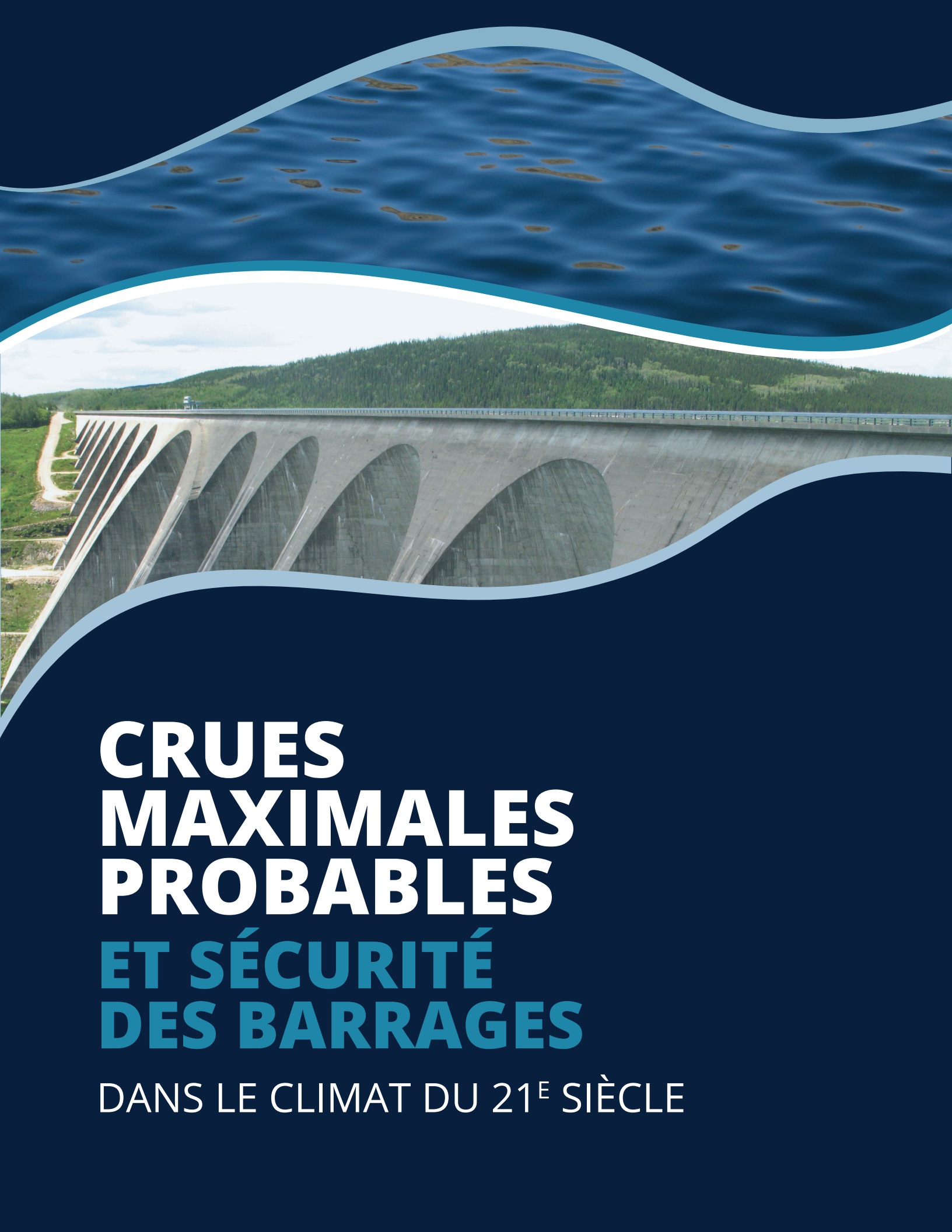




CRUES MAXIMALES PROBABLES ET SÉCURITÉ DES BARRAGES

DANS LE CLIMAT DU 21^E SIÈCLE



CITATION RECOMMANDÉE :

Ouranos 2015. Crues maximales probables et sécurité des barrages dans le climat du 21^e siècle. Rapport présenté à la Division des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques, Ressources naturelles Canada, 39 p.

