nord du Canada	2,3	4,3	2,0	1,6	2,6
Canada	1,7	3,3	1,7	1,5	1,7

3.4.1.1 Température

Les modèles qui montrent que les températures moyennes annuelles et saisonnières dans tout le Canada ont déjà augmenté sont très sûrs. Entre 1948 et 2016, la meilleure estimation de l'augmentation annuelle moyenne de la température était de 1,7 °C pour l'ensemble du pays [38]. Les hausses de température les plus importantes en hiver ont été constatées dans le nord de la Colombie-Britannique et de l'Alberta, au Yukon, dans les Territoires du Nord-Ouest et dans l'ouest du Nunavut, se situant entre 4 °C et 6 °C pendant la même période [39]. Le printemps a suivi une tendance semblable partout au pays, mais d'ampleur plus limitée. Le réchauffement en été a été beaucoup moins marqué que celui de l'hiver ou du printemps, mais a généralement été plus uniforme à l'échelle du pays par rapport aux autres saisons. Pendant l'automne, la plupart des augmentations ont été observées dans les régions du nord-est du pays, principalement dans les Territoires du Nord-Ouest, au Nunavut et dans le nord du Québec [39]. Le tableau 1 souligne les changements régionaux observés sur le plan des températures moyennes annuelles et saisonnières dans tout le pays entre 1948 et 2016 [39].

On pense que les augmentations moyennes observées et projetées au Canada sont environ deux fois plus importantes que le taux moyen mondial, quel que soit le scénario d'émissions. Calculé en moyenne pour tout le pays, le réchauffement prévu dans le cadre d'un scénario à émissions élevées (RCP 8.5) se situera à environ 6 °C de plus que la base de référence historique de 1986-2005 d'ici la fin du 21e siècle [39].

Tableau 2 : Variation projetée (en °C) de la température moyenne annuelle de l'air de surface conformément au RCP 8.5 pour six régions et tout le territoire du Canada, par rapport à 1986-2005 (avec 25e et 75e centiles)

Région	Horizon temporel	
	2031-2050	2081-2100
Colombie-Britannique	1,9 (1,4, 2,5)	5,2 (4,3, 6,2)
Prairies	2,3 (1,7, 3,0)	6,5 (5,2, 7,0)
Ontario	2,3 (1,7, 2,9)	6,3 (5,3, 6,9)
Québec	2,3 (1,7, 2,9)	6,3 (5,3, 6,9)
Atlantique	1,9 (1,5, 2,4)	5,2 (4,5, 6,1)
Nord	2,7 (2,0, 3,5)	7,8 (6,2, 8,4)
Canada	2,3 (1,7, 2,9)	6,3 (5,6, 7,7)

Les hausses projetées des températures sont plus évidentes dans les latitudes supérieures et dans la moyenne hivernale et annuelle. Dans le sud du Canada, la variation prévue de la température hivernale est plus importante dans l'est que dans l'ouest, et on prévoit que la Colombie-Britannique se réchauffera légèrement moins que d'autres endroits du pays [39]. Le tableau 2 souligne la variation prévue de la température de surface moyenne annuelle pour les régions du pays [39]. L'information comprend les 25e et 75e centiles des données modélisées, conformément au scénario RCP 8.5 sur les émissions.

Il est important de noter que la variabilité interne du climat d'une année à l'autre continuera de se produire en même temps que les changements climatiques qui se produisent lentement. L'avenir continuera d'avoir des périodes de chaleur et de froid extrêmes dans le contexte d'un changement graduel forcé du climat.

3.4.1.2 Précipitations

Les précipitations observées à travers le Canada ont augmenté d'environ 20 % de 1948 à 2012 [38]. Ces augmentations étaient plus importantes dans le nord du Canada, notamment au Yukon, dans les Territoires du Nord-Ouest, au Nunavut et dans le nord du Québec, que dans le sud du Canada [39]. Des augmentations importantes ont également été observées dans l'est du Manitoba, dans l'ouest et dans le sud de l'Ontario et dans les provinces de l'Atlantique.

On accorde un niveau de confiance moyen au fait que la précipitation moyenne annuelle a augmenté dans le pays et un niveau de confiance faible à l'estimation de l'ampleur de la tendance nationale en raison de la densité insuffisante des sites d'observation au pays. Dans le nord du Canada, les précipitations ont augmenté chaque saison. Dans le sud du Canada, les précipitations ont augmenté dans la plupart des saisons, mais cette augmentation n'est généralement pas significative sur le plan statistique, à l'exception d'en Colombie-Britannique, en Alberta et en Saskatchewan, qui ont connu des diminutions significatives des précipitations d'hiver sur le plan statistique. Le tableau 3 souligne les changements observés dans les précipitations annuelles et saisonnières entre 1948 et 2012 pour les régions du pays [39].

Tableau 3 : Changements observés dans les précipitations annuelles et saisonnières normalisées entre 1948 et 2012 pour six régions et tout le territoire du Canada

Région	Changements dans les précipitations entre 1948 et 2012 (%)				
	Annuelles	Hiver	Printemps	Été	Automne
Colombie-Britannique	5,0	-9,0	18,2	7,9	11,5
Prairies	7,0	-5,9	13,6	8,4	5,8
Ontario	9,7	5,2	12,5	8,6	17,8
Québec	10,5	5,3	20,9	6,6	20,0
Atlantique	11,3	5,1	5,7	11,2	18,2
Nord du Canada	32,5	54,0	42,2	18,1	32,1
Canada	18,3	20,1	25,3	12,7	19,0

En ce qui concerne les événements de précipitations extrêmes de courte durée au Canada, pour l'ensemble du pays, il ne semble pas y avoir de tendance détectable. Un plus grand nombre de sites d'observation ont constaté une augmentation au lieu d'une baisse de la plus grande quantité de précipitations en une journée chaque année, mais l'orientation des tendances est aléatoire dans l'espace et non supérieure à ce qui serait attendu du hasard [40] [41] [42]. Cela ne correspond pas aux tendances mondiales et à celles des régions contiguës des États-Unis.

Le nombre de jours de forte pluie n'a augmenté que de 2 à 3 jours depuis 1948 dans le sud de la Colombie-Britannique, en Ontario, au Québec et dans les provinces de l'Atlantique [43]. Le nombre de jours avec une pluviométrie totale sur une heure supérieure à 10 mm, avec une pluviométrie totale sur 24 heures supérieure à 25 mm, ou avec une pluviométrie totale sur 48 heures supérieure à 50 mm, n'a pas non plus montré de changement constant sur l'ensemble du pays [41].

Les changements détectés attribuables à l'activité humaine dans les tendances historiques de précipitations sont moins significatifs par rapport aux tendances de température. Cette distinction est principalement attribuable à une variabilité spatiale et temporelle plus importante des données relatives aux précipitations, plutôt qu'à une plus petite amplitude de changement. Les variations prévues des précipitations en réponse à des températures croissantes pourraient être faibles comparativement à la variabilité naturelle. De plus, à l'échelle régionale (comparativement à l'échelle mondiale), des observations à long terme limitées peuvent rendre la détection plus difficile [39].

En général, les projections de précipitations sont considérées comme moins certaines et plus difficiles à modéliser avec précision que la température. On accorde uniquement un niveau de confiance moyen au fait qu'une contribution humaine existe dans les variations de précipitations à l'échelle mondiale observées sur le territoire depuis 1950. Cependant, les prévisions climatiques pour les précipitations futures indiquent que des changements devraient être prévus. Les précipitations annuelles et hivernales devraient augmenter dans tout le pays au cours du 21e siècle, avec des changements plus importants prévus dans le nord du Canada. On prévoit que les précipitations estivales diminueront dans le sud de l'Ontario. On prévoit une hausse des précipitations extrêmes quotidiennes. Le tableau souligne les variations projetées de la précipitation moyenne annuelle pour les régions de tout le pays par rapport à une base de référence historique de 1986 à 2005 [39]. Le tableau comprend également les 25e et 75e centiles des données modélisées, conformément au scénario RCP 8.5 sur les émissions.

Tableau 4 : Variation du pourcentage projeté (%) de la précipitation moyenne annuelle conformément au RCP 8.5 pour six régions et pour toutes les régions du territoire du Canada par rapport à 1986 à 2005 (avec 25e et 75e centiles)

Région	Horizon temporel	
	2031-2050	2081-2100
Colombie-Britannique	5,7 (0,0, 11,4)	13,8 (5,7, 22,4)
Prairies	6,5 (0,4, 13,1)	15,3 (6,3, 24,9)
Ontario	6,6 (1,8, 12,4)	17,3 (8,5, 26,1)
Québec	9,4 (4,5, 14,7)	22,5 (14,8, 32,0)
Atlantique	5,0 (0,6, 9,9)	12,0 (5,7, 19,3)
Nord	11,3 (5,4, 18,1)	33,3 (22,1, 46,4)
Canada	7,3 (2,0, 13,2)	24,2 (13,7, 36,2)

À court terme (de 2031 à 2050), une petite augmentation (moins de 10 %) est prévue pour toutes les saisons, avec des valeurs légèrement plus élevées projetées pour le nord-est. À long terme (de 2081 à 2100), les changements prévus sont beaucoup plus importants, et on prévoit des régions étendues de précipitations accrues dans le nord du Canada. Les précipitations annuelles et hivernales devraient augmenter partout au Canada au cours du 21e siècle, avec des changements de pourcentage plus importants dans les régions du nord. On prévoit que les précipitations estivales diminueront dans le sud du Canada dans le cadre d'un scénario à émissions élevées (bien que seules de faibles augmentations soient prévues en vertu d'un scénario à faibles émissions) [39].

Il n'existe pas de signes mis en évidence par l'observation de changements dans les quantités de précipitations extrêmes sous-quotidiennes pour le pays dans son ensemble. Cependant, pour l'avenir, on accorde un niveau de confiance élevé au fait que les quantités de précipitations extrêmes quotidiennes augmenteront. On prévoit une augmentation des précipitations extrêmes partout au pays. Les précipitations extrêmes avec une période de retour de 20 ans devraient devenir un événement de 10 ans à court terme (2031-2050) et un événement de 5 ans à long terme (2081-2100). Cette variation relative de la fréquence est plus marquée pour les événements extrêmes et plus rares [39]. Étant donné que les barrages sont conçus pour des périodes de retour beaucoup plus importantes (par exemple, de 1 000 à 100 000 ans), cela pourrait être préoccupant. Ouranos a étudié l'impact des changements de précipitations sur les crues de projet pour les barrages, ce qui est abordé plus en détail à la section 3.5.6.

Il est à noter qu'il est difficile d'interpréter les résultats des modèles climatiques mondiaux à une échelle locale, surtout en ce qui a trait aux précipitations. Les résultats de ces modèles peuvent transmettre de l'information de manière impraticable pour l'utilisation opérationnelle à une échelle locale et peuvent ne pas inclure tous les processus physiques qui produisent des événements de précipitations intenses à l'échelle locale [39].

3.4.1.3 Accumulation de neige et couverture neigeuse

Des observations historiques ont montré que l'accumulation saisonnière de neige et que la partie de l'année où une couverture neigeuse est présente sont en déclin dans la plupart des régions du Canada. Depuis 1981, la fraction de la couverture neigeuse (la partie du nombre de jours, chaque mois, où la neige est présente au sol) a diminué de 5 à 10 % par décennie en raison de son apparition tardive et de la fonte plus précoce du printemps [44]. Cette caractéristique est particulièrement notable pour l'est du Canada au printemps et pour la grande partie du pays à l'automne. Au cours de la même période, l'accumulation saisonnière de neige a également diminué de 5 à 10 % par décennie, à l'exception du sud de la Saskatchewan et de certaines régions de l'Alberta et de la Colombie-Britannique, qui ont connu une augmentation de 2 à 5 % par décennie [44].

Pendant les mois d'hiver, on prévoit des diminutions de la neige dans le sud du Canada, où les hausses de température se traduiront par moins de chutes de neige en tant que pourcentage des précipitations totales [45]. On prévoit que les températures dans les régions du nord resteront suffisamment froides en hiver pour prévenir un changement de la couverture neigeuse en réaction au réchauffement. Au printemps, cependant, on s'attend à ce que les régions où serait constatée la réduction de la fonte de la neige soient déportées vers le nord, à mesure que la couverture neigeuse recule dans la forêt boréale, la région subarctique et l'Extrême-Arctique [44].

Les prévisions indiquent que les réductions de l'équivalent maximal en eau de la neige (la quantité d'eau sous forme de neige) seront importantes (de 15 % à 30 % de 2020 à 2050) dans la majeure partie du sud du Canada, les plus grands changements se produisant dans les Maritimes et en Colombie-Britannique. On prévoit que la plus grande perte de neige à l'échelle du pays se produira en période intermédiaire (d'octobre à novembre et de mai à juin) [44].



« Les glaciers et les calottes glaciaires alpines du Canada se sont amincis au cours des cinq dernières décennies en raison de l'augmentation des températures de surface. »

3.4.1.4 Fonte des glaciers et de la calotte glaciaire

Au Canada, les glaciers et les calottes glaciaires alpines se sont amincis au cours des cinq dernières décennies en raison de la hausse de la température de surface. La santé de ces systèmes est souvent mesurée par l'équilibre de la masse de surface, la différence entre la masse annuelle gagnée par l'accumulation de neige et la masse perdue en raison de la fonte de la neige [44].

On a déjà observé une réduction de l'équilibre de la masse de surface dans le sud du Canada. L'augmentation des températures et les périodes de précipitations réduites dans l'ouest du Canada ont causé un amincissement des glaciers dans le sud de la cordillère de 30 à 50 m depuis le début des années 1980 [46]. Des tendances semblables ont été observées dans tout le pays, notamment des réductions des glaciers observées dans le parc provincial Garibaldi, dans les Rocheuses canadiennes, dans le champ de glace Columbia, dans la chaîne Cariboo dans l'ouest et dans les monts Torngat dans l'est [47] [48] [49] [50].

Les glaciers et les champs de glace des régions du nord ont également connu des réductions mesurables. Au Yukon, ils ont diminué d'environ 22 % entre 1957 et 2007 [51]. L'archipel arctique canadien a subi une réduction de sa masse de plus du double de celle de 1995 à 2000 et de 2003 à 2010, selon deux études sur ces périodes. La réduction a continué de s'accélérer [52]. La calotte glaciaire Barnes de l'île de Baffin a perdu 17 % de sa masse entre 1900 à 2010 [53].

La plupart des petites calottes glaciaires et barrières de glace dans l'Arctique canadien disparaîtront d'ici 2100 [44]. Les plus grandes calottes glaciaires dans cette région perdront 18 % de leur masse totale d'ici la fin du siècle [54] [55]. On prévoit que les glaciers de la cordillère de l'ouest perdront jusqu'à 85 % de leur volume d'ici la fin du siècle [44]. Les rivières alimentées par ces glaciers pourraient initialement connaître des périodes de déversement plus longues en raison de l'approvisionnement plus important en eaux de fonte, mais on s'attend à ce que cela soit limité et mène à une réduction du débit d'été vers le milieu du siècle (2050). Ces changements auront des répercussions importantes pour les propriétaires de barrages disposant d'infrastructures sur les rivières alimentées par les glaciers, et sur les collectivités comptant sur les glaciers pour s'approvisionner en eau. Il y a aussi un risque que la fonte des glaciers mène à des mares d'eau rompant le barrage glaciaire naturel, causant des crues en aval et un risque de ruptures en cascade des barrages.

3.4.1.5 Changement de la glace des lacs et rivières

La durée du couvert de glace saisonnier des lacs a diminué au Canada au cours des cinq dernières décennies en raison de la formation tardive de la glace à l'automne et de sa rupture précoce du printemps. Les observations en surface ont montré que la rupture de la glace se produit plus tôt et que le gel apparaît plus tard dans les petits lacs du sud du Québec, de l'Ontario, du Manitoba et de la Saskatchewan [44].

Aucune tendance significative n'a été observée dans le couvert de glace saisonnier maximal des Grands Lacs, qui est très variable depuis 1971 [44]. On a observé une tendance à la baisse significative du couvert de glace annuel maximal par rapport à 1973 à 2010 (baisse de 71 % pour tous les Grands Lacs), mais les grandes années de glace en 2014, 2015 et 2018 n'ont entraîné aucune tendance au-delà de la période 1973 à 2018 [56]. Les mesures par satellite montrent que les dates auxquelles l'eau est libre de glace sont plus précoces dans les lacs de l'Arctique canadien et une réduction de la durée du couvert de la glace dans 80 % des lacs arctiques de 2002 à 2015 [57].

Il existe un manque d'évaluation de la variation de la glace fluviale dans tout le pays en raison de la rareté de l'observation et de l'analyse des données disponibles [44]. Il existe des signes de bris précoce de la glace en rivière, ce qui correspond à des hausses de température de surface. Cependant, les relations entre le climat et la phénologie et l'épaisseur de la glace, les changements des régimes de débit saisonniers, les processus hydrauliques, les embâcles et les événements de crue ne sont pas entièrement comprises [58] [59].

Les projections indiquent que la débâcle des lacs au printemps aura lieu de 10 à 25 jours plus tôt d'ici le milieu du siècle et que le gel automnal pourrait se produire de 5 à 15 jours plus tard (en fonction du scénario des émissions et des caractéristiques propres au lac) [60] [61]. Des réductions extrêmes allant jusqu'à 60 jours sont prévues dans les régions côtières [44]. On prévoit que les températures croissantes entraîneront une débâcle plus précoce au printemps en raison de la diminution de la résistance mécanique de la glace et de l'apparition plus précoce des débits de pointe. Des débâcles plus fréquentes au milieu de l'hiver et des événements connexes sont prévus, bien que les changements prévus dans les propriétés de la glace des rivières puissent réduire les obstructions de glace pendant le passage des crues printanières [62].

3.4.1.6 Fonte du pergélisol

Le pergélisol sous-tend environ 40 % du territoire canadien et constitue un facteur important de la stabilité structurale dans les régions du nord [44]. On accorde un niveau de confiance très élevé au fait que les températures du pergélisol ont augmenté au cours des 3 à 4 dernières décennies, avec des observations régionales indiquant des taux de réchauffement d'environ 0,1 °C par décennie dans la vallée centrale du Mackenzie et de 0,3 °C à 0,5 °C par décennie dans l'Extrême-Arctique [63]. L'épaisseur de la couche active (la couche supérieure du sol qui dégèle à l'été et qui gèle à l'automne) a diminué d'environ 10 % depuis 2000 dans la vallée du Mackenzie. Il est à noter que les conditions du pergélisol sont difficiles à surveiller parce qu'elles nécessitent une surveillance in situ dans des zones difficiles d'accès [44].

Dans le nord du Québec, le pergélisol continue de se réchauffer à un rythme se situant entre 0,5 °C et 1 °C par décennie [64] [65]. Au cours des cinq dernières décennies, on a noté une perte de monticules de pergélisol, des effondrements de lithalsas et des étangs thermokarstiques de plus grande taille dans la région, ce qui a apporté des preuves supplémentaires du changement des conditions du pergélisol [66] [67]. D'autres signes de perte de pergélisol ont été trouvés dans les monts Mackenzie des Territoires du Nord-Ouest, le long du corridor de l'autoroute de l'Alaska (entre Whitehorse et St John), dans la plaine Old Crow (Yukon) et dans le sud des Territoires du Nord-Ouest [68] [69] [70] [71].

Il y a des incertitudes concernant les projections quantitatives des changements futurs du pergélisol en raison de la représentation inadéquate des propriétés du sol et de l'incertitude dans la compréhension de la réaction du pergélisol profond, ainsi que de l'intersection des événements de précipitations, de la croissance de la végétation, des feux de forêt et des activités humaines [44]. Les simulations réalisées à partir de modèles examinant le pergélisol plus profond et fondées sur des scénarios d'émissions faibles et moyennes présagent que le territoire sous-tendu par le pergélisol au Canada baissera d'environ 16 % à 20 % d'ici 2090 par rapport à un niveau de référence de 1990 [72].

3.4.1.7 Feux de forêt

Les changements prévus dans la fréquence des températures et précipitations extrêmes pourraient donner lieu à un changement prévu de la probabilité de feux de forêt. La Méthode canadienne de l'indice Forêt-Météo (IFM) est un ensemble de variables météorologiques utilisées pour caractériser le risque de feu. Un seuil de cette méthode est souvent utilisé pour définir les jours propices à la propagation des feux [73] [74]. La grande variabilité de l'IFM d'une année à l'autre a nui à la détection historique des tendances dans tout le pays [75] [76]. Une étude a révélé que le

nombre moyen de jours de propagation des feux dans tout le Canada a augmenté entre 1972 et 2002, bien que ces tendances étaient régionales et n'étaient pas toutes significatives [73]. Malgré les incohérences dans les indices, il y a aussi eu une augmentation importante des secteurs qui ont brûlé chaque année au Canada [77] [78].

Les augmentations de température prévues contribueront probablement à l'augmentation des valeurs des indices IFM et, par conséquent, à l'augmentation du risque de feu. On prévoit une augmentation du nombre de jours de propagation des incendies et des valeurs extrêmes de l'IFM, ainsi qu'une augmentation de la durée de la saison des feux au Canada [39].

3.4.2 Vulnérabilités des barrages

Les tendances climatiques et les dangers cernés dans la section précédente pourraient avoir une incidence sur la conception de nouveaux barrages, modifier l'exploitation ou poser une menace aux barrages existants. Les sections suivantes traitent de ces vulnérabilités potentielles.