**CE PROJET A ÉTÉ RÉALISÉ GRÂCE AU SOUTIEN DE LA
PLATEFORME D'ADAPTATION DE RESSOURCES NATURELLES CANADA**



Ressources naturelles
Canada

Natural Resources
Canada

Canada

DE L'AIDE FINANCIÈRE DE :



ET DE LA PARTICIPATION DE :



RioTinto



Organisations participantes

Ouranos

Établi à Montréal, le consortium Ouranos réalise et finance de la recherche sur la climatologie régionale, les impacts des changements climatiques et les mesures d'adaptation.

Hydro-Québec

Société d'État québécoise et plus important producteur d'hydroélectricité d'Amérique du Nord, Hydro-Québec produit 99 % de son électricité à partir de ressources renouvelables.

Ontario Power Generation

OPG, une société d'État ontarienne, produit plus de la moitié de l'électricité consommée dans la province, principalement à partir de centrales hydroélectriques et nucléaires.

Rio Tinto

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

Manitoba Hydro

Manitoba Hydro, la société publique d'électricité et de gaz naturel de la province, produit environ 98 % de son électricité dans ses centrales hydroélectriques.

Centre d'expertise hydrique du Québec

Le CEHQ veille à l'application de la Loi sur la sécurité des barrages auprès des propriétaires et s'assure de l'exploitation sécuritaire des quelque 780 barrages dont le gouvernement lui a confié la responsabilité. Le CEHQ collabore étroitement à la gestion du régime hydrique du Québec avec une préoccupation de sécurité, d'équité et de développement durable.

Institut national de la recherche scientifique – Eau, Terre et Environnement

Établi dans la ville de Québec, l'INRS réalise de la recherche appliquée et fondamentale en hydrologie, biochimie et géosciences.

CRÉDITS (EN ORDRE ALPHABÉTIQUE)

Coordination du projet :

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

Modélisation et analyse hydrologiques :

Noël Evora (Rio Tinto), Fanny Houdré (Hydro-Québec), Julie Lafleur (Centre d'expertise hydrique du Québec), Bruno Larouche (Rio Tinto), John Perdikaris (Ontario Power Generation), Charles Poirier (Centre d'expertise hydrique du Québec), Kevin Sagan (Université du Manitoba), Linda Salesse (Rio Tinto), Phil Slota (Manitoba Hydro), Nathalie Thiémonge (Hydro-Québec), Richard Turcotte (Centre d'expertise hydrique du Québec).

Scénarios climatiques :

Jacinthe Clavet-Gaumont (Ouranos),
Iris Klein (INRS-ETE), Dominique Paquin (Ouranos), Alain N. Rousseau (INRS-ETE).

Rédaction :

David Huard (Ouranos)
et tous les collaborateurs.

Autres contributions :

Nathalie Aerens (Ouranos), Valérie Bourduas-Crouhen (Ouranos), Ramón de Elía (Ouranos).

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

Tous droits réservés © 2015

Résumé



Dans un climat changeant, la prise en charge des transformations de la précipitation et de l'écoulement représente un défi de taille pour les propriétaires et exploitants de barrage. La plupart des barrages étant conçus pour durer plusieurs décennies, il est essentiel de comprendre l'incidence des changements climatiques sur les événements de pluies et de crues extrêmes afin d'assurer à long terme l'exploitation sécuritaire et efficace des ouvrages actuels et futurs.

Résumé (suite)

La présente étude examine les méthodes d'estimation du risque d'inondation aux fins de la conception des barrages et applique une méthode intégrant les impacts des changements climatiques projetés au risque d'inondation, puis propose des mesures d'adaptation possibles pour cinq bassins versants canadiens.

CONTEXTE

Les barrages procurent plusieurs avantages à la société, notamment la sécurité de l'approvisionnement en eau, la production hydroélectrique, la régulation du débit des cours d'eau et le contrôle des crues. Ces avantages comportent cependant une contrepartie, à savoir le risque d'une rupture de barrage pouvant entraîner d'importantes pertes humaines, environnementales et financières. La sécurité est donc un enjeu crucial pour les propriétaires et exploitants de barrage et joue un rôle déterminant dans l'élaboration et la mise en œuvre de systèmes de gestion de la sécurité destinés à protéger la société contre ces risques.

Au Canada, la sécurité des barrages est réglementée au niveau provincial. La plupart des provinces ont des lois incorporant des normes qui reflètent les recommandations de l'Association canadienne des barrages ou s'en inspirent. Ces recommandations renferment de nombreux critères de conception et exigences d'inspection, notamment la capacité de chaque barrage de prendre en charge une augmentation du volume d'eau généré par des crues extrêmes en amont; l'importance de cette augmentation varie selon la classification du risque du barrage et les conséquences d'une rupture ou d'une défaillance.

Selon cette classification, les risques de rupture de la plupart des barrages canadiens sont faibles ou modérés, quoique plusieurs grands barrages et autres ouvrages se retrouvent dans la catégorie de risque extrême étant donné les conséquences potentielles d'une rupture. Les barrages qui présentent un risque extrême doivent pouvoir prendre en charge en toute sécurité un débit entrant équivalant à la « crue maximale probable » (CMP). La CMP est la crue la plus forte pouvant raisonnablement survenir en un endroit particulier et dans une certaine période de l'année, compte tenu de processus météorologiques et hydrologiques.

Les valeurs de CMP se veulent des critères de conception objectifs; cependant, avec l'évolution des connaissances de la météorologie et de l'hydrologie ainsi que des outils et technologies mis au point par les spécialistes de la sécurité des barrages, ces valeurs seront appelées à changer.

BUT DE L'ÉTUDE

La science du changement climatique donne à penser que la « précipitation maximale probable » (PMP), soit le type de pluie qui entraîne souvent les CMP, augmentera au cours du 21^e siècle. Cependant, peu d'études ont porté sur les impacts régionaux potentiels des événements de PMP et sur l'intégration des risques climatiques potentiels dans la conception et l'exploitation des barrages. Le défi que doivent relever les

propriétaires et les autorités responsables des barrages consiste à mettre au point une méthode faisable et scientifiquement défendable permettant de quantifier les impacts du changement climatique sur la PMP et la CMP, puis d'utiliser cette méthode

afin de déterminer des mesures d'adaptation visant à gérer les risques associés aux impacts pour la durée de vie des ouvrages actuels et futurs.

Pour répondre à ce besoin, le consortium Ouranos, en partenariat avec des scientifiques, des propriétaires de barrage et des autorités réglementaires, a réalisé une étude pour mieux comprendre les risques climatiques auxquels les barrages canadiens sont exposés. Le but premier de ce projet était de passer en revue les méthodes actuelles de l'estimation de la PMP et de la CMP, de développer une méthodologie crédible que les propriétaires et les autorités réglementaires peuvent utiliser pour quantifier les impacts potentiels du changement climatique sur les estimations de PMP/CMP, puis d'identifier des mesures d'adaptation visant à gérer les risques qui y sont associés. L'étude a porté sur cinq bassins versants du Canada ayant des caractéristiques physiographiques propres et a analysé la variabilité des impacts selon les régions du pays, et plus particulièrement les impacts climatiques à l'horizon 2050 (2041-2070).

AU CANADA, LA SÉCURITÉ DES BARRAGES EST RÉGLEMENTÉE AU NIVEAU PROVINCIAL. LA PLUPART DES PROVINCES ONT DES LOIS INCORPORANT DES NORMES QUI REFLÈTENT LES RECOMMANDATIONS DE L'ASSOCIATION CANADIENNE DES BARRAGES OU S'EN INSPIRENT.

Résumé (suite)

MÉTHODOLOGIE

L'étude comportait trois phases. La première consistait en une revue de la littérature sur la méthode actuelle de calcul de la PMP/CMP au Canada et sur la recherche réalisée à ce jour sur les impacts du changement climatique sur la PMP/CMP. Des discussions avec les hydrologues participants ont permis d'améliorer notre connaissance des similarités et des différences dans les méthodologies utilisées pour évaluer les valeurs actuelles de la PMP et de la CMP pour les bassins versants étudiés. Cela a permis de déterminer les variables climatiques et les types d'expériences nécessaires à la quantification des impacts du changement climatique sur la CMP résultante. Une revue de la littérature sur les méthodes employées par les spécialistes de la sécurité des barrages pour la gestion d'une crue supérieure à la crue de conception a également été réalisée pour enrichir les discussions sur les mesures d'adaptation futures.

La phase 2 s'est concentrée sur l'élaboration d'une méthodologie visant à intégrer les impacts du changement climatique dans les variables météorologiques pertinentes. Au moyen d'un ensemble de 14 simulations de modèles régionaux de climat (MRC), les changements projetés pour la PMP de printemps, le couvert de neige 1/100 ans et la séquence de température critique ont été évalués pour chaque bassin, à l'horizon 2050. Les changements de la PMP d'été/automne ont également été évalués à l'horizon 2050, mais comme ils influaient peu sur le calcul de la future CMP, ils n'ont pas été utilisés dans l'analyse subséquente de la CMP.