3.4.2.1 Conception

3.4.2.1.1 Crues de projet

Selon les lignes directrices de l'ACB, les barrages doivent pourvoir pour résister à une crue de projet d'une ampleur déterminée en fonction de leur classification [7]. La classification des barrages est effectuée en fonction du niveau de conséquence d'une défaillance du barrage, y compris la perte de vie, les blessures, les dommages matériels et les dommages environnementaux dans la zone inondée. Les niveaux de classification et les critères associés aux crues de projet sont présentés au tableau 5, avec la fréquence de révision suggérée selon les examens de la sécurité des barrages. Il est également recommandé d'effectuer des examens de la sécurité de barrages ou une enquête appropriée lorsque des événements hydrologiques extrêmes se produisent, car ils peuvent avoir une incidence sur l'ampleur de la crue de projet et sur la capacité du barrage de la supporter et de la décharger.

L'impact que les changements climatiques peuvent avoir sur la crue de projet est difficile à quantifier et dépend d'une myriade de paramètres, notamment l'emplacement et la taille du bassin versant [79]. Le processus d'utilisation des projections climatiques pour estimer les crues comporte plusieurs couches d'incertitude [80]. Selon Ouranos, il incombera aux ingénieurs qui exécutent les conceptions et les examens de la sécurité des barrages d'évaluer l'impact des crues de projet sur un site particulier en raison des tendances climatiques et de démontrer la résilience du barrage aux changements climatiques [80].

Le tableau 5 indique que pour les barrages à faible niveau de danger, les examens de la sécurité des barrages et les crues de projet ne nécessitent pas une vérification régulière. Toutefois, selon les données de projection des changements climatiques, on s'attend à ce qu'un événement à une période de retour sur 100 ans se produise plus fréquemment. Bien que les occurrences réelles de ces événements augmentent, les probabilités statistiques de ces événements devraient également être révisées pour tenir compte des changements climatiques. Il est possible que les barrages actuellement conçus pour un événement survenant une fois sur 100 ans aient à réviser leur crue de projet et éventuellement apporter des modifications à la capacité de crue du barrage.

Tableau 5 : Périodes de récurrence des crues de projet et recommandations de mise à jour des examens de la sécurité des barrages selon les Recommandations de sécurité des barrages de l'ACB [7]

Classification des barrages en fonction du niveau de conséquence	Recommandations liées aux crues de projet – probabilité de dépassement annuel d'une crue	Fréquence suggérée des examens de la sécurité des barrages
Faible	1/100	Non requise
Importante	1/100 à 1/1000	10 ans
Élevée	1/3 entre 1/1000 et la CMP[1]	7 ans
Très élevée	2/3 entre 1/1000 et la CMP1	5 ans
Extrême	CMP[1]	5 ans

[1] Crue maximale probable

3.4.2.1.2 Capacité de stockage et de déversement

Bien que les événements hydrologiques extrêmes puissent nécessiter une plus grande capacité de stockage ou de déversement pour le réservoir, les changements climatiques peuvent ajouter des contraintes à la situation.

Il est attendu que les événements de coulée de débris soient plus fréquents et plus intenses dans les régions montagneuses à l'avenir [81] et ceux-ci ont été identifiés comme un risque dans le contexte des changements climatiques pour les barrages [82]. Dans le bulletin 170 de la CIGB sur l'évaluation des crues et la sécurité des barrages, un scénario avec blocage par débris de 25 % de la capacité d'évacuation des évacuateurs de crues clôturés dans les zones boisées nécessite d'être envisagé pour établir la capacité de déversement de la crue de projet [83].

Le frasil pourrait boucher les entrées d'eau et les turbines, ou s'accumuler et causer des embâcles glaciaires, comme l'indique Ouranos [84], bien que l'impact des changements climatiques sur sa production soit difficile à quantifier à ce stade. On croit que la formation retardée d'un couvert de glace ou son absence sur certaines rivières peut augmenter la production de frasil [85]. Un exemple tiré des publications a démontré qu'au Québec, un propriétaire de barrage public a constaté une augmentation des fortes crues à la fin novembre et au début décembre, qui ont causé de graves problèmes de frasil pour ses actifs [86]. Aucune discussion n'a eu lieu sur les réactions et les mesures d'atténuation des effets sur les barrages du frasil causé par les changements climatiques.

Une augmentation des précipitations sous forme de pluie et de fonte des glaciers est susceptible d'entraîner une augmentation des ruissellements et de la sédimentation dans les réservoirs des barrages [84] [87] [88] [89]. La sédimentation pourrait donner lieu à une diminution très lente et très subtile de la capacité du réservoir, qui deviendrait importante au fil de plusieurs années [82].

3.4.2.1.3 Conditions limites de la modélisation hydraulique

Une brève mention dans le bulletin 170 de la CIGB sur les crues et la sécurité des barrages laisse entendre que l'élévation du niveau de la mer pourrait devoir être prise en compte dans le cadre des modélisations hydrauliques des ruptures de barrages ou de cartographie des crues pour les estuaires ou les emplacements où le niveau de la mer dicte les niveaux de l'eau [83], mais cela n'est peut-être pas le cas pour de nombreuses installations canadiennes.

3.4.2.2 Exploitation

3.4.2.2.1 Utilisation partagée de l'approvisionnement en eau

Compte tenu des changements climatiques, l'utilisation partagée de la ressource en eau est une préoccupation croissante, comme l'a démontré le bassin du Mékong [90]. Les incidences des changements climatiques sur la fréquence et l'intensité des crues et des sécheresses associées au développement de l'hydroélectricité en Chine ont eu de graves répercussions sur la production agricole et halieutique. Les changements dans l'utilisation des terres (c.-à-d., l'urbanisation) et des crues ont des répercussions sur le ruissellement, l'exploitation des barrages et la sédimentation. Les contraintes liées à l'utilisation partagée des approvisionnements en eau ont également été prises en compte par les organismes fédéraux aux États-Unis, notamment dans le document Climate Change and Water Resources Management réalisé en 2009 [91].

Au Canada, les ressources en eau sont utilisées pour diverses fonctions : embouteillage, approvisionnement en eau pour l'industrie, municipalités, pisciculture, agriculture et exploitation minière, ainsi que l'utilisation sur place pour la production d'hydroélectricité, le transport fluvial, la pêche, l'élimination des eaux usées et les activités récréatives [92]. La diminution potentielle de la qualité et de la disponibilité de l'eau, le besoin accru en hydroélectricité pour réduire les émissions de carbone, l'augmentation de la demande en eau pour l'irrigation pendant les périodes sèches et la croissance démographique augmenteront la demande pour toutes les utilisations de ressources en eau, ce qui pourrait mener à des conflits.

3.4.2.2.2 Accès

Les routes d'accès ont été distinguées comme une vulnérabilité potentielle des barrages dans un contexte de changement climatique par l'International Hydropower Association (IHA) dans son guide de résilience au climat [93]. Les routes d'accès sont essentielles à la sécurité et à l'exploitation des barrages [7], surtout s'il est impossible de les commander à

distance. Les risques comprennent les événements hydrologiques extrêmes qui endommagent la surface, la fonte du pergélisol, l'augmentation des débris et les ruissellements [93]. Des routes de glace sont aussi susceptibles se former plus tard, ou le couvert de glace pourrait être trop mince pour être utilisé pour les déplacements [93].

3.4.2.2.3 Fonctionnement par temps froid

Le fonctionnement de l'équipement de vanne pourrait être inhibé par le froid [7] et la glace. On prévoit que l'utilisation de cet équipement devrait augmenter en raison de l'augmentation des événements à débit élevé pendant l'hiver. La pulvérisation et le givrage ont été l'une des circonstances qui ont entouré la rupture du barrage Spencer au Nebraska, aux États-Unis, en 2019, qui est venue de l'incapacité des opérateurs à retirer les poutrelles des vannes [94]. Ce problème a également été observé au Canada, dans l'installation de déversoir de Sainte-Marguerite-2 (SM-2) [95].

3.4.2.2.4 Pannes de courant et systèmes de commande

Les événements extrêmes comme les tempêtes de verglas, les ouragans, les vents violents et les tornades pourraient augmenter [37], endommageant l'équipement de surveillance et les commandes de fonctionnement et interrompant l'alimentation électrique à l'équipement critique [96]. Ces événements représentent donc des risques pour l'exploitation et la sécurité des barrages.

3.4.2.2.5 Génération d'hydroélectricité

Bien que les tendances climatiques mises en évidence auront une incidence sur la production d'hydroélectricité, l'ampleur et le type d'impact diffèrent en fonction de l'horizon temporel et de la région.

Landsvirkjun, l'entreprise productrice d'électricité de l'État islandais, a adapté la conception et la gestion des barrages afin de refléter l'augmentation du débit en raison de la fonte des glaciers, qui a pour l'instant augmenté la production d'électricité [97]. Le taux de fonte des glaciers devrait atteindre un plateau en 2030 et demeurer constant jusqu'en 2080. Après 2080, la réduction du volume des glaciers donnera lieu à une réduction des débits. Plusieurs barrages canadiens sont situés dans des bassins hydrographiques influencés par les glaciers, dont certains en Colombie-Britannique, en Alberta, en Saskatchewan, au Manitoba et au Yukon [98].

Des recherches ont été menées à l'échelle internationale sur l'effet des changements climatiques sur la production d'énergie hydroélectrique. Une étude [98] a comparé le type de barrage, la taille du réservoir et le rapport superficie/volume du réservoir à quatre tendances climatiques : évaporation, rejet, variabilité temporelle et fonte des glaciers. Les résultats ont montré que la production d'électricité par pompage-turbinage n'était vulnérable qu'à l'évaporation, tandis que les barrages avec réservoirs étaient vulnérables aux changements attribuables à l'évaporation, au rejet et à la fonte des glaciers, mais qu'ils étaient quelque peu résistants à la variabilité temporelle (crues, sécheresses et effets saisonniers). Les barrages au fil de l'eau, quant à eux, se sont principalement trouvés vulnérables à la variabilité temporelle. Les barrages avec stockage dont le rapport superficie/volume du réservoir est élevé étaient plus sensibles aux évaporations que les barrages dont le rapport est plus bas.

Certaines études étaient plus spécifiques au Canada. Les tendances des précipitations et l'impact sur les rejets varient localement, même au sein d'un même bassin versant, comme on l'a démontré pour le bassin versant de la Péribonka [99]. Cette étude a évalué le rejet sur quatre sous-bassins différents d'après les projections climatiques pour trois périodes différentes, et l'a comparé aux données historiques. Les résultats montrent que bien qu'il existe une tendance générale vers des crues précoces, les débits diminuent pour l'été et le début de l'automne et augmentent en hiver. Les deux sous-bassins du sud avaient des crues plus précoces et plus basses que les deux bassins du nord, mais une hausse plus marquée du débit d'hiver. Les débits élevés du printemps ont été projetés à un sommet plus bas pour l'horizon de 2010 à 2069 que celui de la période de 1961 à 1990, mais plus élevé pour la période de 2070 à 2099 (sauf pour l'un des deux sous-bassins du sud). Il a été démontré qu'en utilisant les procédures d'exploitation actuelles, on s'attendait à ce que la production d'énergie diminue en raison des changements climatiques. En adaptant l'exploitation, les résultats montrent que la production d'énergie annuelle devrait diminuer jusqu'en 2030 (en raison d'une diminution de l'écoulement dans le sous-bassin du sud) et augmenter jusqu'en 2099 (limite de l'horizon de cette étude; en raison de crues printanières plus marquées). Dans l'ensemble, on s'attend à une plus grande variabilité interannuelle.



« Les tendances climatiques pour la plupart des villes canadiennes évoluent vers des hivers plus chauds et une possibilité accrue de dégel hivernal et de précipitations sous forme de pluie. »

En 2020, Ouranos a présenté un guide sur l'évaluation des actifs hydroélectriques dans un contexte des changements climatiques [100]. Parmi les vulnérabilités pécuniaires identifiées en matière d'énergie hydroélectrique, on compte les changements de la demande, la production d'énergie et la sortie d'énergie, la perte de stockage actif causée par un changement dans les mesures de prévention des crues et une augmentation des tarifs d'assurance en raison de la fréquence et de l'ampleur accrues des événements extrêmes.

3.4.2.3 Sécurité et entretien des barrages

3.4.2.3.1 Événements hydrologiques extrêmes (crues)

Turcotte et ses collaborateurs décrivent les principales crues en eau libre des dernières années au Canada (sud du Québec en 2011, Calgary et Toronto en 2013, ouest du Québec en 2017 et en 2019, ainsi que sud du nouveau-Brunswick en 2018 et 2019) comme des événements qui pourraient être causés par les changements climatiques, ou qui, du moins, reflètent à quoi pourrait ressembler l'avenir des crues au Canada [87].

À l'échelle internationale, les changements climatiques ont fait l'objet d'une discussion dans le bulletin 170 de la CIGB sur l'évaluation des crues et la sécurité des barrages [83]. Les principales répercussions attendues des changements climatiques mentionnées dans le bulletin sont une augmentation de l'incertitude associée aux estimations liées aux crues extrêmes.

Une des principales préoccupations en matière de sécurité des barrages d'eau canadiens est leur capacité à gérer les crues extrêmes. L'augmentation prévue de l'ampleur et de la fréquence des tempêtes extrêmes dans plusieurs régions canadiennes pourrait rendre certains barrages plus vulnérables aux ruptures [101], bien que cela dépende de nombreux facteurs. Les crues intenses pourraient donner lieu à des débordements et à des ruptures des remblais, ainsi qu'à des dommages structuraux [7] [101]. Les crues extrêmes sont particulièrement préoccupantes en ce qui a trait aux barrages vieillissants et en détérioration, comme on l'a vu à plusieurs reprises aux États-Unis, y compris la rupture en 2020 du barrage d'Edenville, qui avait été jugé comme étant en condition insatisfaisante [102] [103] [104]. Selon une étude menée sur deux barrages de Toronto, bien que les barrages sont capables de résister aux changements des débits élevés, une augmentation de la fréquence ou de l'ampleur des débits extrêmement élevés causés par des ouragans ou des orages soutenus pourrait avoir des répercussions importantes sur les barrages et devrait être envisagée lorsque des conseils scientifiques et politiques appropriés sont accessibles [96].

Les lignes directrices pour la cartographie des crues en Colombie-Britannique englobent les répercussions des changements climatiques à prendre en compte lors de l'exécution d'études de cartographie des crues pour les barrages. Elles sont les suivantes :

- Une décharge maximale accrue pour une probabilité annuelle donnée de dépassement causée par des événements hydrologiques extrêmes et un taux de fonte des neiges extrêmes;

- Une augmentation des feux de forêt et de phénomènes d'infestation par les insectes qui altèrent le paysage et qui mènent à des crues de plus grande fréquence et de plus grande ampleur; et
- Une combinaison de l'élévation du niveau de la mer et d'ondes de tempête plus élevées qui augmentent les crues et l'érosion dans les zones côtières à faible altitude [105].

3.4.2.3.2 Considérations relatives à l'hiver et à la glace

Les tendances climatiques pour la plupart des villes canadiennes évoluent vers des hivers plus chauds et une possibilité accrue de dégels et de précipitations sous forme de pluie en hiver [106] [39]. Ces conditions météorologiques pourraient entraîner une augmentation des débits élevés de la saison hivernale qui pourraient causer au milieu de l'hiver des débâcles dynamiques dans les endroits où le couvert de glace restera épais et résistant (soit dans les régions du nord ou sur un horizon temporel plus court) [106]. De nombreux sites susceptibles aux débâcles dynamiques en milieu d'hiver pouvant mener à des embâcles glaciaires et à des crues présentant un niveau élevé de conséquences pourraient voir survenir un plus grand nombre de ces événements. Parmi les récents exemples de crues hivernales induites par la glace, on compte deux rivières de la ville de Québec le 25 décembre 2020 et les quatre rivières de la ville de Québec à la mi-janvier 2018. Les deux événements ont coûté extrêmement cher en réparation des dommages [107].

Turcotte et ses collaborateurs soulignent le manque de connaissances sur les embâcles glaciaires et les crues hivernales dans le cadre de leurs recherches sur l'impact des changements climatiques sur les crues causées par la glace [87]. Les constatations démontrent qu'il existe une grande variabilité régionale sur le plan des processus liés à la glace, selon les tendances climatiques qui régissent la région (p. ex., élévation, latitude, longitude). Il semble que l'analyse statistique propre au site des tendances historiques du niveau d'eau en présence de modèles de glace et d'hydrodynamique de glace [85] figure parmi les méthodes les plus précises pour comprendre l'impact local des changements climatiques et les répercussions sur les activités hivernales.

Le bris du barrage Spencer en 2019 a démontré que les débâcles dynamiques de glace, les embâcles glaciaires et les dérives de glace sont des préoccupations directes liées à la sécurité des barrages. Le rapport publié par l'Association of State Dam Safety Officials (ASDSO) indique que les conditions météorologiques entourant les dérives de glace qui ont entraîné la défaillance du barrage étaient un hiver froid (glace épaisse et couverture neigeuse) suivi d'une tempête d'hiver avec des températures au-dessus du point de congélation et des précipitations (crue et débâcle dynamique de glace) [94]. L'onde de crue a fait que plusieurs bourrages se fracassent en amont du barrage. Les banquises obstruaient les vannes ouvertes et le déversoir, causant une hausse du niveau d'eau dans le réservoir jusqu'au sommet de la digue (c.-à-d., le remblai). Le débordement de l'eau et de la glace a causé l'érosion de la face en aval du barrage [94], ce qui a mené à sa rupture. Certains des facteurs qui ont mené à ces conséquences étaient la petite taille du réservoir, la capacité d'évacuation insuffisante et les restrictions en amont de la rivière par deux ponts [94]. Parmi les 380 ruptures de barrage enregistrées dans la base de données de l'ASDSO, il s'agissait du deuxième événement attribué à la dynamique de la glace [94].

Bien que peu de ruptures historiques des barrages soient liées aux dérives de glace aux États-Unis, le climat plus froid des provinces canadiennes rend les embâcles glaciaires plus courants, et ces événements pourraient augmenter en présence de changements climatiques. Morse et Turcotte ont tenté d'examiner les tendances climatiques de l'hiver 2040-2070 pour le Canada et de déterminer leur effet sur les embâcles glaciaires [108] [106]. Les observations générales provenant de la documentation et des modèles climatiques laissent penser que l'augmentation de la température devrait raccourcir la période hivernale pour les rivières (entre la formation du couvert de glace et la débâcle printanière) et l'épaisseur de la glace. Toutefois, les rivières canadiennes ne seront pas toutes soumises à la même hausse de température d'air. Dans les régions où les températures demeurent suffisamment froides pour produire un couvert de glace, les débâcles dynamiques hivernales pourraient devenir de plus en plus fréquentes et intenses en raison de la variation accrue de la température et des précipitations. C'est aussi le cas pour les provinces de l'Atlantique et les régions boréales. Les tendances régionales pour le Québec indiquées dans ce rapport sont une diminution des crues liées à la glace dans le bassin hydrographique du sud du Québec (manque de glace), une augmentation des crues hivernales (et des

débâcles dynamiques) compensée par un hiver plus court et des couverts de glace plus minces dans les régions du centre, et une augmentation de la fréquence et de l'intensité des crues hivernales (et des crues liées à la glace) dans les régions du nord.

3.4.2.3.3 Érosion côtière

Alors que l'augmentation du niveau de la mer et son impact sur l'érosion côtière n'ont pas été considérés dans la documentation disponible comme une préoccupation majeure pour la sécurité et l'entretien des barrages [98] [82], on a mentionné que l'infrastructure côtière, probablement y compris les barrages, pourrait être exposée à une érosion accrue des rivages [92].

3.4.2.3.4 Stabilité des barrages de la région du nord

Le dégel du pergélisol est un effet connu des changements climatiques qui touche les régions du nord [109]. L'impact du dégel du pergélisol sur la stabilité des barrages a été reconnu sans être abordé dans le bulletin 169 de la CIGB sur les changements climatiques [82] et est mentionné dans les lignes directrices de l'ACB [110]. Il semble que bien que ce problème ait été traité dans les codes et les normes d'autres types d'infrastructures (p. ex., la norme CAN/BNQ 2501-500 *Études géotechniques pour les fondations de bâtiments construits dans les zones de pergélisol* [111]), il y a peu de documentation propre aux barrages. Aucune mesure propre à l'atténuation des risques visant à réduire les risques ou les dommages causés aux barrages par le dégel du pergélisol n'a été identifiée.

3.4.2.3.5 Intégrité structurale

Bien que la plupart des barrages soient robustes et que leur structure puisse gérer une augmentation de l'ampleur ou de la fréquence des événements extrêmes sous leurs seuils de conception [112] [96], l'intégrité structurale des barrages pourrait être compromise par un changement dans les charges hydrologiques extrêmes, les impacts des débris [82], les poussées d'embâcles glaciaires ou les événements d'ondes. Les modifications potentielles de la charge de conception ne sont pas abordées de façon significative dans les publications. Les niveaux de fonctionnement des réservoirs et les contraintes sur le barrage qui en découlent pourraient également changer en raison du changement des précipitations et de l'hydrologie du bassin versant [82].

Les sécheresses sont susceptibles d'affecter la force du sol et de causer une érosion ou un affaissement, ce qui pourrait avoir une incidence sur les barrages de terre [103]. Les barrages remblayés sont également vulnérables à l'érosion causée par des fluctuations extrêmes des niveaux d'eau et des changements dans la végétation [113]. Les taux de dilatation et de contraction des matériaux de la fondation et des composants des barrages pourraient être touchés par la fréquence accrue des cycles de gel-dégel en raison des changements climatiques [100]. Dans le cas des barrages de béton, les réactions silico-alcalines (parfois décrites comme des réactions alcalis-agrégats) pourraient augmenter avec la température. Ces réactions induisent l'expansion et le fendillement dans le béton, et pourraient avoir des répercussions graves sur la sécurité et le fonctionnement des barrages-poids en béton existants, et particulièrement sur les sections de déversement. [114]. Les publications n'ont pas décrit ce qui est fait pour tenir compte des répercussions des changements climatiques sur ces problèmes, ni dans quelle mesure ils sont bien compris dans l'industrie du barrage.

3.5 Normes, lignes directrices et meilleures pratiques en matière d'adaptation

3.5.1 Lignes directrices internationales sur la gestion des ressources en eau et l'adaptation au climat

Dans le bulletin de 169 de la CIGB, Global Climate Change, Dams, Reservoirs and Related Water Resources, trois recommandations ont été fournies aux propriétaires de barrages et à l'industrie :

1. Adopter une approche de système intégral;
2. Appliquer un processus de gestion adaptative; et
3. Collaborer avec un large éventail de disciplines, d'intérêts et de parties prenantes [82].

Le document brosse un portrait des risques généralisés et des vulnérabilités des barrages. Le chapitre 9 du bulletin fournit des principes et des mesures d'adaptation et présente six études de cas à l'échelle mondiale, reconnaissant que les mesures d'adaptation varient d'une région à l'autre. L'accent est mis sur la souplesse des infrastructures à évoluer avec les tendances climatiques (p. ex., augmentation

de la capacité des réservoirs et des décharges) et les mesures d'adaptation fonctionnelles (p. ex., prévisions hydrologiques, amélioration de l'exploitation et des politiques pour refléter une gestion intégrée des bassins hydrographiques). Ce bulletin constitue un point de départ utile et fournit des connaissances de base pour les praticiens du barrage au Canada, mais ne fournit pas suffisamment de directives précises pour éclairer l'ensemble du processus d'évaluation et d'adaptation des risques liés au climat.

L'International Hydropower Association (IHA) a publié le *Climate Resilience Guide for the Hydropower Sector* destiné à guider tous les types de projets d'hydroélectricité [93]. Le guide présente une méthodologie générale composée de six phases et de nombreuses étapes pour le dépistage des risques climatiques, l'analyse des données, les tests de contrainte climatique, la gestion des risques liés au climat et la surveillance, l'évaluation et la production de rapports. Un aperçu de l'hydrologie est abordé dans ce document, y compris la modélisation, l'analyse de la fréquence des crues et la CMP. L'approche pratique présentée vise à traiter tous les projets d'hydroélectricité, indépendamment de la taille et de l'emplacement.

Climate Risk Informed Decision Analysis (CRIDA), un rapport publié par l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO), traite de la planification collaborative des ressources en eau en vue d'un avenir incertain [115]. Ce document complète les normes nationales et internationales existantes en s'attaquant aux incertitudes, y compris les changements climatiques, liées à la gestion des ressources en eau. Le rapport propose une méthodologie de prise de décision éclairée par le risque qui comprend l'évaluation et la gestion du risque, mais aussi la communication des risques aux parties prenantes. Ce document n'est pas propre aux propriétaires de barrages, mais il contient quelques mentions propres aux barrages, y compris une étude de cas et des exemples de risques.

Climate Impacts on Energy Systems – Key issues for energy sector adaptation, un livre publié par la Banque mondiale, traite des répercussions des changements climatiques sur le secteur de l'énergie et présente différents efforts et outils politiques pour appuyer les décideurs en matière d'adaptation [116]. Parmi d'autres suggestions, les auteurs présentent un processus de gestion des risques liés au climat pour guider la prise de décision et la décentralisation de la production d'hydroélectricité (c.-à-d. petits barrages plus rapprochés de la demande). La Banque asiatique de développement (2012) souligne que bien qu'il existe de vastes intentions politiques de commencer à intégrer les considérations relatives aux changements climatiques en Asie et dans la région du Pacifique, il existe peu de détails sur les méthodes et les approches d'évaluation des risques et d'élaboration de plans d'action pratiques [112].

Le ministère de l'environnement, de l'alimentation et des affaires rurales du Royaume-Uni a élaboré des lignes directrices sur l'incidence des changements climatiques sur les barrages et réservoirs [113]. Les risques propres à son secteur géographique et à ses actifs sont déterminés et quantifiés, et des conseils sont fournis pour les atténuer.

3.5.2 Lignes directrices des États-Unis sur la gestion des ressources en eau et l'adaptation au climat

La gestion des ressources en eau dans le contexte des changements climatiques est un problème abordé aux États-Unis par plusieurs organismes fédéraux [117]. Un rapport, publié en 2009 par le U.S. Geological Survey (USGS), a établi les liens entre les changements climatiques et la gestion des ressources en eau [91]. Voici certains des points clés soulignés dans ce rapport :

- Un besoin de surveillance à long terme du climat et de l'hydrologie à grande échelle et à des endroits précis (p. ex., près d'un important barrage);
- L'utilisation de la modélisation stochastique et des données paléoclimatiques pour tenir compte de la variabilité climatique dans le plan de gestion de l'eau à long terme comme complément aux données historiques;
- L'utilisation de techniques de gestion adaptatives (les décisions sont prises de façon séquentielle au fil du temps) dans la prise de décision afin d'améliorer la souplesse;
- L'adaptation des infrastructures et de l'exploitation du barrage pour les changements climatiques; et
- L'augmentation des activités de recherche et de surveillance pour combler les lacunes en matière de connaissances et limiter les incertitudes en matière de planification.

En réponse à ce rapport, le Climate Change and Water Working Group (CCAWWG) a été créé. Il regroupe plusieurs organismes fédéraux, y compris l'U.S. Army Corps of Engineers (USACE), le Bureau of Reclamation (USBR), l'U.S. Department of the Interior (DOI), et la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Le groupe de travail a produit deux rapports sur les besoins et les lacunes de l'information climatique afin de guider les stratégies, la planification, la prise de décision et les politiques à court et à long terme [118] [119].

Aux États-Unis, les ruptures de barrages et de digues à niveau de conséquence élevé ont incité la Federal Emergency Management Agency (FEMA) à demander à l'US National Research Council (NRC) de réunir un groupe d'experts pour discuter de la résilience communautaire liée à la sécurité des barrages et des digues [120]. Bien qu'il ne recommande pas de politiques directement, le rapport a traité des méthodes d'évaluation et de mise en œuvre de considérations de résilience communautaire dans le cadre d'un programme de protection des barrages ou des digues. Le rapport a fourni plusieurs conclusions sur les sujets de la sécurité et de la résilience des barrages au Canada face aux changements climatiques ainsi qu'à d'autres risques. Il réclame une plus grande attention à l'analyse des systèmes entre les infrastructures, les bassins hydrographiques et la collectivité, la mise en disponibilité au grand public de la cartographie des crues découlant de ruptures de barrages, des plans d'action d'urgence et d'information sur les risques en vue d'appuyer la planification de la résilience communautaire, et il souligne la nécessité de recourir à des approches collaboratives de gestion des risques qui incluent tous les parties prenantes dans une communauté de barrage, y compris les professionnels du barrage et des digues, ainsi que les personnes ou entités exposées aux conséquences directes et indirectes d'une rupture de barrage. Ce rapport a également présenté un outil pour évaluer le niveau de maturité de l'engagement communautaire dans un plan de la sécurité du barrage ou de la digue en tenant compte de sujets comme les examens de la sécurité des barrages, les plans d'action d'urgence, la gestion des plaines inondables, le degré d'engagement communautaire dans chacun de ces plans et dans les évaluations qualitatives des risques. Cet outil pourrait s'appliquer au contexte canadien, et un système d'évaluation semblable pourrait être utilisé pour évaluer la maturité des considérations relatives aux changements climatiques dans la gestion du système de gestion des barrages.

3.5.3 Changements climatiques dans les codes et lignes directrices au Canada

La section suivante présente une liste non exhaustive d'exemples de la façon dont les changements climatiques sont considérés pour les structures hydrauliques en général.

Le Code canadien sur le calcul des ponts routiers [110] est utilisé pour la conception de toutes les structures hydrauliques et pourrait être utilisé pour la conception des barrages. Les changements climatiques sont mentionnés à plusieurs reprises dans le document, notamment au chapitre 2, Durabilité et développement durable, où il est énoncé que « la conception doit inclure des considérations pour l'adaptation aux changements climatiques locaux et aux impacts prévus ». Le chapitre 6, Fondations et systèmes géotechniques, mentionne la nécessité d'un chapitre sur les élévations des eaux souterraines, y compris les fluctuations prévues attribuables aux changements climatiques. Un examen des changements climatiques au cours de la sélection des sites fait également partie de la sous-section sur la conception du pergélisol du chapitre 6. Un examen des répercussions des changements climatiques sur les conditions du pergélisol au cours de la durée de vie de la structure devrait être inclus dans le rapport géotechnique. Enfin, le chapitre 15, Réfection et réparations, mentionne la nécessité de tenir compte des répercussions des changements climatiques dans la réfection des ponts. Fait intéressant, les changements climatiques n'ont pas été mentionnés au chapitre 3, Charges, qui mentionne les charges des ondes, du vent et de la glace. Ces exigences n'étaient pas accompagnées de directives précises sur la mesure dans laquelle les changements climatiques doivent être pris en considération, le RCP qui devrait être utilisé ou d'autres détails qui auraient été nécessaires pour l'adoption simplifiée des considérations relatives aux changements climatiques dans l'industrie de la conception des autoroutes et des ponts.

Le guide de la norme nationale du Canada Études géotechniques pour les fondations de bâtiments construits dans les zones de pergélisol comprend une mention précisant d'inclure les changements climatiques dans les projets à risque plus élevé, ainsi qu'une ligne directrice complète sur l'utilisation des projections climatiques [111].



« Les lignes directrices canadiennes pour la cartographie des plaines inondables incluent des considérations pour le changement climatique et des études de cas sur le changement climatique. »

Les changements climatiques sont également pris en compte dans les normes d'ingénierie du ministère du Transport du Québec. Le Tome III – Ouvrages d'art [121] regroupe toutes les normes du ministère des Transports du Québec relatives à la conception des ponts et des ponceaux. Dans le chapitre deux, le document décrit la façon dont les changements climatiques devraient être pris en compte lors du calcul du débit de conception des ponts et des ponceaux. Pour les bassins hydrographiques de moins de 60 km^2, le débit devrait être augmenté entre 18 % et 20 %, selon l'emplacement au Québec. Les débits calculés pour les bassins hydrographiques se situant entre 60 km^2 et 400 km^2 devraient être augmentés de 15 %. Enfin, pour les grands bassins de 400 km^2 et plus, le débit devrait être augmenté de 0 % à 15 % selon la latitude générale du bassin (les emplacements entourant Montréal, au sud, ne nécessitant aucune augmentation du débit).

Les lignes directrices canadiennes pour la cartographie des plaines inondables incluent des considérations pour les changements climatiques et des études de cas sur les changements climatiques [122] [123]. Le document *Procédures hydrologiques et hydrauliques fédérales pour la délimitation des zones inondables* fournit des conseils sur la façon de traiter et de modéliser des processus non fixes comme les changements climatiques, ainsi que de la documentation sur l'intégration des projections climatiques sur l'hydrologie et l'élévation du niveau de la mer. L'incertitude découlant des changements climatiques est reconnue et plusieurs suggestions sont faites pour y remédier (p. ex., analyses de sensibilité, approches fondées sur le risque, facteurs de sécurité) [122]. Les études de cas présentées dans le document *Études de cas sur les changements climatiques dans la cartographie des plaines inondables* de RNCan sont utiles pour comprendre l'application directe des outils (p. ex., des logiciels comme HEC-RAS et HEC-HMS) et des méthodes (p. ex., courbes de l'IDF tenant compte des changements climatiques ou représentant une gamme de scénarios sur une carte) [123]. EGBC a deux rapports présentant des lignes directrices sur la cartographie des inondations qui comprennent des considérations liées aux changements climatiques : *Flood Mapping in BC* [105] et *Professional Practice Guidelines – Legislated Flood Assessments in a Changing Climate in BC* [124]. Ce dernier rapport suggère une méthodologie pour estimer les crues futures en fonction de la présence ou de l'absence de tendances historiques sur le plan du climat. Si aucune tendance n'est constatée, le guide suggère un ajustement à la hausse de 10 % du débit de conception. Si une tendance est reconnue, le guide suggère un ajustement à l'ampleur et à la fréquence des crues en lien avec le changement prévu du ruissellement pendant le cycle de vie ou une augmentation de 20 % dans les cas de petits bassins pour lesquels on connaît trop peu d'information sur les ruissellements.

En mars 2021, EGBC a élaboré son Climate Change Action Plan afin de guider et d'encourager ses participants inscrits à envisager les changements climatiques dans leur pratique [125]. Plusieurs mesures

sont abordées, notamment l'objectif de fournir des conseils pratiques sous forme de lignes directrices et d'avis sur l'adaptation aux changements climatiques fondés sur les commentaires des participants et des parties prenantes. EGBC est possiblement en avance, par rapport aux autres provinces, en offrant à ses participants inscrits des lignes directrices de pratique professionnelle qui tiennent compte des changements climatiques, avec des documents comme *Developing Climate Change-Resilient Designs for Highway Infrastructure in British Columbia* [126]. Ce document comprend la prise en considération du dimensionnement hydraulique des structures comme les ponts et les ponceaux, l'analyse hydrotechnique des ponts et des digues, ainsi que des paramètres hydroclimatiques connexes comme la fonte des neiges et la pluie. D'autre part, les répercussions des changements climatiques ne sont pas prises en compte dans les lignes directrices de pratique professionnelle *Legislated Dam Safety Reviews in BC* [11].

3.5.4 Politiques canadiennes

L'International Institute of Sustainable Development (IISD) propose l'ADAPTool pour l'analyse des politiques sur le plan de l'adaptation climatique [127]. Une évaluation du Saskatchewan's Water Security Plan (WSP) a démontré que les politiques étaient en mesure de répondre à plusieurs besoins d'adaptation liés à la sécurité des barrages, alors que d'autres besoins d'adaptation ne pouvaient pas être appuyés par des politiques. Une liste de toutes les vulnérabilités des barrages (miniers, de contrôle des crues et hydroélectriques) est présentée, ainsi que des solutions adaptatives et la mesure selon laquelle les politiques du WSP y répondent.

3.5.5 Déterminer les tendances climatiques régionales et les méthodologies d'évaluation des risques

On retrouve dans *Les principaux risques des changements climatiques pour le Canada* une description générale des tendances et des risques climatiques projetés au Canada [109], mais elle ne porte pas particulièrement sur les barrages. Une analyse locale des tendances climatiques et des risques devrait être effectuée au début des nouveaux projets, comme cela a été fait au Tadjikistan et en République kirghize en 2009, même si les résultats de cette évaluation n'ont, en fin de compte, eu aucune incidence sur la conception [112]. Dans le bulletin 169 de la CIGB sur les changements climatiques, la méthode du GIEC pour l'analyse de l'impact régional est recommandée [82].

Le protocole du Comité sur la vulnérabilité de l'ingénierie des infrastructures publiques (CVIIP) constitue une autre méthode utilisée au Canada. Le CVIIP a été co-fondé par Ingénieurs Canada et Ressources naturelles Canada (RNCan) en 2005. L'objectif du CVIIP est d'évaluer la vulnérabilité de l'infrastructure canadienne aux impacts des changements climatiques. Le comité a publié un protocole, offert sur demande, pour guider l'évaluation de la résilience face aux changements climatiques des infrastructures existantes. Ce protocole a été utilisé pour deux barrages de la Toronto and Region Conservation Authority [96]. Le protocole est une approche fondée sur les risques en cinq étapes, y compris une évaluation des risques des interactions entre l'infrastructure et le climat, et une analyse technique des vulnérabilités cernées [86].

Bien que les changements climatiques ne soient pas mentionnés directement dans les lignes directrices de l'ACB, le chapitre 6 présente une nouvelle approche pour la sécurité des barrages, fondée sur les probabilités, qui pourrait tenir compte des incertitudes climatiques [7]. Cette section des lignes directrices de l'ACB a été améliorée dans l'édition 2013 du document. L'analyse déterministe traditionnelle fondée sur des normes est l'une des étapes de l'approche axée sur le risque. Les problèmes liés à l'approche axée sur le risque comprennent les défis actuels dans la caractérisation des dangers, le rendement du système de barrage et les conséquences. L'approche traditionnelle basée sur les normes partage non seulement ces difficultés, mais elle comporte aussi plusieurs limites supplémentaires, notamment une attention particulière aux risques naturels extrêmes dans l'isolation, ce qui pourrait mener à la mise en œuvre préférentielle de solutions moins efficaces.

D'autres méthodes d'évaluation des risques sont présentées dans des lignes directrices internationales, notamment les rapports de l'IHA et de l'UNESCO présentés à la section 3.5.1.

3.5.6 Estimation des répercussions climatiques sur les crues de projet

Il n'existe pas de méthode unique approuvée, validée et utilisée au Canada pour tenir compte des changements climatiques lors de l'évaluation des crues de projet pour les barrages [80]. Les directives actuelles dans les provinces pour le calcul de l'IDF ne tiennent pas compte des changements climatiques; par conséquent, les ingénieurs qui effectuent ces calculs n'ont pas de directives ni de méthodes uniformes pour réaliser ces résultats.

Le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques a élaboré un outil Web nommé *Atlas hydroclimatique du Québec méridional*, qui montre l'ampleur et la direction du changement dans les débits saisonniers élevés et faibles de 1 500 segments fluviaux de la province [128]. Cet outil n'a pas été conçu expressément pour la conception des barrages et ne tient pas compte des crues d'une période de récurrence de plus de 20 ans. Cependant, il constitue un bon exemple de la façon dont les provinces pourraient contribuer à l'estimation des crues en tenant compte des changements climatiques.

Ouranos a produit deux documents importants qui traitent de ce problème et qui portent de façon particulière sur les barrages. Le premier date de 2015 et porte sur les crues maximales probables (CMP) [79], et le plus récent a été publié en 2021, sur le thème de l'analyse de la fréquence des crues [80]. Un paramètre souvent utilisé pour déterminer la capacité hydraulique des barrages est la CMP, la plus grande crue qui pourrait raisonnablement se produire à un endroit particulier [7]. Ouranos a suggéré une nouvelle méthode qui intègre les changements climatiques (en examinant un horizon temporel de 2050) pour calculer la CMP d'un bassin hydrographique [79]. La méthode a été appliquée à cinq bassins dans les provinces du Québec, de l'Ontario et du Manitoba.

Dans cette étude, il a été démontré que la CMP se produit lorsque la précipitation maximale probable (PMP) au printemps coïncidait avec la fonte à récurrence centenaire de la couverture neigeuse. On s'attend à ce que la récurrence de la PMP augmente, ce qui entraînera une augmentation des occurrences de la CMP. L'ampleur de la PMP et de la couverture neigeuse pouvait augmenter ou diminuer selon l'emplacement géographique, mais il n'était pas rare qu'une augmentation de la PMP soit compensée par une diminution de la couverture neigeuse (surtout dans les bassins les plus au sud). En général, il est attendu que le dégel printanier pour l'horizon temporel de 2050 dans les régions étudiées se situe entre 5,5 et 9 jours plus tôt, et on s'attend à ce que la CMP varie entre -0,8 % et 20 % pour l'horizon temporel de 2050. Ouranos a également travaillé à l'élaboration de méthodologies d'estimation de l'impact des changements climatiques sur la fréquence des crues. Les résultats comprenaient des cartes de l'évolution prévue d'une crue millénaire et d'une crue décamillennale sur 533 bassins au Canada entre les périodes de 1990 à 2010 et de 2080 à 2100 [80]. Ces cartes visent à être accessibles au public en ligne, en format GIS, pour être utilisées comme outil ou comme référence, mais ne remplacent pas les analyses in situ et ne couvrent pas tous les bassins hydrographiques au Canada.

L'intérêt international à l'égard de l'incidence de la variabilité climatique et des changements à la PMP est évident, comme le montre l'examen à la fine pointe sur le sujet par Salas et ses collaborateurs [129]. Les méthodes présentées sont soit fondées sur l'hydrométéorologie, soit fondées sur des statistiques. Un chapitre de ce document décrit les lignes directrices propres au Canada en ce qui concerne la PMP et les changements climatiques, qui prédisent une augmentation de la PMP. Dans une publication de 2020, l'American Society of Civil Engineers (ASCE) présente plusieurs approches pour calculer la PMP en ce qui concerne les changements climatiques [129]. Le bulletin 170 de la CIGB sur l'évaluation des crues et la sécurité des barrages ne présente pas de méthode prescrite pour intégrer les changements climatiques aux évaluations des crues [83]. Les principaux points à retenir de cette publication sont que les changements climatiques peuvent augmenter l'incertitude et la variabilité des crues extrêmes, d'une manière qui sera difficile à quantifier. Bien que l'estimation des changements dans les précipitations et de la couverture neigeuse soit complexe, une fois que ces changements sont connus, il pourrait être simple de mettre à jour la modélisation hydrologique. Ce processus pourrait toutefois s'avérer coûteux si des modèles n'existent pas déjà.

3.5.7 Contrôle des crues

Le rôle des barrages dans l'atténuation des risques de crue est abordé dans l'optique des changements climatiques dans le bulletin de la CIGB *Challenges and Needs for Dams in the 21 st Century* [130]. Le

rapport mentionne le rôle crucial des barrages actuels dans la défense contre les crues en entreposant les ruissellements d'eaux de surface. Plus récemment, la CIGB a formé un comité sur les digues et les défenses contre les crues. L'ACB n'a pas de tel comité.