Dans la phase 3, les facteurs de changement climatique, associés aux variables météorologiques évaluées dans la phase 2 ont servi à déterminer les impacts sur l'estimation de la CMP de printemps de chaque bassin versant. Pour permettre une comparaison pertinente des résultats obtenus pour les cinq bassins, trois expériences (et une expérience facultative) ont été réalisées pour comprendre les impacts relatifs de chaque facteur météorologique sur la CMP résultante. Pour déterminer l'ampleur et le niveau de confiance des changements de la CMP, chaque hydrologue a fourni des commentaires sur les mesures d'adaptation possibles en réponse à ces impacts, le cas échéant.

RÉSULTATS ET CONCLUSIONS

Les résultats de la phase 1 montrent que la CMP la plus forte de tous les temps est déclenchée par un événement de PMP de printemps coïncidant avec la fonte d'un couvert de neige 1/100 ans en fin de

saison pour les cinq bassins versants à l'étude. Les phases suivantes du projet se sont donc concentrées sur les CMP générées par cette combinaison critique.

Les résultats de la phase 2 montrent que le changement projeté des variables climatiques relatives à la CMP de printemps varie selon le bassin. Le changement médian de la PMP de chaque bassin se situe entre -10 % et +20 %, selon le bassin et la durée de la tempête. Pour les bassins versants situés le plus à l'est, les PMP à l'horizon 2050 augmenteront probablement; pour les bassins situés à l'est, aucun consensus n'a été établi. Pour le couvert de neige 1/100 ans évalué à partir des données des MRC, le changement médian varie entre -9 % et +8 %, dont une diminution probable dans les bassins situés au sud et une augmentation probable pour le bassin situé le plus au nord; pour les bassins du centre, aucun consensus n'a été établi. Pour les cinq bassins étudiés, les résultats indiquent un dégel printanier futur qui sera précoce, avec un changement médian allant de 5,5 à 9 jours.

Les résultats de la phase 3 montrent des hausses générales des estimations de la CMP, quoique l'importance de la hausse varie considérablement selon le bassin, l'expérience réalisée et le scénario climatique. Les changements médians dans les débits de pointe de la CMP se situaient entre -0,8 % et +20 %. Cependant, la fourchette des valeurs était étendue : dans l'ensemble, les changements projetés dans les débits de pointe se situaient entre -25 % et +90 %, selon le bassin et le scénario climatique. Les changements dans le volume total de la CMP étaient en règle générale moins extrêmes que dans les débits de pointe; dans plusieurs cas, les réductions projetées du couvert de neige compensaient en partie les hausses projetées de la PMP du bassin.

Bien que les résultats de l'étude indiquent que les valeurs des CMP futures pourront augmenter en raison du changement climatique, il est plus difficile de déterminer clairement si les investissements requis en vue de prendre en charge ces événements improbables sont justifiés dans tous les cas. Compte tenu du degré d'incertitude dans les projections des CMP individuelles par rapport aux changements médians projetés, il a été déterminé que les mesures d'adaptation d'ordre réglementaire et non structurel constituaient le moyen privilégié de gérer les impacts potentiels du changement climatique sur le risque posé par les CMP. Les participants ont également reconnu le mérite de réaliser une analyse fondée sur le risque pour déterminer le volume d'eau maximal qu'un ouvrage donné devrait pouvoir prendre en charge.

Table des matières

Des barrages construits dans un objectif de sécurité	11
Le point de bascule du climat	12
Un effet de serre contesté	12
Bilan énergétique et mécanismes de rétroaction	13
Évaluations des impacts	14
La crue la plus forte de tous les temps	15
Précipitation maximale probable	15
Crue maximale probable	16
Utiliser les simulations climatiques	18
Les crues maximales probables au Canada	21
Mattagami	22
Manic-5	24
Kénogami	26
Saguenay–Lac-St-Jean	28
Cours inférieur du fleuve Nelson	30
Les barrages au 21^e siècle – Solutions d’adaptation	32
Abréviations	38
Références	39