3.5.8 Production d'hydroélectricité

Les documents analysés contiennent différents exemples d'adaptation pour la production d'énergie hydroélectrique, mais celle-ci exige de l'information digne de confiance et une certitude quant aux changements à venir. Une étude de 2009 sur ce sujet a présenté une méthodologie qui a utilisé des scénarios de projection des changements climatiques dans un modèle d'optimisation des profits pour adapter les règles de fonctionnement d'un système hydraulique [99]. En optimisant la gestion, le modélisateur a pu réaliser une augmentation des profits d'énergie hydroélectrique à partir de l'année 2030. Un autre exemple de la Landsvirkjun, l'entreprise productrice d'électricité de l'État islandais, mentionnée à la section 3.4.2.2.5, est remarquable : non seulement les opérations ont été adaptées pour accroître la génération, mais la capacité de conception des usines futures tient compte de l'augmentation prévue des ruissellements [97]. L'impact des changements de l'hydrologie sur la production d'énergie et la prestation d'énergie des centrales hydroélectriques et l'effet qu'ils ont sur les revenus sont explorés dans l'ouvrage d'Ouranos, *Valeur des actifs hydroélectriques et impacts physiques du changement climatique : Guide sur l'intégration des données climatiques dans la production d'énergie aux fins de modélisation de la valeur* [100]. Ce travail est une référence utile pour les propriétaires de barrages hydroélectriques.

Les estacades à glace pourraient également prendre de l'importance pour la production d'hydroélectricité tout au long de l'hiver. Sept estacades de glace ont été utilisées dans le canal Beauharnois pour faciliter la formation d'un couvert de glace et assurer la production d'un barrage hydroélectrique en aval [131]. Les estacades de glace sont également utilisées sur le fleuve Saint-Laurent [132] et le Niagara.

3.6 Limites de l'analyse documentaire

Cette analyse documentaire incluait peu de normes internationales, mais se penchait principalement sur l'information la plus pertinente sur l'adaptation aux changements climatiques pour les barrages au Canada, et, par conséquent, présentait certaines limites et lacunes. Il y avait un manque de données disponibles ou dignes de confiance pour certaines incidences propres aux barrages découlant des changements climatiques. Par exemple, un lien quantifiable entre les impacts de la glace dans les rivières du Canada et les changements climatiques n'a pas été renforcé par des observations. Il y avait peu de publications sur les répercussions directes des changements climatiques sur la phase de construction des barrages. Dans certains cas, l'accès aux documents était limité ou absent, particulièrement pour l'accès aux documents internes des organisations fédérales ou privées. D'autres sujets qui pourraient se prêter à une discussion plus générale sur les changements climatiques, mais qui étaient trop précis ou trop limités pour être inclus dans cette portée comprennent les répercussions des changements climatiques sur la qualité de l'eau, les répercussions thermiques sur les barrages en béton, la surveillance du rendement structurel dans les climats futurs, les répercussions climatiques sur les fondations des barrages et le suintement, et les répercussions combinées ou indirectes sur les barrages. Les répercussions indirectes, comme l'effet d'un climat changeant sur l'écologie (p. ex., les algues) dans un système de barrage, et les répercussions des débits minimaux sur les espèces de poissons, étaient hors de portée, comme l'étaient les résidus et les barrages miniers.

4 Engagement des parties prenantes

En fonction des discussions qui se sont déroulées dans le cadre des entrevues avec les parties prenantes et de l'atelier, les résultats de l'engagement des parties prenantes ont été regroupés en quatre grandes sections : 1) les principaux risques climatiques identifiés; 2) les initiatives d'adaptation au climat; 3) les obstacles à l'adaptation; 4) le besoin de conseils d'adaptation au climat. Les entrevues avaient pour but de recueillir de l'information sur les risques liés aux changements climatiques pour les barrages, les mesures d'adaptation et les obstacles à l'action. Les discussions au cours de l'atelier ont validé les résultats préliminaires de cette recherche, approfondi des sujets clés, comblé les lacunes dans la recherche

et cerné de nouvelles considérations qui n'avaient pas été examinées ou qui n'avaient pas fait l'objet de discussions. Cette section regroupe les résultats obtenus dans le cadre des entrevues et de l'atelier.

4.1 Principaux risques climatiques

La plupart des experts interrogés ont convenu qu'il y avait un manque de connaissances et de données sur les risques des changements climatiques pour les barrages et une évaluation de la vulnérabilité a été définie comme une première étape du processus de résilience et d'adaptation.

Plusieurs risques liés au climat ont été dégagés par les participants comme pouvant être préoccupants, dont certains étaient connus de la plupart des propriétaires de barrages interrogés partout au pays. Les événements hydrologiques extrêmes et le contrôle des crues ont été définis comme la principale préoccupation d'un vaste nombre de propriétaires de barrages privés et publics, surtout si des barrages au fil de l'eau faisaient partie de leurs actifs. Les défis d'exploitation provoqués par les tendances climatiques et ayant mené à des changements dans les activités habituelles ont également été mentionnés. Il peut s'agir de changements du moment des crues ou de crues à sommets plus élevés, de combinaisons de neige et de pluie, de débits saisonniers élevés plus fréquents, y compris en hiver, d'étés plus secs et de l'absence de couvert de glace menant à la production de frasil. Ces changements des exigences imposées au système de barrages pourraient nécessiter une modification des courbes d'exploitation, qui pourraient être difficiles à modifier en raison des nombreuses parties prenantes concernées, ainsi que de l'exigence d'examen et d'approbation réglementaires. En été, il peut être plus difficile de respecter les exigences minimales en matière de débit pour les barrages qui dépendent des crues naturelles. Les activités plus fréquentes imposent également une contrainte aux composants mécaniques et électriques qui n'avaient possiblement pas été pris en compte dans la conception. Lorsqu'il y a plus d'activités en hiver, le givrage et le froid sont susceptibles d'avoir une incidence sur l'équipement et ses fonctionnalités.

Les parties prenantes ont exprimé leur inquiétude quant au fait que les changements climatiques pourraient exacerber les défaillances d'entretien et d'exploitation avant même de présenter des conditions aptes à surpasser la conception des barrages. Les grands barrages sont conçus pour les conditions extrêmes (p. ex., les événements de précipitation qui surviennent une fois tous les 10 000 ans), et certaines parties prenantes avaient l'impression que les répercussions des changements climatiques dans la durée de vie prévue de ces barrages seraient minimes. D'autres pensaient qu'il n'y avait pas assez d'information, ou que l'information disponible manquait de précision, de qualité ou d'exhaustivité, pour écarter le risque que les changements climatiques présentent aux conceptions de barrage. Les risques pour les petits barrages qui peuvent être conçus en fonction d'événements de précipitations et de crue à période de retour moins longue, par exemple une survenance sur 100 ans, ont également été abordés. Certaines parties prenantes ont indiqué que ces événements sont de plus en plus fréquents, et que, par conséquent, il pourrait être nécessaire de revoir les événements de crue sur 100 ans pour éviter que les barrages soient éventuellement dépassés.

Les autres risques liés au climat qui pourraient avoir des répercussions sur les barrages au Canada incluent les changements de température qui ont des répercussions sur l'exploitation. Certains propriétaires de barrages ont constaté une augmentation de la température dans les centrales électriques, ce qui est susceptible d'avoir une incidence sur le confort des travailleurs, la sécurité et les tolérances de l'équipement et qui mène à des mises à niveau requises du système de CVC. Un problème potentiel pour la sécurité publique au Canada est l'impact de la variabilité climatique sur les ressauts hydrauliques en aval des écluses à hauteur de chute faible, sur les barrages qui doivent être utilisés plus fréquemment ou sur les barrages commandés à distance. On a aussi constaté une inquiétude à l'effet que si survenait la rupture importante d'un barrage causée par les changements climatiques, l'ensemble de l'industrie du barrage pourrait affronter des risques d'atteinte à sa réputation. Tout comme les autres grandes industries (p. ex., celle du nucléaire), un seul « maillon faible » dans l'industrie pourrait perturber la confiance du public et du gouvernement en ce qui a trait à la conception et à l'exploitation des barrages.

Certains risques climatiques importants étaient propres à certains territoires, y compris les feux de forêt dans l'ouest du Canada. Le changement de paysage, les répercussions sur les crues et la gestion des débris après les feux de forêt posent un risque aux barrages. De même, la dégradation du pergélisol et la stabilité du sol dans les régions du nord ont été définies comme des problèmes structurels par les chercheurs interrogés. On a supposé que le fait que le pergélisol demeure gelé est une constante nécessaire pour la stabilité de certains barrages, ce qui pourrait ne pas être le cas face à une hausse de la température. L'accès aux barrages pour l'entretien dans les régions du nord était également un enjeu; certains barrages ne sont accessibles que par les routes de glace en hiver, qui présentent déjà des périodes d'exploitation plus courtes et des interruptions. Si ces périodes sont davantage perturbées ou perturbées de façon continue, la capacité d'effectuer des travaux d'entretien périodiques pourrait être compromise.

Les impacts climatiques potentiels sur la production pourraient provoquer une perte de revenus en raison de sécheresses et de crues intenses dépassant la capacité de production des centrales hydroélectriques, faisant que celles-ci ne puissent pas répondre à la demande dans des communautés isolées s'appuyant sur l'énergie hydroélectrique pour l'alimentation en énergie. Dans les prairies, la sécheresse était plus préoccupante que les autres problèmes liés au climat, comme l'étaient les répercussions sur l'approvisionnement en eau pour l'irrigation. La résilience des communautés de cette région pourrait reposer sur un barrage à eau risquant d'être affecté par les changements climatiques pour l'irrigation ou l'approvisionnement en eau. Si la consommation d'eau augmente avec la température, cela pourrait entraîner une pression sur le système d'alimentation en eau et sur le bassin hydrographique qui y est associé. Une autre considération propre aux régions des prairies est la surface des bassins et les pentes basses des rivières. Cela signifie qu'il y a une importante intervention en amont dans le cours d'eau et, par conséquent, de la difficulté à interpréter les changements climatiques séparément de l'intervention humaine. Enfin, l'activité des ouragans en Amérique du Nord est susceptible d'avoir une incidence sur les climats de l'Ontario et des autres provinces canadiennes, et cette interaction n'est pas bien comprise. L'amélioration des outils de prévision et de mesure climatique est importante pour la gestion des barrages, maintenant et à l'avenir, à mesure que ces événements changent.

4.2 Initiatives d'adaptation au climat

Bien qu'une attention particulière ait été accordée aux changements climatiques et que des mesures aient été prises au sein de bon nombre des organisations qui ont participé aux entrevues, on a constaté, dans de nombreux cas, une incertitude et un manque d'expertise sur les meilleures pratiques de mise en œuvre de mesures d'adaptation climatique pour les barrages au Canada. Bien que toutes les parties prenantes interrogées se soient trouvées à un point différent du parcours pour s'adapter aux changements climatiques et les aborder, et que bon nombre d'entre elles étaient pratiquement en début de parcours, plusieurs initiatives ont été présentées par des parties prenantes qui ont pris des mesures pour traiter les répercussions des changements climatiques sur les barrages.

Certains grands propriétaires de barrages, ou certains propriétaires qui faisaient partie d'une grande entreprise, ont travaillé pour former leur personnel et intégrer les changements climatiques dans l'ensemble de leur entreprise et de leurs activités. Ils ont découvert que la formation des gens pour la mise en pratique de ces connaissances présente une longue courbe d'apprentissage. Certaines grandes organisations sont poussées à dépasser les normes et la réglementation provinciales en matière d'adaptation aux changements climatiques par des initiatives d'organisations internes, des investisseurs, des compagnies d'assurance, des événements extrêmes ou des changements attendus sur le plan des profits générés par la production. Les propriétaires de grands barrages et les services publics ont créé des groupes de travail sur la vulnérabilité et la résilience climatiques. D'après leurs résultats, une première étape importante consiste à évaluer les risques et les vulnérabilités de leurs actifs par rapport aux changements climatiques.

Certains services publics interrogés cherchaient à créer une boîte à outils et une méthodologie à appliquer systématiquement à de nouveaux projets afin d'assurer l'uniformité dans l'organisation en ce qui concerne les risques liés au climat. Une initiative de ce genre, utilisée par un service public, comprend une trousse d'évaluation de la vulnérabilité inspirée des cadres du CVIIP [133] et CRIDA [115], un atlas climatique fournissant des données de projection climatique propres aux actifs détenus et des courbes d'intensité, de durée et de fréquence (IDF) des pluies selon le climat. Certaines personnes interrogées

ont exprimé leur inquiétude quant au fait que le protocole du CVIIP pour l'évaluation des vulnérabilités climatiques est plus approprié pour les infrastructures conçues pour les événements climatiques avec des périodes de retour de 1 sur 100 ans, et non pour les barrages souvent conçus pour des événements extrêmes. On a également noté que le protocole du CVIIP est une référence utile pour les barrages, mais qu'il ne traite pas adéquatement des différents niveaux de risque entre les événements extrêmes et les événements à récurrence plus fréquente. Parmi les autres outils d'évaluation des risques utilisés par les parties prenantes, on note : Le processus Identification des dangers et évaluation des risques (HIRA) pour évaluer les risques, leurs facteurs et leurs indicateurs de manière quantitative, une approche selon laquelle de nouveaux projets ont revu les prévisions climatiques futures afin de déterminer si la conception présentait des enjeux ou si des changements y seraient requis, et une approche d'identification des risques au niveau du portefeuille pour se concentrer sur les risques les plus graves ou les actifs les plus menacés dans l'ensemble du portefeuille.

Dans certains cas, les propriétaires de barrages et les services publics ont consulté des entreprises externes sur la résilience climatique de certains de leurs projets nouveaux ou existants présentant des vulnérabilités particulières (climat nordique, vulnérabilité aux crues, etc.). Les résultats ont été mitigés, certains fournisseurs externes n'ayant pas les connaissances nécessaires pour intégrer les changements climatiques dans leur modèle. D'autres propriétaires de barrages ont bénéficié du travail existant effectué par leurs organisations mères, comme des plans d'adaptation existants ou des projections locales qui pourraient s'appliquer à leurs barrages.

Certaines personnes interrogées ont mentionné des modifications aux barrages pour augmenter la capacité du réservoir et du débit pour réagir aux événements extrêmes et aux résultats des examens de sécurité des barrages. Ceci pourrait devenir de plus en plus nécessaire compte tenu des changements climatiques.

Des organisations comme l'ACB et la CIGB, ainsi que des événements et des bulletins techniques connexes, ont été cités comme des mécanismes efficaces d'avancement des meilleures pratiques et de partage des connaissances sur les mesures d'adaptation aux changements climatiques à mesure que de nouveaux renseignements sur les changements climatiques deviennent disponibles et que se raffermit la compréhension des risques climatiques pour les barrages. Certaines organisations ont appuyé la recherche sur l'adaptation aux changements climatiques pour les barrages menée par Ouranos2F[3], une organisation identifiée comme étant un allié précieux dans cet effort.

Enfin, certains interviewés ont estimé que les initiatives d'adaptation au climat les plus appropriées devraient être menées par des ingénieurs individuels responsables de déterminer les risques pour l'infrastructure avec laquelle ils travaillent, ce qui devrait inclure les risques liés au climat.

4.3 Obstacles à l'adaptation

Dans les discussions individuelles et en groupe avec les parties prenantes, la disponibilité des données climatiques a été décrite comme un enjeu important pour l'adaptation climatique des barrages. L'accès limité aux données fiables ou aux capacités nécessaires pour interpréter les données disponibles sur les projections climatiques a été identifié comme étant l'obstacle le plus important pour la plupart des parties prenantes. En raison des limites des données, certaines parties prenantes ont estimé qu'il était difficile de distinguer les tendances climatiques réelles par rapport aux incertitudes météorologiques. L'acquisition de données et la recherche sur les événements extrêmes (notamment les PMP et les CMP) ont été particulièrement intéressantes pour les parties prenantes. Bien que les services et données de surveillance de l'eau soient disponibles à différents degrés dans toutes les provinces, les parties prenantes estiment que l'identification des lacunes en matière de recherche et d'organisation serait facilitée par une disponibilité et une qualité accrues des données climatiques à l'échelle du Canada. Fait intéressant, les parties prenantes en recherche et de l'espace fédéral ont indiqué qu'il y avait beaucoup de données, mais qu'il y avait un enjeu pour leur accès par les utilisateurs finaux au bon endroit et dans le bon format.

Il n'y avait pas non plus de consensus sur la validité des projections de changements climatiques disponibles et

3 https://www.ouranos.ca/fr/

leur applicabilité à la conception et à l'exploitation des barrages. Pour obtenir des données de bonne qualité avec moins d'incertitude, il est important d'obtenir des données provenant de différents modèles climatiques plutôt que d'un seul. Les sources de données nationales sont utilisées pour les données régionales de projection climatique, mais les méthodes utilisées pour la réduction d'échelle diffèrent. Par conséquent, une procédure de réduction d'échelle pourrait aider l'industrie des barrages à réaliser l'uniformité entre les modèles régionaux.

Il a également été noté que la mise en œuvre de données climatiques projetées, l'interprétation de leur qualité et l'application de méthodes rationnelles à cet égard dépassent les capacités de certaines organisations en raison d'un manque de personnel qualifié, ce qui rend difficile pour les propriétaires de barrage et les praticiens d'agir en ce qui a trait à l'adaptation climatique. L'approche exige une compréhension approfondie des sciences du climat pour bien interpréter et réduire à l'échelle de façon appropriée les données mondiales, nationales ou provinciales pour des endroits précis. De plus, lorsque des projections climatiques propres à un endroit sont disponibles, il pourrait être difficile d'interpréter ces données et de les traduire en répercussions directes sur l'infrastructure et l'exploitation, et de déterminer les adaptations appropriées en toute confiance des justifications. Par conséquent, les propriétaires de barrages pourraient avoir à faire appel à des consultants externes pour comprendre les risques liés au climat, une dépense qui doit être justifiée pour les investisseurs, les payeurs de tarifs ou d'autres parties prenantes.

Un autre obstacle important est l'utilité des données climatiques en cours de développement et de modélisation, et la façon dont elles sont liées aux besoins de l'utilisateur final. Les sources de données, les formats et les méthodologies d'interprétation doivent s'appliquer pour éclairer les décisions de conception, d'exploitation et d'entretien. Les formats de données utiles et la formation sur la façon d'utiliser les formats disponibles pourraient être réalisés par les parties prenantes et diffusés au moyen de solutions fondées sur les normes. Il y a également des efforts dans la communauté de la recherche pour fournir des services reliant les données climatiques à leur application en génie. Cela permettrait de régler de nombreux problèmes relevés par les parties prenantes.

Les chercheurs ont aidé les industries des ponts et des bâtiments à élaborer des modèles que les praticiens pourraient utiliser pour adapter l'infrastructure aux changements climatiques. Des projets semblables pourraient être entrepris pour le secteur des barrages.

L'approche générale pour l'ingénierie des barrages est actuellement déterministe (les études fournissant une seule réponse), mais il faudrait plutôt passer aux probabilités, aux statistiques et aux analyses basées sur le risque pour pouvoir incorporer adéquatement les changements climatiques. La nature prédictive et incertaine des changements climatiques exige l'évaluation d'un éventail de résultats. Cela signifie que la prise de décision est également tenue de respecter des tolérances de risque acceptables, que certaines organisations et certains praticiens ne connaissent pas. Les personnes interrogées ont mentionné que la plupart des ingénieurs n'ont pas reçu une formation officielle pour la conception en vue de l'incertitude, la prise de décision fondée sur les risques, l'interprétation des conditions climatiques changeantes ainsi que les données de projection climatique. Elles ont également déclaré que les pratiques et normes d'ingénierie actuellement utilisées dans la plupart des cas ne tiennent pas compte de l'adaptation aux changements climatiques.

L'absence de données sur les incitations financières et les avantages économiques dans le cadre des investissements d'adaptation a été identifiée comme un obstacle potentiel à l'adaptation pour les propriétaires de barrages plus petits. Ceux-ci sont responsables de répartir les ressources dans l'ensemble de leurs actifs pour faire en sorte qu'ils soient tous sécuritaires, qu'ils fonctionnent de la façon envisagée et qu'ils correspondent aux exigences et aux attentes de l'industrie ainsi qu'à celles des parties prenantes. Selon de nombreuses parties prenantes, les limites actuelles des données climatiques et le manque de compréhension des risques climatiques et des mesures d'adaptation pratiques entravent les justifications appropriées pour appuyer les coûts nécessaires à l'adaptation. Cela était particulièrement moins préoccupant pour les propriétaires de barrages plus grands et ceux qui ont soit l'appui du gouvernement ou des mandats gouvernementaux.

Certaines personnes interrogées croient que l'industrie pourrait souvent être compartimentée et qu'elle a adopté au ralenti l'approche en système pour la gestion

des barrages, ce qui serait nécessaire pour avancer vers la résilience. Les personnes interrogées ont exprimé leurs inquiétudes quant au défi de coordonner les efforts d'adaptation entre plusieurs propriétaires et exploitants dans un seul bassin. Par exemple, plusieurs organismes sont souvent obligés de travailler ensemble dans les grands bassins hydrographiques, tant du point de vue de l'exploitation et de la surveillance que de celui de la communication publique et de la sécurité. Des efforts mal coordonnés pourraient exacerber les répercussions des changements climatiques. Cette question a été cernée comme un sujet potentiel sur lequel élaborer des conseils sur des meilleures pratiques de gestion des bassins en présence de changements climatiques et d'incertitude.

On a discuté des considérations et frontières concurrentes sur le plan des territoires et de la réglementation, notamment que l'eau et les barrages ont toujours été des mandats provinciaux et qu'ils ne sont pas visés par les règlements fédéraux. De plus, certaines provinces disposent de différentes façons de classer et de gérer les barrages, comme l'utilisation d'un système selon la rivière ou selon le bassin. Cela peut compliquer la façon dont l'adaptation aux changements climatiques est susceptible d'être intégrée dans l'ensemble de l'industrie. Tout type d'application de la réglementation exige qu'une norme soit adoptée et intégrée aux cadres provinciaux existants. Les organismes de réglementation interrogés ont indiqué que les politiques sont habituellement créées en réponse à un incident ou à une compréhension croissante d'un problème. Au Canada, il n'y a pas eu beaucoup d'incidents de barrage directement attribués aux changements climatiques, et une compréhension commune de la gestion des risques climatiques n'est pas encore claire. Par conséquent, les politiques sont plus susceptibles de réagir aux tendances dans l'industrie au fur et à mesure que les meilleures pratiques ou que les risques climatiques deviennent plus évidents.

4.4 Encadrement en matière d'adaptation au climat

Les solutions auxquelles l'industrie des barrages est obligée à s'adapter en vue des changements climatiques ne sont pas simples. L'engagement des parties prenantes a fourni certains points de vue en faveur de solutions fondées sur les normes et certaines préoccupations.

Un besoin général de soutien dans l'adaptation aux changements climatiques a été souligné par la plupart des parties prenantes. Il y avait consensus sur l'importance que les propriétaires de barrages comprennent les risques et les vulnérabilités de leurs barrages afin de déterminer les niveaux de risque acceptables, y compris en ce qui a trait aux risques climatiques. Parmi les personnes qui n'avaient pas encore considéré officiellement les changements climatiques dans leurs conceptions ou leurs activités, la plupart étaient au courant que les changements climatiques pourraient avoir une incidence sur leur système, mais sans savoir comment et en quelle ampleur. Cette incertitude était préoccupante pour certains. La nécessité de lignes directrices générales ou de meilleures pratiques sur la méthodologie nécessaire pour intégrer les changements climatiques dans les projets, et pour utiliser et interpréter les données, a été mentionnée. D'autres sujets comprenaient des lignes directrices précises sur les crues, les sécheresses ou la sécurité, ainsi que des lignes directrices sur la conception résistante. On a précisé que l'utilisation d'énoncés généraux, de règles ou de valeurs précises ne serait pas applicable à l'échelle nationale (p. ex., les 8 % d'augmentation des crues centenaires pour tenir compte des changements climatiques), mais que des méthodologies, des considérations et des meilleures pratiques définies pourraient être utiles. De plus, certains ont indiqué que le langage généralement défini dans les normes pourrait aider en vue d'une mise en œuvre et de méthodologies uniformes dans l'ensemble de l'industrie, plutôt que d'utiliser des lignes directrices qui laissent plus de place à l'interprétation.

Inversement, des inquiétudes ont été exprimées quant à la mise en œuvre de solutions fondées sur les normes. Certaines personnes interrogées ont mentionné des difficultés potentielles liées à la logistique de l'application d'une norme ou d'une ligne directrice nationale pour l'adaptation aux changements climatiques dans une industrie qui manque de normes nationales en matière de sécurité des barrages ou d'autres sujets connexes, au-delà des règlements provinciaux et des lignes directrices nationales. Certains ont appuyé le renforcement des meilleures pratiques d'adaptation aux changements climatiques par le dialogue et l'éducation au moyen de conférences et de publications de recherche permettant l'interprétation et l'établissement des priorités en fonction des conditions des barrages et



« Il y avait consensus sur l'importance que les propriétaires de barrages comprennent les risques et les vulnérabilités de leurs barrages afin de déterminer les niveaux de risque acceptables, y compris en ce qui a trait aux risques climatiques. »

des propriétaires de barrages partout au pays. Certains croient que les lignes directrices actuelles de l'ACB offrent suffisamment de sécurité et de résilience pour les barrages en ce qui concerne les changements climatiques; d'autres voulaient davantage de recherche ou de discussion sur les risques, les vulnérabilités et les mesures d'adaptation climatique pour justifier le besoin d'adaptation. Cela pourrait être traité par d'autres recherches propres aux barrages ou par une diffusion accrue aux parties prenantes de l'information déjà disponible à ce sujet.

Il y a eu des thèmes récurrents sur les outils qui, selon les parties prenantes, seraient utiles. Certaines ont mentionné des outils de prise de décision et de lignes directrices pour l'interprétation des données de projection climatique et pour la quantification des répercussions sur les actifs en raison des changements climatiques, ainsi qu'un outil de mise à jour des procédures d'exploitation en réaction aux changements climatiques prévus. Plusieurs ont laissé entendre que des normes et des lignes directrices en mesure de tenir compte de la variabilité et de la portée des conceptions, des emplacements et de l'exploitation des barrages, ainsi que de la variabilité géographique du climat dans tout le pays, pourraient être une référence très utile. Certaines personnes interrogées ont recommandé l'intégration des normes ou des conseils dans les lois et les lignes directrices provinciales afin de les adapter aux risques climatiques provinciaux. Pour les propriétaires de barrages qui entreprennent leur parcours vers l'adaptation aux changements climatiques, une feuille de route sur la façon de gérer les changements climatiques pour les barrages pourrait avoir un impact important. Pourtant, elle n'aurait probablement pas d'incidence sur ceux qui ont déjà commencé l'adaptation.

Les parties prenantes ont également souligné l'importance de considérer les changements climatiques comme l'une des nombreuses priorités que les propriétaires de barrages ont besoin d'envisager afin d'assurer la résilience de leur système. On a suggéré que l'adaptation aux changements climatiques pour les barrages pourrait être un ajout aux lignes directrices existantes ou aux examens de la sécurité des barrages, de sorte que les changements climatiques soient perçus comme l'une des nombreuses incertitudes auxquelles sont confrontés les propriétaires de barrage. Une norme ou des conseils devraient faire en sorte que les changements climatiques sont pris en considération en même temps que d'autres priorités, notamment l'exploitation et l'entretien. Ainsi, les budgets, surtout pour les propriétaires de petits barrages disposant de ressources limitées, pourraient être répartis de façon appropriée. De la même façon, un barrage n'est qu'un seul élément d'un système de plus grande taille. Ainsi, une norme ou une ligne directrice devrait tenir compte des exigences en matière de réservoir et d'exploitation physique, ainsi que des procédures organisationnelles entourant le barrage en vue de la résilience des mesures d'adaptation climatique. Un exemple de ceci s'est dégagé lorsque certains équipements électriques n'ont pas été conçus pour le froid extrême : cela a eu une incidence sur le débit du barrage.

Certaines parties prenantes ont indiqué qu'étant donné l'horizon d'examen relativement court de la sécurité des barrages comparativement aux changements climatiques, une variation significative des conditions aurait besoin d'être observée pour commencer à dépasser l'enveloppe de conception des barrages pendant leur durée de vie. À l'heure actuelle, les décisions sont prises en fonction des conditions climatiques et des événements historiques. Pourtant, les changements climatiques méritent d'être pris en compte sur le plan des risques futurs et d'inciter une conception axée sur l'incertitude plutôt que sur les conditions passées et actuelles. Bien que les impacts sur la conception des barrages soient contestés par les parties prenantes, la plupart s'entendent à dire que l'exploitation des barrages pourrait être affectée par les changements climatiques au cours de la durée de vie de l'infrastructure.

Certains besoins que les parties prenantes ont mentionnés parmi les plus importants à aborder comptaient des directives sur les processus d'acquisition et d'interprétation des données climatiques, la façon de traiter la fiabilité et la qualité des données, la façon de faire preuve de transparence en ce qui a trait à la source et à la validation des données utilisées, la gestion de l'incertitude liée aux données et en matière de prise de décision, et des conseils sur les mesures d'adaptation qui ont été appliquées dans l'industrie pour que les autres parties prenantes puissent tirer profit de ces leçons.

5 Discussion

5.1 État des connaissances et lacunes

Comme nous l'avons mentionné au à la section 3.5, il existe des directives sur la façon de tenir compte des changements climatiques dans la conception, l'exploitation et l'entretien de l'infrastructure au Canada qui ne sont pas propres aux barrages, ainsi que des directives internationales qui le sont. L'orientation internationale est un point de départ utile, mais elle doit inclure des données régionales détaillées sur le climat et une analyse des risques propre au site. Les conseils qui ne sont pas propres aux barrages pourraient également être un bon outil, mais les risques liés aux barrages sont susceptibles d'être très différents de ceux qu'affrontent d'autres infrastructures, particulièrement en ce qui concerne la sécurité du public. Par exemple, les récurrences de crues utilisées pour concevoir des barrages sont beaucoup plus élevées que celles qui sont utilisées pour les ponts ou ponceaux. Par conséquent, les organisations élaborent leur propre documentation et leur propre encadrement pour traiter de l'adaptation climatique des barrages, ce qui pourrait entraîner des différences dans les méthodologies entre l'industrie, les gouvernements, les propriétaires de petits barrages et les services publics.

Plusieurs obstacles à l'adaptation aux changements climatiques par le secteur de l'énergie ont été mis en évidence dans la documentation. Ceux-ci comprennent le manque de directives techniques, le manque de directives institutionnelles, l'incertitude de la projection climatique et le manque de justification de l'investissement [97]. Ces obstacles ont été validés au cours du processus d'engagement des parties prenantes (voir la section 4). La plupart des propriétaires de barrages ont l'impression d'un manque d'uniformité dans la disponibilité et dans la qualité des données au Canada, aucune expertise dans l'interprétation et le traitement des données climatiques jusqu'à maintenant, et aucune approche normalisée au sein des entreprises ou de l'industrie pour la gestion des changements climatiques dans leurs actifs et projets. Il est important de noter que des paramètres établis, comme l'analyse de fréquence des données hydroclimatiques, peuvent avoir changé de façon difficile à prévoir et ne sont donc pas considérés actuellement. Plusieurs personnes interrogées estimaient que les ingénieurs en pratique n'avaient pas reçu la formation officielle pour s'attaquer aux incertitudes en matière de conception, à la prise de décision axée sur les risques et à l'interprétation des conditions climatiques changeantes et des données de projection climatique.

Pour ce qui est de l'inquiétude générale concernant les limites des données, les parties prenantes des communautés scientifique et de la recherche ont estimé que les tendances climatiques canadiennes étaient connues et accessibles au niveau régional sur des sites Web tels que donneesclimatiques.ca [134]. Les propriétaires et ingénieurs de barrages sont habituellement bien équipés pour gérer les risques et les dangers connus et bien compris qui menacent leurs actifs. Par conséquent, les lacunes identifiées sont la connaissance des sources de données disponibles, la capacité d'évaluer la qualité et l'utilité des données, la capacité d'interpréter les données climatiques régionales selon le site, ou les événements

météorologiques et hydrologiques propres au bassin et la façon dont ces renseignements pourraient être utilisés pour prendre des décisions éclairées en matière d'adaptation aux changements climatiques propres au site.

5.2 Motivation pour la mise en œuvre de l'adaptation aux changements climatiques pour les barrages

Les entrevues avec les parties prenantes ont dégagé une certaine motivation à tenir compte des changements climatiques dans les projets liés aux barrages. Les propriétaires de barrages privés et les services publics ont mentionné qu'ils recevaient de la pression de la part des actionnaires, des investisseurs, du public et des assureurs pour gérer les risques financiers et physiques associés aux changements climatiques. Pendant la planification de la centrale énergétique Keeyask par la Manitoba Hydro, par exemple, le processus de délivrance de permis et les discussions lors d'audiences publiques ont montré que les parties prenantes étaient sensibles aux changements climatiques et qu'une bonne planification de l'adaptation à ceux-ci importait pour eux [97]. Un propriétaire de petit barrage fournissant de l'électricité à un microréseau isolé dans une communauté du nord a mentionné que les changements climatiques pourraient représenter une menace pour la fiabilité du service d'électricité et donc la résilience de la communauté. Plusieurs organisations consultées avaient déjà avancé dans l'adaptation aux changements climatiques, mais bon nombre d'entre elles étaient encore à l'étape préliminaire de l'identification des vulnérabilités dans leurs systèmes. Certaines avaient commencé à rechercher des données et à élaborer des outils d'évaluation et d'adaptation, mais aucune n'avait une approche uniforme dans l'ensemble de son organisation pour tenir compte des changements climatiques et pour mettre en œuvre de mesures d'adaptation.

Une autre mesure incitative est la recommandation d'Ingénieurs Canada : envisager les risques climatiques et renseigner les clients sur les mesures d'adaptation climatique dans *Principes d'adaptation aux changements climatiques et d'atténuation de leurs effets* [135]. Des risques multiples et des mesures d'adaptation pour les barrages au Canada ont été cernés dans l'analyse documentaire et durant les entrevues. Certains des risques identifiés pourraient avoir une incidence sur la sécurité des barrages au cours de ce siècle, ce qui justifie le besoin que les propriétaires de barrages soient conscients de ces risques et agissent au besoin.

Dans son plan d'action sur les changements climatiques, EGBC mentionne la mise au point de « conseils pratiques » portant sur les considérations relatives aux changements climatiques comme l'une des dix mesures à prendre pour soutenir ses participants inscrits [125]. Selon le rapport, « il n'est plus approprié de baser les pratiques d'ingénierie et de géoscience uniquement sur les données et les méthodes climatiques historiques. » L'EGBC a également rassemblé des ressources relatives aux considérations relatives aux changements climatiques pour la conception et l'adaptation de divers types d'infrastructure sur son site. Certaines de ces ressources sont des documents d'orientation créés par EGBC, d'autres sont recueillis auprès d'autres agences et sources de données à titre de référence pour le travail lié à l'adaptation climatique. Ces ressources pourraient constituer un point de départ pour les praticiens qui souhaitent tenir compte des changements climatiques dans leurs conceptions, mais ne fournissent pas de conseils propres aux barrages ou d'indications sur la façon d'interpréter les données climatiques dans tous les contextes. Cette compilation de ressources pourrait toutefois être un modèle intéressant que l'industrie du barrage pourrait suivre.

En fonction des lacunes identifiées dans l'industrie et des besoins des parties prenantes, une norme ou des lignes directrices pourraient être utiles pour aider les organisations sans expertise interne en matière de changements climatiques et pour viser l'uniformité et la sécurité dans la conception et l'exploitation des barrages.

5.3 Sujets pour les conseils et la recherche

Le processus de consultation a permis de déterminer que les conseils, l'éducation et les discussions de l'industrie seraient utiles pour guider les organisations qui ont besoin de soutien afin d'atteindre un niveau minimal de résilience climatique. Toutefois, toute orientation formelle de l'industrie devrait traiter des obstacles identifiés à la section 4.3. Par exemple, un document d'orientation nécessiterait des mises à jour périodiques pour refléter le contexte dynamique des changements climatiques et de la recherche sur le

climat. Cette section traite des sujets qui pourraient bénéficier de conseils, sous forme de lignes directrices ou de normes, et des sujets nécessitant plus de recherche.

Les tendances climatiques importantes n'ont pas été observées en moins de 30 ans et il n'est pas attendu qu'elles le soient [37]. L'ACB recommande de réévaluer l'IDF après des événements hydrologiques extrêmes [7] ou tous les cinq à dix ans dans le cadre du programme d'examens de la sécurité des barrages [136]. Étant donné que l'IDF est fondée sur des données historiques, les changements climatiques n'ont pas encore contribué à des changements importants à l'IDF et à la modélisation des crues de conception. À l'heure actuelle, le processus ne nécessite pas de prévisions climatiques futures dans le cadre d'un examen de la sécurité des barrages, car elles ne reflètent que l'état actuel et la conformité au code du barrage. Ce problème pourrait être abordé dans un document d'orientation afin de soutenir l'évaluation de l'incidence des changements climatiques sur l'IDF, ainsi que l'identification et la quantification d'autres changements à la charge de conception. Les documents mentionnés dans ce rapport (p. ex. [79] [80] pour les crues de projet et [96] [115] [93] pour les évaluations des risques), constituent un point de départ utile. Toutefois, des lignes directrices précises sur l'acquisition des données, l'interprétation et les tendances régionales à l'échelle du Canada exigeraient des recherches supplémentaires.

En raison des changements climatiques prévus, une variabilité accrue des événements météorologiques pourrait entraîner des demandes changeantes en matière d'exploitation, de surveillance, d'entretien et de planification des interventions d'urgence. Des considérations spéciales pourraient être nécessaires pour certains aspects, notamment :

- Exploitabilité de l'équipement d'admission et de vanne en hiver;
- Usure de l'équipement en raison d'une utilisation plus fréquente;
- Survenance de feux de forêt et leur incidence sur le paysage en amont;
- Augmentation de la demande en eau;
- Difficulté à maintenir le niveau d'eau dans de petites fourchettes de fonctionnement; et
- Augmentation de la dépendance sur l'eau pour une production d'énergie souple impliquant des changements aux modèles actuels de fonctionnement des réservoirs, la sédimentation et la fonte du pergélisol dans les barrages de la région du nord.

Les propriétaires de petits barrages dont les biens ne sont menacés que de faibles conséquences et qui n'ont pas besoin de réviser la sécurité des barrages selon une IDF à période de retour de 100 ans peuvent également être préoccupés par la sous-estimation des risques s'ils ne sont pas tenus à jour à mesure que les sciences du climat continuent d'avancer. Ce problème particulier justifie d'autres études pour comprendre les risques inconnus potentiels pour les petits barrages, car on a trouvé peu de documentation sur ce sujet. Cette lacune a été identifiée comme une lacune en matière de connaissances parmi les parties prenantes.

Les chercheurs ont indiqué que des données climatiques utiles sont actuellement disponibles; pourtant, les parties prenantes ont dit qu'elles ne savaient pas quelles données étaient disponibles, à quel point elles étaient fiables ou comment les appliquer à leurs systèmes. En fait, des inquiétudes ont été exprimées au sujet de l'écart de connaissance de l'ensemble du processus d'évaluation de la vulnérabilité climatique et d'adaptation. Cet écart s'étend des projections climatiques et des évaluations des risques jusqu'aux prises de décision et aux mesures d'adaptation. Ces préoccupations pourraient être abordées dans une ligne directrice ou une norme présentant une base de connaissances fondamentales de l'industrie pour l'interprétation des données climatiques, l'évaluation des risques et les processus d'adaptation.

Les besoins en matière d'adaptation aux changements climatiques pour l'exploitation et la gestion sécuritaire des barrages existants sont très différents de ceux qu'énonçaient les études pour de nouvelles infrastructures ou des projets majeurs. La planification du capital et les examens de la sécurité des barrages font en sorte que les propriétaires de barrages comprennent bien les principales vulnérabilités de chacun de leurs actifs. Les propriétaires de barrage ont affirmé être conscients des problèmes les plus importants pour la gestion et l'exploitation sécuritaires de leurs barrages. Ces problèmes pourraient comprendre des enjeux récurrents comme la difficulté à atteindre les débits minimums pendant les saisons sèches, une liste de priorités pour la réfection, comme le vieillissement de l'infrastructure et de l'équipement,

ou des débits de CMP s'approchant de la capacité de déversement. Par conséquent, des conseils utiles pourraient mettre l'accent sur les problèmes et les vulnérabilités potentiels qui peuvent survenir dans diverses régions, et sur la façon dont ceux-ci pourraient être exacerbés par les changements climatiques. Par exemple, un propriétaire de barrage qui a de la difficulté à respecter les exigences minimales en matière de débit pendant l'été pourrait décider de jeter un coup d'œil à la sécheresse s'il est attendu qu'elle augmente dans sa région. De même, les propriétaires de barrages qui n'ont qu'une seule voie d'accès à leurs sites pourraient étudier la probabilité de tempêtes extrêmes dans leur région et prendre des mesures en cas de délavage de routes, au besoin. Des conseils soulignant les changements climatiques et les risques auxquels les propriétaires et les praticiens de barrage doivent s'attendre, et des directives sur une gestion des risques appropriée pourraient aider à identifier les vulnérabilités potentiellement exacerbées par les changements climatiques et souligner le besoin d'études plus approfondies.

Un autre point important est que les propriétaires de barrages sont obligés de composer avec de nombreuses priorités distinctes. Les changements climatiques ne sont qu'un facteur parmi d'autres qui peuvent présenter un risque pour les barrages au Canada. Une approche fondée sur le risque pour la prise de décision permettrait au secteur des barrages de comparer avec précision les conséquences et les avantages des priorités de gestion des actifs et d'exploitation en ce qui concerne les besoins d'adaptation aux changements climatiques. Malgré les difficultés liées à la disponibilité des données et à l'interprétation du contexte propre à l'actif, une fois que les risques climatiques ont été identifiés, la valeur de la mise en œuvre des mesures d'adaptation climatique pourrait être comparée à d'autres priorités. Des conseils pour les praticiens sur la façon d'effectuer une évaluation des risques à l'échelle du système pourraient être utiles, en plus de conseils sur la façon d'incorporer les risques liés au climat à ces évaluations.

Le Comité européen de normalisation a élaboré un guide général pour la création de nouvelles normes d'adaptation au climat [137] qui ne vise pas expressément les barrages ou les projets d'infrastructure. Le guide comprend un arbre décisionnel pour aider à déterminer ce qui devrait être inclus dans une norme d'adaptation au climat.