Des barrages construits dans un objectif de sécurité

La conception, la construction et la maintenance des barrages actuels s'appuient sur des millénaires d'expérience. Le plus ancien barrage encore exploité aujourd'hui a été construit il y a plus de 3 000 ans par le pharaon Sethi, sur le territoire actuel de la Syrie. Au cours des siècles, l'homme a érigé des barrages non seulement pour stocker de l'eau destinée à la consommation, à l'irrigation et à la navigation, mais aussi pour contrôler les crues. Plus près de nous, les barrages ont servi à fournir l'énergie mécanique qui alimentait moulins et pompes, et plus tard, à produire de l'électricité. Ces avantages comportent cependant un coût, à savoir le risque de ruptures de barrage et d'inondations catastrophiques. En un sens, nous construisons des barrages si les avantages récurrents l'emportent sur les dommages potentiels qui, bien qu'improbables, seraient très étendus.



Devant le coût élevé des bris de barrage, les organismes dirigeants ont imposé une réglementation aux propriétaires de barrage. Au Canada, la sécurité des barrages est une compétence provinciale et les règlements s'inspirent souvent des lignes directrices de l'Association canadienne des barrages (CDA, 2013). Celles-ci classifient les barrages en fonction de leur taille et des conséquences d'une rupture sur la population, l'environnement et l'économie, selon une échelle de risque allant de faible à extrême. La conception, les critères de construction, le calendrier d'inspection et la fréquence des contrôles sont établis selon la classification du barrage. Par exemple, les barrages dont le niveau de risque est considéré comme étant élevé ou très élevé doivent pouvoir résister à l'écoulement le plus abondant se produisant en moyenne une fois tous les 1 000 ans. Dans la pratique, cela veut dire qu'il faut installer des vannes d'évacuation suffisamment larges pour recevoir et canaliser l'écoulement vers l'aval tout

CMP : LA CRUE LA PLUS FORTE POUVANT RAISONNABLEMENT SURVENIR EN UN ENDROIT PARTICULIER ET DANS UNE CERTAINE PÉRIODE DE L'ANNÉE, COMPTE TENU DES PROCESSUS MÉTÉOROLOGIQUES ET HYDROLOGIQUES.

en maintenant les niveaux d'eau des réservoirs en deçà des seuils critiques. Sinon, dès que l'eau passe par-dessus la digue, l'infiltration et le trop-plein érodent et affaiblissent la crête dans une réaction en chaîne qui provoque tôt ou tard la rupture du barrage.

Les barrages présentant un risque extrême doivent respecter des exigences fondées sur le concept de crue maximale probable (CMP). La CMP est la crue la plus forte qui pourrait raisonnablement survenir dans un endroit particulier et à une certaine période de l'année, compte tenu des processus météorologiques et hydrologiques. Elle est considérée comme étant la limite supérieure de la crue, de sorte que le barrage devrait être construit de manière à résister à la quantité de pluie et de fonte de neige la plus grande possible, basée sur notre compréhension du monde physique. Les valeurs de la CMP se veulent des critères objectifs, mais elles dépendent en dernier ressort de l'évolution de nos connaissances météorologiques et hydrologiques. Le défi tient à ce que la CMP, par définition, dépasse tout ce qui a été observé jusqu'à maintenant – la concomitance d'événements rares et hautement improbables qui créent la « tempête parfaite ».

Le concept de la CMP et de la méthodologie servant à la calculer remontent aux années 1930 (Tomlinson et Kappel, 2009), à une époque où les données météorologiques de qualité étaient limitées et où les calculs se faisaient manuellement. Aujourd'hui, les observations satellitaires et la capacité de calcul nous permettent de moderniser, voire d'améliorer notre estimation des CMP. Grâce à une meilleure compréhension des processus climatiques, il est possible de modéliser et de simuler le climat dans cinquante ou cent ans d'ici et d'en déduire les conséquences sur l'intensité des crues. Ces simulations climatiques, qui reproduisent les observations historiques, laissent croire que d'ici 2070-2100 le type de pluies à l'origine des CMP augmentera de 20 à 30 % (Kunkel *et al.*, 2013). Cela est préoccupant pour les propriétaires de barrage, car bon nombre d'ouvrages actuels seront encore en activité à ce moment-là. De plus, la croissance démographique et l'intensification du développement

augmenteront vraisemblablement notre dépendance aux avantages que procurent les barrages ainsi que notre exposition et notre vulnérabilité aux ruptures catastrophiques.