En appliquant cette méthodologie, une nouvelle norme d'adaptation aux changements climatiques pour les barrages au Canada pourrait comprendre ce qui suit :

1. Une gamme de mesures d'adaptation à prendre en considération dans la conception des barrages. Celles-ci incluraient des options qui sont avantageuses même sans changement climatique (p. ex., des améliorations de l'exploitation et de la surveillance);

2. Les changements projetés des conditions climatiques au cours de la durée de vie des barrages en fonction de paramètres pertinents (p. ex., hydrologie, glace, ruissellement, feux de forêt, température), y compris l'incertitude;

3. Les tendances climatiques, les documents de référence et les sources de données sur les projections climatiques pour la période pertinente aux infrastructures de barrage (pour remplacer les données climatiques existantes);

4. Des conseils sur les méthodes pour appliquer les futures données de projection climatique à un site afin de prendre des décisions éclairées (p. ex., calculer les crues de conception, les niveaux des réservoirs, les charges de glace et d'onde, le ruissellement et la sédimentation);

5. Les niveaux de risque définis ou les impacts auxquels les barrages devraient résister. Ces niveaux devraient tenir compte des mesures d'atténuation en place, de la conception en vue du dépassement, de la conception en vue de la dégradation du rendement et des provisions – par exemple, des voies d'approvisionnement et d'accès, des sacs de sable supplémentaires et des mesures d'atténuation des crues, des accords d'eau avec d'autres villes en cas de sécheresse ou de redondance – et;

6. La période de validité estimative pour l'information sur le climat et des mises à jour périodiques des normes pour y inclure de nouvelles recherches.

En résumé, la norme suggérée sur l'adaptation aux changements climatiques pour les barrages pourrait identifier les sources de données hydroclimatiques, comment utiliser et interpréter les données, quantifier les risques, définir des niveaux de risques acceptables, guider la prise de décision et suggérer les meilleures pratiques en matière d'adaptation. Toutefois, compte

tenu de la grande variété de régions géographiques du Canada, des différents niveaux de disponibilité des données et des répercussions particulières du changement climatique sur les barrages (et, dans de nombreux cas, leur éloignement), il pourrait ne pas être pratique pour une norme de fournir des projections et des sources de changements climatiques (alinéas 2 et 3 ci-dessus) qui s'appliquent adéquatement à tous les barrages au Canada. Les autres alinéas pourraient être généralement applicables à l'échelle nationale. Pourtant, ils auraient à tenir compte de la grande variété de fonctions et de constructions des barrages. Ces concepts sont abordés plus en détail dans les sections ci-dessous.

5.4 Processus d'adaptation au climat

À la suite de conversations avec les propriétaires de barrages, les praticiens et les spécialistes de l'adaptation aux changements climatiques, un processus général pour traiter les risques liés aux changements climatiques et les pratiques d'adaptation pour un système de barrage au Canada a été élaboré. L'objectif est de fournir une structure pour discuter des pratiques actuelles en matière de barrages, de lacunes dans les ressources et des prochaines étapes potentielles pour l'industrie afin qu'elle puisse se rapprocher de l'adaptation aux changements climatiques. Bien que les propriétaires de barrages ne soient pas responsables de tout le processus, certaines étapes devraient être motivées par eux et appuyées par d'autres (consultants, chercheurs, organisations de l'industrie et organisations d'élaboration de normes). Le processus suggéré comprend six étapes :

1. **Déterminer l'exposition locale aux changements climatiques :** La première étape consiste à identifier le problème et à déterminer comment et dans quelle mesure il est attendu que les changements climatiques aient une incidence sur les barrages au Canada. Tel que discuté aux sections 3 et 4, on comprend généralement que les changements climatiques auront une incidence sur les systèmes climatiques au Canada. On s'attend à ce qu'ils apportent des températures moyennes plus élevées, qu'ils modifient les régimes de précipitations, qu'ils fassent augmenter la variabilité et qu'ils exacerbent certains phénomènes météorologiques extrêmes déjà observés partout au pays. Étant donné que la fonction et l'exploitation des barrages dépendent du cycle de l'eau et d'autres facteurs environnementaux, les changements qui subissent ces systèmes auront également une incidence sur les barrages. Toutefois, le type et l'ampleur de ces changements climatiques et de ces tendances météorologiques varieront selon la région géographique. Par conséquent, les répercussions varieront aussi. Il existe divers degrés de données climatiques dans tout le pays, autant pour les tendances historiques que pour les projections de changements climatiques [37], ainsi que plusieurs méthodes d'interprétation des données des modèles climatiques pour un site particulier. Il est donc nécessaire d'étudier les conditions climatiques propres à chaque site pour des emplacements ou des régions précis plutôt que d'examiner les tendances nationales.

2. **Évaluer les répercussions potentielles sur l'infrastructure et l'exploitation :** Une fois que les changements climatiques prévus pour une région sont établis, les propriétaires de barrages et les praticiens pourraient déterminer si ces changements pourraient avoir une incidence sur l'infrastructure et l'exploitation du barrage et la façon dont ce serait le cas. Les impacts potentiels varieront pour chaque barrage selon la taille, l'emplacement, le type d'infrastructure, l'âge, l'objectif, etc. Par conséquent, il est important de comprendre chaque système de barrage ainsi que les problèmes ou vulnérabilités actuels du site afin de voir comment les changements climatiques peuvent exacerber ces vulnérabilités ou présenter de nouveaux risques. Des changements des CMP ont été étudiés pour plusieurs bassins hydrographiques à l'échelle du pays. Les résultats montrent que certaines crues de conception devraient augmenter, tandis que d'autres devraient diminuer dans une mesure variable [79]. Cela démontre le besoin d'une interprétation propre au site des données climatiques afin de déterminer comment les changements des précipitations et du manteau neigeux auront une incidence sur les CMP prévues à un barrage.

   L'application des données de projection des changements climatiques pour concevoir des modèles de crue nécessite une expérience particulière ou une étude approfondie sur place, ce qui constitue un écart important des données pour la plupart des propriétaires et des exploitants. Une fois que les paramètres climatiques propres au site sont connus, il existe des outils pour aider les praticiens à évaluer les risques et les répercussions sur un système de barrage, comme le protocole CVIIP. Ces outils pourraient être adaptés pour tenir compte des

niveaux de conséquence particulièrement élevés associés aux risques pour les barrages [138] : les programmes Failure Modes and Effects Analysis (FMEA), ou Potential Failure Mode Analysis (PFMA) de la Federal Energy Regulatory Commission (FERC) [139] des États-Unis pourraient être adaptés pour les changements climatiques.

3. **Évaluer le risque :** Après avoir établi les répercussions des changements climatiques sur un système de barrage, le risque associé à chaque incidence potentielle pourrait être évalué en déterminant la probabilité et la conséquence de chaque incidence potentielle. La norme ISO 31000 sur la gestion des risques pourrait guider ce processus [140]. Les risques liés aux changements climatiques pourraient ensuite être classés en priorité et comparés à d'autres risques sur place ou dans un portefeuille d'actifs pour déterminer si la conception, l'exploitation, l'entretien, la prise de décision ou la planification du capital devraient s'adapter aux changements climatiques. Les parties prenantes ont souligné l'importance d'avoir une compréhension à l'échelle du système de tous les risques posés à l'infrastructure et à l'exploitation du barrage. Si la prise de décision actuelle ne tient pas compte des risques non liés au climat, il serait difficile de bien mettre en priorité l'adaptation climatique par rapport à d'autres améliorations et à l'entretien d'un système de barrage.

4. **Comparer les changements prévus aux vulnérabilités actuelles :** Si les évaluations des risques à l'échelle du système ne sont pas possibles en raison des contraintes des ressources ou de l'expertise interne, les projections climatiques propres au site pourraient être utilisées pour évaluer les impacts potentiels sur l'infrastructure ou l'exploitation du barrage. Pour ce faire, il faut déterminer où ces changements pourraient exacerber les vulnérabilités existantes. Cela aidera les propriétaires de barrage à déterminer où attribuer les ressources pour des études plus poussées. Une organisation interrogée avait utilisé des données climatiques propres à son site pour effectuer un « essai de contrainte », en faisant preuve d'un jugement d'expert pour déterminer si les changements projetés pourraient avoir des répercussions importantes sur son infrastructure ou son exploitation, ceci dans le but d'étudier davantage ces facettes.

5. **Évaluer les mesures d'adaptation :** En connaissant les risques liés aux changements climatiques et les impacts potentiels sur le système de barrage, la résilience du système pourrait être évaluée et ses zones vulnérables pourraient être cernées. Il peut déjà y avoir une redondance dans le système de barrage, ainsi que des procédures de surveillance et d'atténuation offrant la résilience du système. Lorsque les risques liés au climat ne sont pas déjà gérés, surveillés ou atténués, des mesures d'adaptation potentielles pourraient être évaluées.

   Les solutions d'adaptation devraient tenir compte des améliorations physiques (p. ex., l'ajout de redondances aux voies d'accès des sites), des changements à l'exploitation (p. ex., répondre à des besoins opérationnels plus fréquents ou plus soudains), de l'adaptation aux procédures (p. ex., la mise à jour des plans d'exploitation, d'entretien et de surveillance afin de surveiller les indicateurs climatiques clés), et des changements organisationnels (p. ex., en employant des opérateurs toute l'année pour gérer de nouvelles exigences sur le plan de l'exploitation hivernale).

   Les mesures d'adaptation pourraient ensuite être classées par ordre de priorité en fonction de celles qui fournissent la plus grande valeur en ce qui a trait à leur impact sur la résilience du système dans l'ensemble, la sécurité publique, les priorités et les ressources de l'organisation, l'efficacité des mesures, etc. Pour qu'un système de barrage puisse résister aux changements climatiques, il devrait y avoir une harmonisation dans la planification de l'adaptation pour l'infrastructure, l'exploitation et l'organisation.

6. **Évaluation constamment mise à jour :** Étant donné que la science et que les données des changements climatiques évoluent et sont continuellement mises à jour, il pourrait être nécessaire de revoir la planification et la mise en priorité des risques climatiques après une certaine période, qui pourrait être basée sur le niveau de conséquence d'un barrage selon les examens de la sécurité des barrages.

Ces étapes demeurent générales et ne fournissent pas de recommandations précises et réalisables qui pourraient être appliquées par l'industrie du barrage.



« Le changement climatique doit être pris en compte dans la conception, l'exploitation et l'entretien des barrages, tout en restant cohérent dans l'approche et adapté au type, à la taille et au niveau de conséquence du barrage. »

5.5 Recommandations pour l'industrie du barrage

Des lignes directrices et des normes relatives à l'adaptation aux changements climatiques pour les barrages, applicables au contexte canadien, n'ont pas été trouvées dans l'examen documentaire et il n'y a pas de consensus sur les meilleures pratiques parmi les parties prenantes consultées pour ce projet. Les propriétaires de barrages et les autres parties prenantes ne s'entendent pas quant au processus de gestion des risques climatiques posés aux infrastructures de barrage. De nombreux propriétaires de barrages n'ont pas pris les mesures nécessaires pour s'adapter ou pour évaluer les risques climatiques posés à leur infrastructure en raison du manque de motivation, du manque de ressources ou d'une préoccupation pour d'autres priorités. Compte tenu de la possibilité de répercussions des changements climatiques sur la conception et l'exploitation des barrages et du traitement incohérent de la question au Canada, des directives sont nécessaires sur la façon de s'adapter aux changements climatiques et sur ce que l'industrie est en mesure de faire en vue d'une gestion appropriée des risques climatiques pour les barrages.

Les changements climatiques devraient être pris en compte dans la conception, l'exploitation et l'entretien des barrages, selon une approche constante et adaptée au type, à la taille et au niveau de conséquence du barrage. Les mesures recommandées suivantes fournissent une feuille de route vers l'adaptation aux changements climatiques pour surmonter les obstacles actuels et saisir des occasions d'harmoniser l'industrie :

1. Évaluer les besoins en données relatives aux changements climatiques et en tenir compte par l'entremise de la recherche et de la collaboration.
   a. Déterminer le type de données de projection climatique dont les utilisateurs finaux ont besoin (propriétaires de barrages, consultants, opérateurs, organismes de réglementation, chercheurs) et les mesures les plus utiles pour l'évaluation et l'adaptation au vu des risques liés au climat. Cela comprend les considérations liées à la granularité géographique et temporelle acceptable ainsi que la méthode de prestation (p. ex., format GIS) convenant le mieux aux utilisateurs finaux.
   b. Élaborer une méthodologie normalisée basée sur les meilleures pratiques pour faciliter l'interprétation des données de projection des changements climatiques au niveau du site ou du bassin. L'analyse actuelle des données sur les changements climatiques exige une expertise en science du climat pour que puissent être formulées des hypothèses et des interprétations appropriées. D'autres recherches devraient être menées pour établir une méthodologie ou des meilleures pratiques claires qui pourraient être appliquées à différentes sources de données et adaptées aux barrages partout au Canada. Une solide collaboration entre les scientifiques du climat et les praticiens de l'industrie du barrage serait essentielle pour accomplir cette tâche. L'orientation devrait réaliser un équilibre entre la fermeté, afin d'éviter une mauvaise

interprétation des données, et l'agilité nécessaire pour réagir aux changements dans l'industrie à mesure que les données climatiques continuent d'évoluer et de se développer.

c. Effectuer une analyse des écarts géographiques pour déterminer où les données sont insuffisantes pour effectuer des évaluations des risques liés au climat.

2. Établir les meilleures pratiques et élaborer un document d'orientation pour mener des évaluations de la vulnérabilité et des risques liés aux changements climatiques pour les barrages.

a. Élaborer une norme ou des lignes directrices pour l'évaluation des risques et des vulnérabilités liés au climat en fonction des méthodologies d'évaluation des risques actuelles (telles que le protocole CVIIP ou la gestion des risques ISO 31000) et adaptées aux barrages, ou en fonction des méthodologies actuelles d'évaluation des modes de défaillance de sécurité des barrages (comme FMEA) avec l'inclusion du risque climatique. Le document devrait reposer sur les expériences et les leçons apprises des praticiens qui ont déjà effectué de telles évaluations, ainsi que sur les commentaires d'autres experts de l'industrie et de la communauté de la recherche. La consultation serait essentielle pour faire en sorte que le niveau de détail proposé pour cette évaluation soit réalisable pour les utilisateurs finaux.

b. Établir les meilleures pratiques pour estimer les répercussions des changements climatiques sur les crues de conception par l'entremise de recherche et de développement supplémentaires. Par exemple, certaines régions de l'Amérique du Nord ont adopté une augmentation standard en pourcentage de la crue de conception pour tenir compte des changements climatiques [124]. On devrait effectuer davantage de recherches pour déterminer l'échelle géographique à laquelle cela pourrait convenir pour les barrages au Canada, ou élaborer une méthodologie commune pour déterminer les impacts climatiques sur les crues de conception dans un bassin versant.

c. Dresser une liste des répercussions potentielles des changements climatiques sur les barrages que les praticiens pourraient prendre en compte dans une évaluation de la vulnérabilité en fonction de l'emplacement géographique et du type de barrage. Plusieurs d'entre elles ont été présentées dans le cadre de cette recherche. Une liste complète pourrait être élaborée pour une consultation plus poussée par les parties prenantes.

d. Établir des lignes directrices ou une norme pour l'examen des changements climatiques dans les nouveaux développements et les grands projets. Dans le cadre de tels projets, on pourrait voir des paramètres climatiques futurs dans les critères de conception et dans la prise de décisions de conception. Cela exigerait un langage et des considérations différentes en matière de risque lié au climat plutôt que des évaluations de l'infrastructure existante.

3. Établir les meilleures pratiques pour la prise de décision fondée sur les risques en ce qui a trait aux barrages, que ce soit en fonction du climat ou non.

a. Définir des paramètres acceptables pour évaluer le risque climatique pour les différents types de barrages et ses niveaux de conséquences au moyen de recherches et de consultations. Les tolérances au risque varient d'une organisation à l'autre et les niveaux de risque augmentent avec le niveau de conséquence d'un barrage. Une consultation approfondie avec les parties prenantes, les organismes de réglementation et le public sera nécessaire. L'objectif est de déterminer si les risques devraient être évalués par rapport aux autres risques dans un système de barrage, à la tolérance au risque de l'organisation ou à un système de classification établi, comme la classification potentielle du danger d'un barrage. Des mesures d'adaptation pourraient être recommandées pour les risques plus élevés si l'industrie a harmonisé les niveaux de risque.

b. Élaborer une ligne directrice ou une norme pour l'évaluation des risques liés au climat afin de guider les décideurs dans la mise en priorité des risques à la sécurité des barrages liés au climat et non liés au climat, et pour les activités à l'appui des directives d'évaluation des risques liés au climat suggérées à l'alinéa 2a. L'infrastructure et l'exploitation du barrage,

du bassin hydrographique et des autres infrastructures du système au fil de l'eau devraient être évaluées en tant que système intégral afin de dégager adéquatement les risques climatiques par rapport à d'autres priorités. Cela peut comprendre des conseils sur la prise de décision en cas d'incertitude liée aux données climatiques et au risque.

4. Élaborer un processus pour appuyer les prises de décision en matière d'adaptation en consultation avec les parties prenantes et les chercheurs qui ont travaillé sur l'adaptation climatique propre aux barrages. Le processus devrait tenir compte de l'aptitude de certaines organisations à élaborer des mesures d'adaptation en fonction de leurs besoins, de leurs ressources et de leurs capacités particuliers. Il pourrait comprendre un ensemble actuel de mesures ou de solutions d'adaptation qui ont été mises en œuvre au Canada et, si possible, à quel point elles ont été fructueuses. Cela pourrait contribuer à la résilience des barrages au Canada en guidant les propriétaires et les praticiens dans l'évaluation de tous les aspects du système de barrage, de l'exploitation et de l'organisation pour s'assurer qu'ils sont harmonisés dans la planification de l'adaptation.

5. Effectuer d'autres recherches sur les répercussions des changements climatiques sur les petits barrages et préparer, au besoin, un document d'orientation distinct sur les considérations d'adaptation au climat propres aux barrages à moindre ou à faible conséquence. Les petits barrages pourraient être affectés différemment en raison de périodes de retour moins rigoureuses pour la conception, de conséquences moins importantes, de ressources moins nombreuses et d'activités parfois plus exigeantes en main-d'œuvre, ce qui pourrait entraîner un risque climatique inférieur ou supérieur. Ce risque devrait être étudié en consultation avec les propriétaires de barrages plus petits dans tout le pays afin de déterminer comment et si une adaptation climatique devrait être effectuée pour cette application.

La participation des parties prenantes sera essentielle à la mise en œuvre des mesures recommandées, notamment :

- Scientifiques, chercheurs et experts en communication;
- Organismes d'élaboration de normes;
- Régulateurs;
- Groupes d'intérêt de l'industrie (ACB, CIGB, etc.);
- Ingénieurs et spécialistes des barrages; et
- Propriétaires de barrages.

D'autres parties prenantes devraient être consultées tout au long du processus d'élaboration, comme les communautés des Premières Nations, et des groupes de discussion particuliers pourraient être requis pour certains sujets, comme les petits barrages. La participation des parties prenantes et la représentation de partout au pays permettront de faire en sorte que les documents d'orientation fournissent des méthodologies réalisables, adaptables et pertinentes pour le contexte canadien.

Un autre domaine qui exige une étude plus approfondie est celui de l'impact des changements climatiques sur la gestion intégrée des bassins versants pour les systèmes fluviaux comptant plusieurs barrages et propriétaires de barrages en ce qui concerne la gestion des crues, les exigences environnementales en matière de bassins hydrographiques et les fourchettes opérationnelles réglementées, comme il est mentionné à la section 4.3.

6 Conclusions

Les objectifs de cette recherche étaient d'évaluer la mesure dans laquelle les barrages d'eau au Canada peuvent être vulnérables à un climat changeant, de cerner les meilleures pratiques d'adaptation aux changements climatiques pour les barrages et de discuter du besoin ou de l'occasion pour des solutions d'adaptation au climat, y compris des normes, des lignes directrices, de la recherche ou d'autres méthodes.

Il a été déterminé dans l'analyse documentaire que les barrages au Canada sont susceptibles d'être vulnérables aux changements climatiques de plusieurs façons, et que celles-ci varient considérablement en fonction de l'emplacement. La taille, la conception et les fonctions variables des barrages jouent également un rôle dans la façon dont les changements climatiques peuvent ou non les influencer. Les changements de précipitations et de température étaient les plus importants moteurs du changement. Les impacts potentiels connexes comprennent

l'augmentation des crues, les sécheresses, les feux de forêt, les crues hivernales, les tempêtes de verglas, la fonte du pergélisol, les débris et les embâcles glaciaires, et plusieurs autres.

Il a été constaté que les propriétaires et les praticiens du domaine des barrages sont engagés à différents niveaux dans le domaine des changements climatiques. Certains propriétaires de barrages plus grands ont du personnel formé en science du climat et ont effectué des évaluations de vulnérabilité propres au site pour comprendre les risques climatiques posés à leur barrage et pour appliquer des mesures d'adaptation au besoin. Cependant, certaines organisations ne sont pas prêtes à mettre en priorité les risques liés au climat avant qu'il devienne plus clair, voire certain, que leurs actifs pourraient être touchés. Un thème majeur dégagé dans cette recherche est l'incertitude quant à la disponibilité et à l'interprétation des données sur les changements climatiques, et, par conséquent, la façon d'utiliser cette information pour évaluer les risques climatiques et prendre des décisions éclairées. La plupart des propriétaires et ingénieurs de barrage ne sont pas particulièrement formés en science climatique ou en prises de décisions axées sur le risque. Il y a donc une occasion d'amélioration.

La disponibilité actuelle des données sur les changements climatiques et le manque de compréhension commune de la façon de les interpréter sont des obstacles qui devraient être abordés afin d'éclairer les lignes directrices et les normes futures. Dans la même veine, une compréhension des risques pour un actif à l'échelle du système serait nécessaire pour faire en sorte que les risques liés aux changements climatiques et non climatiques soient adéquatement classés en priorité afin d'intégrer les risques liés aux changements climatiques et leurs mesures d'atténuation correspondantes dans la planification du capital et de l'exploitation des barrages.

Certains propriétaires de barrages ont utilisé des outils d'évaluation des risques liés au climat pour comprendre les vulnérabilités potentielles de leurs actifs face aux changements climatiques, allant d'ateliers qualitatifs aux évaluations propres au site des projections climatiques et des impacts sur un système de barrage. En général, les propriétaires de barrages qui n'ont pas encore évalué les risques liés aux changements climatiques font appel à des conseils, bien qu'il existe des obstacles à la mise en œuvre de mesures d'adaptation aux changements climatiques partout au pays.

Les résultats de cette recherche démontrent le besoin d'une norme ou d'une ligne directrice qui fournit une méthodologie d'interprétation des données climatiques pour un site ou un bassin particulier, l'application de ces données pour déterminer les répercussions sur un système de barrage, l'évaluation des risques associée à ces impacts potentiels et l'identification de mesures d'adaptation ou d'outils précieux pour réagir aux risques climatiques. Des recherches et des consultations seraient nécessaires pour déterminer le niveau de détail approprié afin d'assurer la faisabilité et l'applicabilité aux différents types de barrages partout au pays, tout en maintenant des résultats reproductibles et approfondis.
Une étude plus approfondie est nécessaire pour déterminer les répercussions que les changements climatiques pourraient avoir sur les petits barrages, car leurs risques climatiques, leurs ressources et, par conséquent, leurs meilleures pratiques d'adaptation au climat diffèrent de ceux des grands barrages.
Les meilleures pratiques en matière d'adaptation aux changements climatiques, rassemblées dans une norme ou dans des lignes directrices, seraient avantageuses pour les propriétaires de barrage canadiens, ainsi que pour les praticiens, puisqu'elles pourraient révéler des risques inconnus et des outils en vue d'une adaptation appropriée aux changements climatiques.

Références

[1] Association canadienne des barrages, « Réglementation des barrages au Canada », 2021. [En ligne]. Accessible à l'adresse : https://cda.ca/dams-in-canada/regulation?lang=fr

[2] Commission mixte internationale, « Commission mixte internationale », 2020. [En ligne]. Accessible à l'adresse : https://ijc.org/fr

[3] Gouvernement du Canada. 1997. *Loi sur la sûreté et la réglementation nucléaires,* L.C. 1997, ch. 9). [En ligne]. Accessible à l'adresse : https://laws-lois.justice.gc.ca/fra/lois/n-28.3/

[4] Gouvernement du Canada. 1985. *Loi sur les pêches* (L.R.C. [1985], ch. F-14). [En ligne]. Accessible à l'adresse : https://laws-lois.justice.gc.ca/fra/lois/f-14/

[5] Gouvernement du Canada. 2002. *Loi sur les espèces en péril* (L.C. 2002, ch. 29). [En ligne]. Accessible à l'adresse : https://laws.justice.gc.ca/fra/lois/s-15.3/

[6] Gouvernement du Canada. 1999. *Loi canadienne sur la protection de l'environnement* (L.C. 1999, ch. 33). [En ligne]. Accessible à l'adresse : https://laws-lois.justice.gc.ca/fra/lois/c-15.31/

[7] Association canadienne des barrages, « Recommandations de sécurité des barrages 2007 (révisé en 2013) », données de Cataloguage avant publication de Bibliothèque et Archives Canada, 2013. [En ligne]. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://cda.ca/sites/default/uploads/files/CDA%20Dam%20Safety%20Guidelines%202013%20Edition-ToC.pdf

[8] Government of British Columbia. 2021. *Water Sustainability Act*. [En ligne]. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://www.bclaws.gov.bc.ca/civix/document/id/complete/statreg/40_2016

[9] Government of British Columbia. 2016. *Water Sustainability Act*. [En ligne]. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://www2.gov.bc.ca/gov/content/environment/air-land-water/water/laws-rules/water-sustainability-act

[10] Government of British Columbia. 2021. Dam Safety. [En ligne]. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://www2.gov.bc.ca/gov/content/environment/air-land-water/water/drought-flooding-dykes-dams/dam-safety

[11] Association of Professional Engineers and Geoscientists British Columbia (EGBC), "Legislated dam safety reviews in BC: APEGBC Professional Practice Guidelines V3.0," APEG, Burnaby, British Columbia, Canada, October 2014. [En ligne]. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://www.egbc.ca/getmedia/a373a764-1869-41b5-b07d-81d36a0698c3/APEGBC-Legislative-Dam-Safety-Reviews.pdf.aspx#:~:text=A%20legislated%20periodic%20review%20of,4)% 20of%20the%20Dam%20Safety

[12] Association of Professional Engineers and Geoscientists BC, "Site characterization for dam foundations in BC: APEGCB professional practice guidelines V1.2," APEG, Burnaby, British Columbia, Canada, 2016. [En ligne]. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://www.egbc.ca/getmedia/13381165-a596-48c2-bc31-2c7f89966d0d/2016_Site-Characterization-for-Dam-Foundations_WEB_V1-2.aspx

[13] Engineers and Geoscientists British Columbia, "Legislated flood assessments in a changing climate in BC", APEG, Burnaby, Birtish Columbia, Canada, 2018. [En ligne]. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://www.egbc.ca/getmedia/f5c2d7e9-26ad-4cb3-b528-940b3aaa9069/Legislated-Flood-Assessments-in-BC.pdf.aspx

[14] Province of Alberta. 2017. *Water Act Revised Status of Alberta* 2000 Chapter W-3. [En ligne]. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://www.qp.alberta.ca/documents/Acts/w03.pdf

[15] Government of Alberta. 2018. Alberta Dam and Canal Safety Directive. [En ligne]. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://open.alberta.ca/publications/9781460141571

[16] Province of Alberta. 2020. *Water Act:* Water (Ministerial) Regulation. [En ligne]. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://www.qp.alberta.ca/documents/Regs/1998_205.pdf

[17] Gouvernement de l'Ontario. 2019. *Loi sur l'aménagement des lacs et des rivières*, L.R.O. 1990, chap. L.3 [En ligne]. Accessible à l'adresse : https://www.ontario.ca/fr/lois/loi/90l03

[18] Gouvernement de l'Ontario. « Gestion des barrages ». Ontario.ca. https://www.ontario.ca/fr/page/gestion-des-barrages

[19] Gouvernement du Québec. « Règlements sur la sécurité des barrages ». Accessible à l'adresse : https://www.legisquebec.gouv.qc.ca/fr/document/rc/S-3.1.01,%20r.%201

[20] Gouvernement du Québec. 2020. *Loi sur la sécurité des barrages*. [En ligne]. Accessible à l'adresse : https://www.legisquebec.gouv.qc.ca/fr/document/lc/S-3.1.01

[21] Gouvernement du Québec. 2020. *Loi sur le régime des eaux*. Accessible à l'adresse : https://www.legisquebec.gouv.qc.ca/fr/document/lc/r-13

[22] Gouvernement du Québec. 2020. *Loi sur la qualité de l'environnement.* [En ligne]. Accessible à l'adresse : https://www.legisquebec.gouv.qc.ca/fr/document/lc/Q-2

[23] Gouvernement du Québec. 2020. *Loi sur la conservation et la mise en valeur de la faune.* [En ligne]. Accessible à l'adresse : https://www.legisquebec.gouv.qc.ca/fr/document/lc/c-61.1

[24] Government of Saskatchewan. 2005. *The Water Security Agency Act*, SS 2005, C W-8.1. [En ligne]. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://canlii.ca/t/549d5

[25] Gouvernement du Manitoba. 2021. *Loi sur les droits d'utilisation de l'eau*, C.P.L.M. c. W 80. [En ligne]. Accessible à l'adresse : https://web2.gov.mb.ca/laws/statutes/ccsm/w080f.php

[26] Gouvernement du Nouveau-Brunswick. 2020. *Loi sur l'assainissement de l'eau*, LN-B 1989, c. C -6.1. [En ligne]. Accessible à l'adresse : https://www.canlii.org/fr/nb/legis/lois/ln-b-1989-c-c-6.1/derniere/ln-b-1989-c-c-6.1.html

[27] Government of Nova Scotia. 1995. *Environment Act*, 1994-95, c.1, s.1. [En ligne]. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://nslegislature.ca/sites/default/files/legc/statutes/environment.pdf

[28] Government of Newfoundland and Labrador. 2013. *Water Resources Act*, SNL2002 Chapter W-4.01. [En ligne]. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://www.assembly.nl.ca/legislation/sr/statutes/w04-01.htm

[29] Government of Prince Edward Island. 2021. *Water Act*, SNL2002, Chapter W-4.01. [En ligne]. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://www.princeedwardisland.ca/en/information/environment-energy-and-climate-action/water-act

[30] Gouvernement du Yukon. 2003. *Loi sur les eaux*, SY 2003, ch. 19. [En ligne]. Accessible à l'adresse : https://legislation.yukon.ca/acts/waters.pdf

[31] Gouvernement du Canada. 2021. *Loi sur les eaux du Nunavut et le Tribunal des droits de surface du Nunavut* (L.C. 2002, ch.10). [En ligne]. Accessible à l'adresse : https://laws-lois.justice.gc.ca/fra/lois/n-28.8/

[32] Gouvernement du Canada. 2021. *Loi sur la gestion des ressources de la vallée du Mackenzie* (L.C. 1998, ch. 25). [En ligne]. Accessible à l'adresse : https://laws-lois.justice.gc.ca/fra/lois/m-0.2/

[33] Gouvernement des Territoires du Nord-Ouest. 2014. *Loi sur les eaux* (L.T.N-O. 2014, ch.18). [En ligne]. Accessible à l'adresse : https://www.justice.gov.nt.ca/en/files/legislation/waters/waters.a.pdf

[34] Association canadienne des barrages, « Les barrages au Canada », Ottawa, 2019

[35] Gouvernement du Canada. 2017. *Loi sur la sûreté et la réglementation nucléaires,* L.C. 1997, ch. 9). [En ligne]. Accessible à l'adresse : https://laws-lois.justice.gc.ca/fra/lois/n-28.3/

[36] Parcs Canada, « Directive du programme de sécurité des barrages pour les barrages et les structures de rétention d'eau de Parcs Canada », Gouvernement du Canada, Ottawa, 2009.

[37] E. Bush et G. Flato, « Rapport sur le climat changeant du Canada », Gouvernement du Canada, Ottawa, 2019. [En ligne]. Accessible à l'adresse : https://changingclimate.ca/CCCR2019/fr/chapitre/1-0/

[38] L. A. Vincent et al., "Observed trends in Canada's climate and influence of low-frequency variability modes", Journal of Climate, vol. 28, pp. 4545-4560, 2015, https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00697.1. [En ligne]. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/28/11/jcli-d-14-00697.1.xml

[39] X. Zhang et al., « Les changements de température et de précipitations au Canada », chapitre 4 du « Rapport sur le climat changeant du Canada », E. Bush et D.S. Lemmen (éd.), Gouvernement du Canada, Ottawa, Ontario, 2019. [En ligne]. Accessible à l'adresse : https://www.rncan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/energy/Climate-change/pdf/RCCC_Chapitre4-Les%20changements%20de%20tempe%CC%81rature%20et%20de%20pre%CC%81cipitations%20au%20Canada-1.pdf

[40] A. Shepard et al. "A reconciled estimate of ice-sheet mass balance", Science, vol. 338, no. 6111, pp. 1183-1189, Nov. 30, 2012. Consulté le : 14 janvier 2022, DOI : 10.1126/science.1228102. [En ligne]. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://ntrs.nasa.gov/citations/20140006608

[41] E. Mekis, L. A. Vincent, M. W. Shepard and X. Zhang, "Observed trends in severe weather conditions based on humidex, wind chill, and heavy rainfall events in Canada for 1953-2012", Atmosphere-Ocean, vol. 53, pp. 383-397, June 2015. Consulté le : 14 janvier 2022, DOI : 10.13140/RG.2.1.1816.2649. [En ligne]. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://www.researchgate.net/publication/280732424_Observed_Trends_in_Severe_Weather_Conditions_Based_on_Humidex_Wind_Chill_and_Heavy_Rainfall_Events_in_Canada_for_1953-2012?channel=doi&linkId=55c3a02008aea2d9bdc1c29e&showFulltext=true

[42] L. A. Vincent et al., "Observed trends in Canada's climate and influence of low-frequency variability modes", Journal of Climate, vol. 28, no.11, pp. 4545-4560, June 1, 2015. Consulté le : 14 janvier 2022, DOI : 10.1175/JCLI-D-14-00697.1. [En ligne]. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://www.jstor.org/stable/26195153

[43] L. A. Vincent, X. Zhang, E. Mekis, H. Wan and E. J. Bush, "Monitoring changes in Canada's climate: Trends in temperature and precipitation indices based on daily monitoring data", Atmosphere-Ocean, 2018.

[44] C. Derksen et al. « Évolution de la neige, de la glace et du pergélisol à l'échelle du Canada »; chapitre 5 du « Rapport sur le climat changeant du Canada », Gouvernement du Canada, Ottawa, 2019. [En ligne]. Accessible à l'adresse : https://www.rncan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/energy/Climate-change/pdf/RCCC_Chapitre5-Evolutiondelaneigedelaglaceetdupergelisolalechelle.pdf

[45] R. Sospedra-Alfonsa and W. Merryfield, "Influences of temperature and precipitation on historical and future snowpack and variability over the Northern Hemisphere in the Second Generation Canadian Earth System Model", Journal of Climate, vol. 30, no. 12, pp. 4633-4656, 2017. Consulté le : 14 janvier 2022, https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0612.1. [En ligne]. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/30/12/jcli-d-16-0612.1.xml

[46] M. Zemp et al., "Historically unprecedented global glacier changes in the early 21st century", Journal of Glaciology, vol. 61, no. 228, pp. 745-762, 2015. Consulté le : 14 janvier 2022, DOI : 10.3189/2015JoG15J017. [En ligne]. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-glaciology/article/historically-unprecedented-global-glacier-decline-in-the-early-21st-century/2F1E3ACB111A03F9BA83D11439F5D681

[47] J. Koch, B. Menounos and J. Clague, "Glacier change in Gerabaldi Provincial Park, southern Coast Mountains, British Columbia, since the Little Ice Age", Global and Planetary Change, vol. 66, no.3-4, pp. 161-178, 2009. Consulté le : 14 janvier 2022, https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2008.11.006. [En ligne]. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921818108001902

[48] C. Tennant and B. Menounos, "Glacier change of the Columbia Icefield, Canadian Rocky Mountains", Journal of Glaciology, vol. 59, no. 216, pp. 671-686, 2013. Consulté le : 14 janvier 2022, https://doi.org/10.3189/2013JoG12J135. [En ligne]. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-glaciology/article/glacier-change-of-the-columbia-icefield-canadian-rocky-mountains-19192009/5C559B9555753755FEC2AEC299035D5A

[49] M. Beedle, B. Menounos and R. Wheate, "Glacier change in the Cariboo Mountains, British Columbia, Canada (1952-2005)", The Cryosphere, vol. 9, pp. 65-80, 2015. Consulté le : 14 janvier 2022, DOI : 10.5194/tc-9-65-2015. [En ligne]. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://tc.copernicus.org/articles/9/65/2015/

[50] N. Barrand, R. Way, T. Bell and M. Sharp, "Recent changes in area and thickness of Torngat Mountain glaciers (northern Labrador, Canada)", The Cryosphere, vol. 11, pp. 157-168, 2017. Consulté le : 14 janvier 2022, DOI : 10.5194/tc-11-157-2017. [En ligne]. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://tc.copernicus.org/articles/11/157/2017/tc-11-157-2017.pdf

[51] N. Barrand and M. Sharp, "Sustained rapid shrinkage of Yukon glaciers since the 1957/58 International Geophysical Year", Geophysical Research Letters, vol. 37, no.7, 2010. Consulté le : 14 janvier 2022, https://doi.org/10.1029/2009GL042030. [En ligne]. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2009GL042030

[52] W. Abdalati et al., "Elevation changes of ice caps in the Canadian Arctic Archipelago", Journal of Geophysical Research, vol. 109, 2004. Consulté le : 14 janvier 2022, DOI : 10.1029/2003JF000045. [En ligne]. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://www.nasa.gov/pdf/121645main_2003JF000045-1_pub_1.pdf

[53] A. Gilbert et al., "Sensitivity of Barnes Ice Cap, Baffin Island, Canada, to climate state and internal dynamics", Journal of Geophysical Research, vol. 121, no. 8, pp. 1516-1539, 2016. Consulté le : 14 janvier 2022, https://doi.org/10.1002/2016JF003839. [En ligne]. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2016JF003839

[54] V. Radic and R. Hock, "Regionally differentiated contribution of mountain glaciers and ice caps to future sea-level rise", Nature Geoscience, vol. 4, pp. 91-94, 2011. Consulté le : 14 janvier 2022, https://doi.org/10.1038/ngeo1052. [En ligne]. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://www.nature.com/articles/ngeo1052

[55] V. Radic, A. Beedlow, R. Hock, E. Miles and J. G. Cogley, "Regional and global projections of twenty-first century glacier mass changes in response to climate scenarios from global climate models", Climate Dynamics, vol. 42, pp. 37-58, 2014, Consulté le : 14 janvier 2022, https://doi.org/10.1007/s00382-013-1719-7. [En ligne]. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-013-1719-7#citeas

[56] J. Wang, X. Bai, H. Hu, A. Clites, M. Colton and B. Lofgren, "Temporal and spatial variability of Great Lakes Ice Cover", Journal of Climate, vol. 25, pp. 1318-1329, 2012. Consulté le : Jan. 14, 2022. DOI : 10.1175/2011JCLI4066.1. [En ligne]. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://ciglr.seas.umich.edu/wp-content/uploads/2017/09/Wang_etal.pdf.pdf

[57] J. Du, J. Kimball, C. Duguay, Y. Kim and J. Watts, "Satellite microwave assessment of Northern Hemisphere lake ice phenology from 2002 to 2015", The Cryosphere, vol. 11, pp. 47-63, 2017. Consulté le : 14 janvier 2022, DOI : 10.5194/tc-11-47-2017. [En ligne]. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://tc.copernicus.org/articles/11/47/2017/tc-11-47-2017.pdf

[58] T. Prowse, "Lake and river ice in Canada; In Changing Cold Environments: A Canadian Perspective", 1st edition, (eds.) H. French, and O. Slaymaker, Jon Wiley & Sons, pp. 163-181, 2012. Consulté le : 14 janvier 2022, https://doi.org/10.1002/9781119950172.ch9. [En ligne]. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781119950172.ch9

[59] S. Beltaos and T. Prowse, "River-ice hydrology in a shrinking cryosphere", Hydrological Processes, vol. 23, no. 1, pp. 122-144, 2009. Consulté le : 1er janvier 2022, https://doi.org/10.1002/hyp.7165. [En ligne]. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/hyp.7165

[60] L. Brown and C. Duguay, "The fate of lake ice in the North American Arctic", The Cryosphere, vol. 5, no. 4, pp. 869-892, 2011. Consulté le : 1er janvier 2022, https://doi.org/10.5194/tc-5-869-2011. [En ligne]. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://tc.copernicus.org/articles/5/869/2011/

[61] Y. Dibike, T. Prowse, B. Bonsal, L. de Rham and T. Saloranta, "Simulation of North American lake-ice cover characteristics under contemporary and future climate conditions", International Journal of Climatology, vol. 32, no. 5, pp. 695-709, 2012. Consulté le : 1er janvier 2022, https://doi.org/10.1002/joc.2300. [En ligne]. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.2300

[62] T. Prowse, R. Shrestha, B. Bonsal and Y. Dibike, "Changing spring air-temperature gradients along large northern rivers: Implications for severity of river-ice floods", Geophysical Research Letters, vol. 37, 2010. Consulté le : 1er janvier 2022, DOI : 10.1029/2010GL044878, 2010. [En ligne]. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2010GL044878?__cf_chl_jschl_tk__=yr.HjUiR9xIMjORZ35A.mHnIlPsI7zjvFcLZf_QsX58-1642199004-0-gaNycGzNDVE

[63] V. Romanovsky et al., "Terrestrial permafrost; in Arctic Report Card 2017, (ed.) J. Richter-Menge, J.E. Overland, J.T. Mathis, and E. Osborne", Bulletin of the American Meteorological Society, vol. 99, no. 8, pp.161-165, 2017. Consulté le : 1er janvier 2022. [En ligne]. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://www.researchgate.net/publication/327076044_Terrestrial_Permafrost_in_State_of_the_Climate_in_2017

[64] S. Smith et al., "Thermal state of permafrost in North America – A contribution to the international Polar Year", Permafrost and Periglacial Processes, vol. 21, pp. 117-135, 2010. Consulté le : 1er janvier 2022, https://doi.org/10.1002/ppp.690

[65] M. Allard, D. Sarrazin et E. L'Herault, « Températures du sol dans des forages et près de la surface dans le nord-est du Canada, v. 1.4 (1988-2016), » Nordicana, 2016. Consulté le : 1er janvier 2022, DOI : 10.5885/45291SL-34F28A9491014AFD

[66] F. Bouchard, P. Francus, R. Pienitz, I. Laurion, and S. Feyte, "Subarctic thermokarst ponds: Investigating recent landscape evolution and sediment dynamics in thawed permafrost of northern Québec (Canada)", Arctic, Antarctic, and Alpine Research, vol. 46, pp. 251-271, 2014. Consulté le : 1er janvier 2022. [En ligne]. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://www.jstor.org/stable/24551743