Pour mieux comprendre les risques que les changements climatiques posent pour les barrages, le consortium Ouranos, en collaboration avec l'INRS-ETE, Hydro-Québec, Ontario Power Generation, Rio Tinto, Manitoba Hydro et le Centre d'expertise hydrique du Québec, a évalué les valeurs des CMP à l'horizon 2050 (la période 2041-2070). Le présent rapport fournit certains résultats du projet et vise à élargir la discussion sur les risques potentiels et les mesures d'adaptation.

Le point de bascule du climat

L'idée du changement radical des conditions climatiques n'est pas nouvelle. L'épopée de Gilgamesh, un récit vieux de 4 000 ans, raconte qu'un déluge s'est abattu sur la terre. Le concept, cependant, n'a pas été reconnu comme une proposition scientifique crédible avant que de fins observateurs constatent la présence de moraines et de gros blocs rocheux transportés par les glaciers dans des zones tempérées où il n'y avait aucune trace de glacier sur des centaines de kilomètres à la ronde. La quête d'une explication pour ces périodes glaciaires révolues – la dérive des glaciers loin dans le sud – était une activité populaire au 19^e siècle et a donné naissance à toutes sortes de théories. À l'époque, on ne connaissait pas encore la source de l'énergie solaire, ce qui limitait considérablement la pertinence des explications. Le mystère sera élucidé avec la découverte des forces atomiques et de la physique quantique qui, incidemment, jouera un rôle crucial dans la compréhension du phénomène qu'on surnommait de façon un peu simpliste l'effet de serre.



UN EFFET DE SERRE CONTESTÉ

La fonction de serre de l'atmosphère a été pressentie en 1820 par Joseph Fourier, qui a conclu de ses travaux sur la conduction thermique que la chaleur provenant des profondeurs de la terre était beaucoup trop faible pour réchauffer la terre. Fourier a également reconnu que la quantité de chaleur provenant du soleil ne pouvait à elle seule expliquer la température de la terre, qui aurait dû être plus fraîche. Soit que les étoiles procuraient suffisamment de lumière pour réchauffer la planète, soit que l'atmosphère jouait un quelconque rôle isolant en emprisonnant la chaleur de rayonnement.

Puis, en 1859, grâce à un ingénieux appareil expérimental, John Tyndall a systématiquement mesuré l'opacité de divers gaz au rayonnement infrarouge, que l'on nommait chaleur noire à l'époque. La vapeur d'eau et le dioxyde de carbone (CO₂) semblaient être les principaux gaz capables d'intercepter l'infrarouge, ce qui a amené le chimiste suédois Svante Arrhenius à suggérer en 1896 que la hausse des émissions du CO₂ produit par la combustion du charbon réchaufferait la terre. Arrhenius, loin d'y voir un problème, considérait que des climats plus doux avantageraient la Suède (Arrhenius, 1896). Mais cette idée voulant que le CO₂ agisse comme un bouton de commande climatique a été rapidement mise en doute. En 1900, Knut Angstrom publiait les résultats d'une expérience menée en laboratoire montrant que la vapeur d'eau absorbait les mêmes fréquences infrarouges que le CO₂ et que 100 % des infrarouges étaient déjà bloqués par les concentrations actuelles de CO₂. Ensemble, ces mesures laissaient entendre que l'absorption du CO₂ avait déjà atteint son maximum (saturation) et discréditaient l'idée d'Arrhenius voulant que les émissions de CO₂ aient un effet sur le climat.

La lacune dans les déductions d'Angstrom ne sera révélée qu'en 1931 par Edward Hulburt, un spécialiste de la haute atmosphère. Ce dernier a essentiellement démontré que les températures dans la partie inférieure de l'atmosphère dépendaient des propriétés optiques de la haute atmosphère – 12 kilomètres au-dessus de la terre –, où l'air est plus frais, plus sec et moins dense. À de telles altitudes, c'est le CO₂, et non la vapeur d'eau, qui dicte les propriétés radiatives de l'atmosphère. Hulburt a aussi montré qu'il y a toujours une altitude à laquelle la densité de l'air est suffisamment faible pour permettre à des quantités plus élevées de CO₂ d'augmenter l'absorption de l'infrarouge, réfutant ainsi la théorie de la saturation d'Angstrom (Hulburt, 1931).