[67] I. Beck, R. Ludwig, M. Bernier, E. Levesque, and J. Boike, "Assessing permafrost degradation and land cover changes (1986–2009) using remote sensing data over Umiujaq, sub-Arctic Québec", Permafrost and Periglacial Processes, vol. 26, pp. 129-141, 2015. Consulté le : 1er janvier 2022, https://doi.org/10.1002/ppp.1839

[68] S.D. Mamet, K.P. Chun, G.G.L. Kershaw, M.M. Loranty, and G.P. Kershaw, "Recent increases in permafrost thaw rates and areal loss of palsas in the western Northwest Territories, Canada", Permafrost and Periglacial Processes, vol. 28, pp. 619-633, 2017. Consulté le : 1er janvier 2022, https://doi.org/10.1002/ppp.1951

[69] M. James, A.G. Lewkowicz, S.L. Smith, and C.M. Miceli, "Multi-decadal degradation and persistence of permafrost in the Alaska Highway corridor, northwest Canada", Environmental Research Letters, vol. 8, 2013. Consulté le : 1er janvier 2022, DOI : 10.1088/1748-9326/8/4/045013

[70] T. Lantz and K. Turner, "Changes in lake area in response to thermokarst processes and climate in Old Crow Flats, Yukon", Journal of Geophysical Research, vol. 120, pp. 513-524, 2015. Consulté le : 1er janvier 2022, https://doi.org/10.1002/2014JG002744

[71] A.E. Sniderhan and J.L. Baltzer, "Growth dynamics of black spruce (Picea mariana) in a rapidly thawing discontinuous permafrost peatland," Journal of Geophysical Research, vol. 121, pp. 2988-3000, 2016. Consulté le : 1er janvier 2022, https://doi.org/10.1002/2016JG003528

[72] Y. Zhang, W. Chen, and D.W. Riseborough, "Transient projections of permafrost distribution in Canada during the 21st century under scenarios of climate change", Global and Planetary Change, vol. 60, p. 2008, 2008. Consulté le : 1er janvier 2022, https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.05.003

[73] P. Jain, X. Wang, and M.D. Flannigan, "Trend analysis of fire season length and extreme fire weather in North America between 1979 and 2015", International Journal of Wildland Fire, vol. 26, pp. 1009-1020, 2017. Consulté le : 1er janvier 2022, DOI : 10.1071/WF17008

[74] X. Wang, D.K. Thompson, G.A. Marshall, C. Tymstra, R. Carr, and M.D. Flannigan, "Increasing frequency of extreme fire weather in Canada with climate change", Climatic Change, vol. 130, pp. 573-586, 2015. Consulté le : 1er janvier 2022, https://doi.org/10.1007/s10584-015-1375-5

[75] B.D. Amiro et al., "Fire weather index system components for large fires in the Canadian boreal forest", International Journal of Wildland Fire, vol. 13, pp. 391-400, 2004. Consulté le : 1er janvier 2022. [En ligne]. https://www.researchgate.net/publication/236272101_Fire_weather_index_system_components_of_large_fires_in_the_Canadian_boreal_forest

[76] M.-P. Girardin, J. Tardif, M.D. Flannigan, B.M. Wotton, and Y. Bergeron, "Trends and periodicities in the Canadian Drought Code and their relationships with atmospheric circulation for the southern Canadian boreal forest", Canadian Journal of Forest Research, vol. 34, pp. 103-119, 2004. Consulté le : 1er janvier 2022, DOI : 10.1139/x03-195

[77] J. Podur, D.L. Martell, and K. Knight, "Statistical quality control analysis of forest fire activity in Canada", Canadian Journal of Forest Research, vol. 32, pp. 195-205, 2002. Consulté le : 1er janvier 2022.

[78] N.P. Gillett, A.J. Weaver, F.W. Zwiers, and M.D. Flannigan, "Detecting the effect of climate change on Canadian forest fires", Geophysical Research Letters, vol. 31, 2004. Consulté le : 1er janvier 2022, DOI : 10.1139/x01-183

[79] Ouranos, « Crues maximales probables et sécurité des barrages dans le climat du 21e siècle », Ouranos. Rapport présenté à la Division des impacts et de l'adaptation aux changements climatiques, Ressources naturelles Canada, 2015. [En ligne]. Accessible à l'adresse : https://fr.readkong.com/page/crues-maximales-probables-ouranos-2765852

[80] Ouranos, « Analyse de fréquence des crues et sécurité des barrages dans le climat du 21e siècle », Ouranos, Rapport soumis à la Division des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques, Ressources naturelles Canada, 2021. [En ligne]. Accessible à l'adresse : https://www.ouranos.ca/wp-content/uploads/FrigonKoenig_2021_FloodFreqAnalDamSafetyCC_FR.pdf?utm_source=Cyberimpact&utm_medium=email&utm_campaign=Infolettre-FR

[81] J.A.B. Canovas, M. Stoffel, K. Schraml, C. Corona and A. Gobiet, "Understanding the impact of climate change on debris-flow risk in a managed torrent: expected future damage versus maintenance costs", in Interpraevent Conference Proceeding, Lucerne, Switzerland, 2016.

[82] International Commission on Large Dams, "Global Climate Change, Dams, Reservoirs and Related Water Resources 2016", Bulletin 169.

[83] International Commission on Large Dams, "Flood Evaluation and Dam Safety," Bulletin 170, Paris, France, 2018.

[84] Ouranos, « Vers l'adaptation : Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec », Montréal, Québec, 2015. [En ligne]. Accessible à l'adresse : https://www.ouranos.ca/wp-content/uploads/SynthesePartie1.pdf

[85] R. Andrishak and F. Hicks, "Impact of climate change on the winter regime of the Peace River in Alberta", Government of Alberta, Edmonton, Canada, 2005. [En ligne]. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://open.alberta.ca/dataset/ad2bb776-fd53-46f7-b404-54759c465bc0/resource/dc0aff52-c1c6-403b-95b4-95c57f49aad2/download/7692.pdf

[86] GENIVAR, « National Engineering Vulnerability Assessment of Public Infrastructure to Climate Change », 2010. [En ligne]. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://www.welland.ca/Eng/pdfs/TP111002WellandVol001Final.pdf

[87] B. Turcotte, B. C. Burrell and S. Beltaos, "The impact of climate change on breakup ice jams in Canada", in CGU HS Committee on River Ice Processes and the Environment, Ottawa, 2019. [En ligne]. Accessible (en anglais) à l'adresse : http://www.cripe.ca/docs/proceedings/20/Turcotte-et-al-2019.pdf

[88] BC Hydro Generation Resource Management, "Site C clean energy project (volume 2, Appendix T technical data report: Climate change summary report", BC Hydro Generation Resource Management, Vancouver, BC, Canada, Dec. 2012. [En ligne]. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://www.ceaa-acee.gc.ca/050/documents_staticpost/63919/85328/Vol2_Appendix_T.pdf

[89] International Commission on Large Dams, "Integrated operation of hydropower stations and reservoirs", ICOLD Bulletin 173, 2016.

[90] J. Evers and A. Pathirana, "Adaptation to climate change in the Mekong River Basin: introduction to the special issue", Climate Change, vol. 149, pp. 1-11, 2018. Consulté le : 14 janvier 2022, 1 https://doi.org/10.1007/s10584-018-2242-y

[91] L. D. Brekke et al., "Climate change and water resources management: a federal perspective", U.S.G.S., Reston, Virginia, United-States, 2009. [En ligne]. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://pubs.usgs.gov/circ/1331/Circ1331.pdf

[92] Ouranos, « Learning to adapt to climate change », Montreal, Québec, Canada, 2010. [En ligne]. Accessible à l'adresse : https://www.ouranos.ca/wp-content/uploads/RapportDesjarlais2010_FR.pdf

[93] International Hydropower Association, "Hydropower sector climate resilience guide", London, United Kingdom, 2019. [En ligne]. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://assets-global.website-files.com/5f749e4b9399c80b5e421384/5fa7e38ce92a9c6b44e63414_hydropower_sector_climate_resilience_guide.pdf

[94] Association of State Dams Safety Officials, "Spencer dam failure investigation report", 2020.

[95] Gouvernement du Québec, « Aménagement d'une nouvelle centrale hydroélectrique en aval du réservoir Sainte-Marguerite-2 », Montréal, Québec, Canada. [En ligne]. Accessible à l'adresse : https://www.bape.gouv.qc.ca/fr/dossiers/amenagement-une-nouvelle-centrale-hydroelectrique-aval-reservoir-sainte-marguerite-2/

[96] G. Bourgeois, S. Dickson, R. Ness and D. Lapp, "Is your dam vulnerable to climate change? Using the PIEVC engineering protocol", in CDA 2010 Annual Conference, Niagara Falls, Ontario, 2010.

[97] M. Braun and E. Fournier, "Adaptation case studies in the energy sector – overcoming barriers to adaptation," ouranos.ca. Consulté le 14 janvier 2022. Accessible à l'adresse : https://ouranos.ca/wp-content/uploads/FicheBraun2017_FR.pdf

[98] B. Blackshear, T. Crocker, E. Drucker, J. Filoon, J. Knelman and M. Skiles, "Hydropower vulnerability and climate change – a framework for modeling the future of global hydroelectric resources", Middlebury College Environmental Studies Senior Seminar, Vermont, 2011. [En ligne]. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://www.middlebury.edu/media/view/352071/original

[99] M. Minville, F. Brissette, S. Krau and R. Leconte, "Adaptation to climate change in the management of a Canadian water-resources system exploited for hydropower", Water Resource Management, vol. 23, pp. 2965-2986, 2009, https://doi.org/10.1007/s11269-009-9418-1

[100] E. Fournier et al., « Valeur des actifs hydroélectriques et impacts physiques du changement climatique – Guide sur l'intégration des données climatiques dans la production d'énergie aux fins de modélisation de la valeur », Ouranos, Montréal, Québec, Canada, 2020. [En ligne]. Accessible à l'adresse : https://www.ouranos.ca/programs/evaluation-de-la-valeur-des-actifs-hydroelectriques/

[101] X. Chen and F. Hossain, "Understanding future safety of dams in a changing climate", Bulletin of the American Meteorological Society, vol. 100(8), pp. 1395-1404, 2019.

[102] U. Lall and P. C. Larrauri, « The Michigan dam failures are a warning. », nytimes.com. Consulté le 14 janvier 2022. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://www.nytimes.com/2020/05/27/opinion/michigan-edenville-dam.html

[103] L. Clarke, et al., 2018: "Sector Interactions, Multiple Stressors, and Complex Systems". *In* Impacts, Risks, and Adaptation in the United States: Fourth National Climate Assessment, Volume II [D.R. Reidmiller, C.W. Avery, D.R. Easterling, K.E. Kunkel, K.L.M. Lewis, T.K. Maycock, and B.C. Stewart (eds.)]. U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA, pp. 638–668. DOI : 10.7930/NCA4.2018.CH17. [En ligne]. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://nca2018.globalchange.gov/downloads/NCA4_Ch17_Complex-Systems_Full.pdf

[104] P. Concha and U. Lall, "Assessing the exposure of critical infrastructure and other assets to the climate induced failure of aging dams in the U.S.", final report for the global risk institute (GRI), 2020. [En ligne]. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://globalriskinstitute.org/publications/assessing-exposure-critical-infrastructure-other-assets-climate-induced-failure/

[105] Association of Professional Engineers and Geoscientists of BC (APEGBC), "Flood mapping in BC – APEGBC Professional practice guidelines", Version 3.0, 2017.

[106] B. Turcotte, B. Morse and G. Pelchat, "Impact of climate change on the frequency of dynamic breakup events and on the risk of ice-jam floods in Quebec, Canada", Water, vol. 12, no. 2891, 2020, https://doi.org/10.3390/w12102891

[107] S. Martin, "Inondations de l'hiver 2018 : facture de près de 1 M$ pour la Ville de Québec." Le Journal de Québec. Consulté le 14 janvier 2022. Accessible à l'adresse : https://www.journaldequebec.com/2018/06/28/inondations-de-lhiver2018-facture-de-pres-de-1m-pour-la-ville-de-quebec

[108] B. Morse and B. Turcotte, "Risque d'inondations par embâcles de glaces et estimation des débits hivernaux dans un contexte de changements climatiques", Université Laval, Québec, 2018. [En ligne]. Accessible à l'adresse : https://www.ouranos.ca/wp-content/uploads/RapportMorse2018.pdf

[109] Council of Canadian Academies, "Canada's top climate change risks", The Expert Panel on Climate Change Risks and Adaptation Potential, Council of Canadian Academies, Ottawa, Ontario, 2019. [En ligne]. Accessible à l'adresse : https://www.rapports-cac.ca/reports/accorder-la-priorite-aux-plus-importants-risques-poses-par-les-changements-climatiques/

[110] *Code canadien sur le calcul des ponts routiers*, CSA S6-19, Association canadienne de normalisation, Toronto, Ontario, Canada, 2019.

[111] *Études géotechniques pour les fondations de bâtiments construits dans les zones de pergélisol*, CAN/BNQ 2501-500/2017, Bureau de normalization du Québec, Québec, Québec, 2017.

[112] Asian Development Bank, "Climate risk and adaptation in the electric power sector", Mandaluyong City, Philippines, 2012. [En ligne]. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://www.adb.org/sites/default/files/publication/29889/climate-risks-adaptation-power-sector.pdf

[113] Atkins, "FD2628 Impact of climate change on dams & reservoirs – final guidance report", Department of Environment, Food and Rural Affairs United Kingdoms, 2013. [En ligne]. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://assets.publishing.service.gov.uk/media/6033dfa3e90e076605eab4de/Review_of_indirect_Impacts_of_climate_change_on_dams_and_reservoirs_final_report.pdf

[114] M. Colombo and C. Comi, "Hydro-thermo-mechanical analysis of an existing gravity dam undergoing alkali-silica reaction", Infrastructures, pp. 4, 55, 2019, https://doi.org/10.3390/infrastructures4030055

[115] UNESCO, "Climate Risk Informed Decision Analysis (CRIDA)", 2019. [En ligne]. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://en.unesco.org/crida

[116] J. Ebinger and W. Vergara, "Climate Impacts on Energy Systems Key Issues for Energy Sector Adaptation", Washington, D.C., United-States: The World Bank, 2011.

[117] US Army Corps of Engineers. "Climate preparedness and resilience – hydrology to support adaptation." U.S. Army Corps of Engineers. Consulté le 6 avril 2021. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://www.usace.army.mil/corpsclimate/Climate_Preparedness_and_Resilience/Hydrology_Support_Adaptation/

[118] D. Raff, L. Brekke, K. Werner, A. Wood and K. White, "Short-term water management decisions: user needs for improved climate, weather, and hydrologic information", The National Technical Information Service, 2013. [En ligne]. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://www.infrastructureusa.org/wp-content/uploads/2013/01/Short-Term_Water_Management_Decisions_Final_3_Jan_2013.pdf

[119] L. D. Brekke, "Addressing climate change in long-term water resources planning and management: user needs for improving tools and information title", The National Technical Information Service, 2011. [En ligne]. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://www.usbr.gov/climate/userneeds/docs/LTdoc.pdf

[120] National Research Council, "Dam and levee safety and community resilience: a vision for future practice", National Academies Press, Washington, DC, 2012, https://doi.org/10.17226/13393

[121] Ministère des Transports du Québec, Le Tome III – Ouvrages d'art, Les Publications du Québec, 2021.

[122] Ressources naturelles Canada (RNCan), « Procédures hydrologiques et hydrauliques fédérales pour la délimitation des zones inondables », 2019.

[123] Ressources naturelles Canada (RNCan), « Études de cas sur les changements climatiques dans la cartographie des plaines inondables », 2018.

[124] Engineers and Geoscientists British Columbia, "Professional practice guidelines – legislated flood assessments in a changing climate in BC", Version 2.1, 2018.

[125] Engineers and Geoscientists British Columbia, "Climate Change Action Plan", Version 1.0, 2021.

[126] Engineers and Geoscientists British Columbia, "Developing Climate Change-Resilient Designs for highway Infrastructures in British Columbia", Version 2.0, 2020.

[127] D. Roy, "Adaptive Policy Analysis of Saskatchewan's 25-Year Water Security Plan", Report submitted to Climate Change Impacts and Adaptation Division, Natural Resources Canada, 2013.

[128] Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, « Atlas hydroclimatique du Québec méridional », Expertise hydrique et barrages, 2018. [En ligne]. Accessible à l'adresse : https://www.cehq.gouv.qc.ca/atlas-hydroclimatique/Hydraulicite/Qmoy.htm

[129] J.D. Salas, M. L. Anderson, S. M. Papalexiou and F. Frances, "PMP and climate variability and change: a review", American Society of Civil Engineers, 2020.

[130] International Commission On Large Dams (ICOLD), "Challenges and needs for dams in the 21st century", Paris, France, 2014.

[131] E. Abdelnour, R. Adbelnour and L. Pelletier, "Ice management of the Beauharnois Canal with redesigned ice booms", in CGU HS Committee on River Ice Processes and the Environment, Ottawa, 2019.

[132] Ontario Power Generation (OPG). "Ice booms keep rivers flowing and winter's deep freeze at bay." Ontario Power Generation. Consulté le 11 mai 2021. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://www.opg.com/news-and-media/our-stories/story/ice-booms-keep-rivers-flowing/

[133] Public Infrastructure Engineering Vulnerability Committee (PIEVC), "PIEVC Program", 2020. [En ligne]. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://pievc.ca/

[134] Donneesclimatiques.ca, "Des données climatiques pour assurer l'avenir du Canada", 2021. [En ligne]. Accessible à l'adresse : https://donneesclimatiques.ca/

[135] Ingénieurs Canada, « Principes d'adaptation aux changements climatiques et d'atténuation de leurs effets – Guide public », 2018.

[136] Engineers and Geoscientists British Columbia, "Legislated dam safety reviews in BC", Version 3.0, 2016.

[137] European Committee for Standardization; European Committee for Electrotechnical Standardization, "Guide for addressing climate change adaption in standards", Brussel, Belgium, 2016.

[138] Institute for Catastrophic Loss Reduction; Climate Risk Institute, "PIEVC Program", 2021. [En ligne]. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://pievc.ca/

[139] Federal Energy Regulatory Commission, "Potential Failure Modes", 7 July 2020. [En ligne]. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://www.ferc.gov/industries-data/hydropower/dam-safety-and-inspections/potential-failure-modes-pfms

[140] Organisation internationale de normalisation, « ISO 31000 : Management du risque », (2018) [En ligne]. Accessible (en anglais) à l'adresse : https://www.iso.org/fr/iso-31000-risk-management.html

Appendix A Entrevues avec les parties prenantes

Questions d'entrevue

Une partie ou la totalité des questions générales ci-dessous ont été posées à tous les participants, dans le temps alloué. Des questions supplémentaires ont été posées en fonction des antécédents et du domaine d'expertise de la personne interrogée ainsi que de la discussion durant l'entrevue.

1. Selon votre expérience, vos connaissances et votre expérience à ce jour, comment les changements climatiques ont-ils une incidence sur la sécurité et l'exploitation des barrages? Comment vous attendriez-vous à ce que cela change au fur et à mesure que s'opèrent d'autres changements dans notre climat? Selon vous, quels sont les plus grands risques liés aux changements climatiques pour les barrages au Canada?

2. Comment croyez-vous que les changements climatiques devraient être pris en considération en ce qui concerne la sécurité, l'exploitation, la conception et l'entretien des barrages? (P. ex., meilleures pratiques, conseils, documentation, normes, exigences, procédures d'entretien et d'exploitation, plans de gestion des opérations, plans de gestion des actifs, dépenses prévues à l'avenir, évaluations des risques, planification financière, politiques.)

2.1 Selon vous, quelle serait la méthode la plus efficace pour encourager la mise en œuvre des considérations d'adaptation climatique pour les barrages? (P. ex., encourager la recherche universitaire et privée, appuyer la documentation publique, plateformes de données, programmes de financement, conférences et échanges de connaissances, comités ou groupes de travail, règles et règlements, codes, normes, conseils, règlements et lois, rien du tout, etc.)

3. Pouvez-vous nous donner des exemples notables de l'adaptation aux changements climatiques et de la résilience des barrages au Canada ou à l'échelle internationale qui, selon vous, ont connu du succès? (P. ex., adaptations propres au site, changements organisationnels, initiatives à grande échelle)

4. Avez-vous remarqué des tendances ou des changements dans la réglementation, les politiques, la gestion de l'exploitation, la conception, les meilleures pratiques, les discussions, l'intérêt général, etc. concernant l'adaptation des barrages aux changements climatiques?

5. Quels sont les obstacles à la prise en compte des changements climatiques en ce qui concerne la sécurité, l'exploitation, la conception et l'entretien des barrages? (P. ex., manque de documentation, de conseils, de temps, de financement, de motivation, d'expertise ou de connaissances.)

6. Quelles sont des ressources que vous avez pu voir ou utiliser pour traiter les risques climatiques ou l'adaptation? (P. ex., partenaires, outils, etc.)

7. Croyez-vous que des normes sont nécessaires pour tenir compte de l'adaptation aux changements climatiques pour les barrages? Si oui, quel en serait le format idéal (normes, directives, règlements) et comment, le cas échéant, pensez-vous que ces mesures devraient être appliquées?

7.1 Quel est votre point de vue concernant la variation entre les règlements provinciaux et territoriaux dans l'ensemble du Canada et comment est-elle liée à l'adaptation aux changements climatiques? Quels changements, le cas échéant, apporteraient un soutien sécuritaire à la mise en œuvre des pratiques d'adaptation aux changements climatiques pour les barrages au Canada?

7.2 Si vous croyez qu'une norme est nécessaire, que devrait être sa portée (fédérale, provinciale, au niveau de l'organisation)?

Recherche du Groupe CSA

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

GROUPE CSA™

© 2022 Association canadienne de normalisation. Tous droits réservés.