Les travaux d'Hulburt sont passés presque inaperçus jusqu'à ce que Gilbert Plass rétablisse 25 ans plus tard la crédibilité de l'hypothèse du CO₂ à l'aide d'un modèle numérique détaillé décrivant l'atmosphère comme une série de couches superposées (Plass,

1956). Ses résultats suggéraient que la terre se réchaufferait d'environ 3,6 °C si on doublait les concentrations atmosphériques de CO₂. Quelques années plus tard, en 1960, les mesures systématiques et ultra-précises des concentrations de CO₂ réalisées par Charles David Keeling ont prouvé sans l'ombre d'un doute que le carbone émis par la combustion du charbon, du pétrole et de l'essence s'accumulait de façon continue dans l'atmosphère.

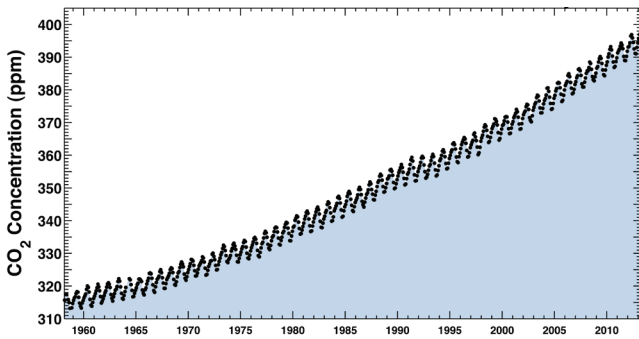


Figure 1 Concentration atmosphérique de CO₂ mesurée à l'Observatoire du Mauna Loa (Hawaï) de la National Oceanic and Atmospheric Administration. Source : https://scripps.ucsd.edu/programs/keelingcurve/wp-content/uploads/sites/28/2013/04/mlo_full_record.jpg.

BILAN ÉNERGÉTIQUE ET MÉCANISMES DE RÉTROACTION

En 2015, les concentrations de CO₂ ont atteint 400 ppm, bien au-delà des 320 ppm mesurées par Keeling en 1960 et des valeurs préindustrielles d'environ 280 ppm évaluées à partir de carottes glaciaires. Le CO₂ et d'autres gaz à effet de serre (GES) ont fait basculer l'équilibre radiatif de la terre, l'énergie entrante dépassant de $0,6 \pm 0,4$ W/m² l'infrarouge sortant au sommet de l'atmosphère (Stephens *et al.*, 2012). Cette quantité d'énergie, petite mais positive, ajoute lentement de la chaleur à la planète et réchauffe les océans et l'air. Une partie de cette chaleur fait fondre la glace de terre et de mer, ce qui réduit

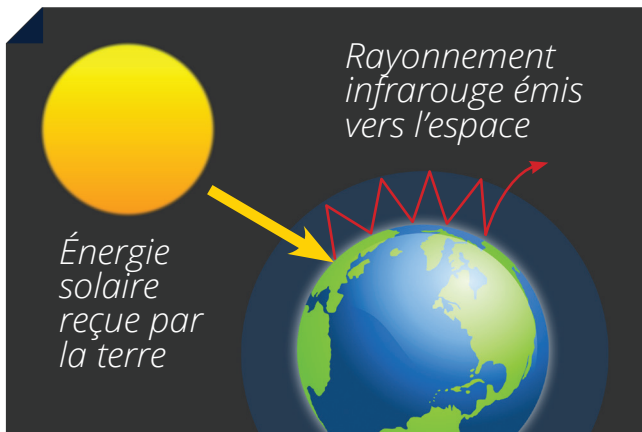


Figure 2 L'équilibre radiatif récent de la terre montre que l'énergie solaire entrante dépasse l'énergie infrarouge sortante au sommet de l'atmosphère, ce qui ajoute de la chaleur au système terrestre.

en retour l'albédo (la réflectivité) de la terre et provoque une absorption de chaleur encore plus grande, ces réactions en chaîne étant entraînées par une boucle de rétroaction positive.

Pour comprendre la physique du système climatique, il est essentiel de comprendre les boucles de rétroaction telles que l'effet glace-albédo. L'une des rétroactions positives les plus importantes est liée à la vapeur d'eau. Quiconque porte des lunettes sait que la vapeur d'eau se condense en refroidissant. À l'inverse, l'eau s'évapore lorsque la température augmente – c'est le principe du sèche-linge. L'équation de Clausius-Clapeyron, développée au 19^e siècle par le physicien allemand Rudolf Clausius, permet aux scientifiques de calculer la relation entre la vapeur d'eau atmosphérique (à saturation) et la température. À partir de cette équation, nous trouvons qu'à pression constante, pour chaque augmentation de la température de l'air d'un degré Celsius, 7 % plus d'eau demeure dans la phase de vapeur avant de se condenser. Comme la vapeur d'eau est un puissant gaz à effet de serre, une plus grande humidité hausse la température, déclenchant ainsi une boucle de rétroaction à réponse rapide qui amplifie le réchauffement lié au CO₂.

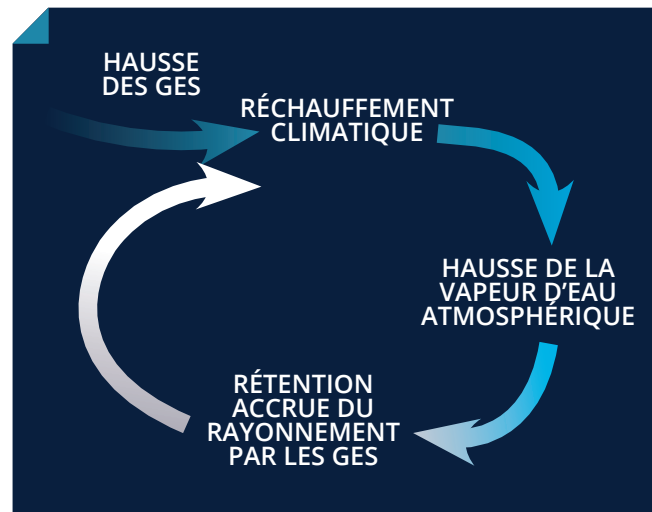


Figure 3 Boucle de rétroaction de la vapeur d'eau : des concentrations plus élevées de GES augmentent l'absorption du rayonnement infrarouge sortant, entraînant de l'air plus chaud et une plus grande quantité de vapeur d'eau (elle-même un puissant GES), amplifiant à son tour le réchauffement causé par la hausse initiale des GES.

ÉVALUATIONS DES IMPACTS

En plus de jouer un rôle dans la rétroaction positive, l'augmentation des taux d'évaporation et d'humidité a aussi une incidence sur le cycle de l'eau. L'on pourrait croire qu'une plus grande quantité d'humidité dans l'air augmenterait la précipitation partout, mais la réalité n'est pas si simple. Des changements dans la pression et les vents modifient les trajectoires de la vapeur d'eau autour de la terre et laissent en moyenne plus ou moins de précipitations sur certaines régions qu'avant. Bien que ces changements dans la précipitation saisonnière puissent avoir d'importantes conséquences sur la production d'hydroélectricité, la probabilité croissante d'événements de pluies intenses est tout aussi préoccupante. Avec une capacité de rétention de l'humidité plus élevée, l'atmosphère acquiert un potentiel accru de production de fortes quantités de pluie sur de courtes périodes. En fait, les observations historiques et les simulations numériques du climat montrent des tendances à la hausse dans la fréquence et l'intensité d'événements de précipitations extrêmes au Canada et dans la plupart des régions des États-Unis (IPCC, 2012).

Des précipitations extrêmes plus intenses ne signifient pas nécessairement que les barrages doivent s'adapter à des écoulements plus extrêmes. Au Canada, de nombreux barrages sont conçus en fonction des crues printanières, qui dépendent fortement de la fonte de neige. Les températures plus chaudes devraient entraîner une baisse des chutes de neige dans la plupart des régions (quoiqu'il y ait des exceptions), générant une fonte moins importante au printemps. L'évaluation des futurs écoulements extrêmes doit se faire systématiquement, en veillant à bien pondérer tous les facteurs climatiques jouant un rôle dans le calcul de la CMP.

Une évaluation rigoureuse des risques liés à la sécurité des barrages dans un climat changeant doit prendre en compte de nombreuses incertitudes, la première et la plus importante à considérer étant l'incertitude liée au modèle. Malgré les progrès réalisés, les modèles climatiques demeurent des approximations relativement grossières du monde réel, au sein duquel les processus complexes interagissent entre eux. Par conséquent, les modèles mis au point par des équipes indépendantes n'utilisant pas les mêmes représentations dégagent parfois des projections différentes, et même très différentes dans certains cas, surtout quand on s'éloigne dans le futur. Bien que ces différences puissent être attribuables aux raffinements de certains modèles seulement, la fourchette des résultats des modèles est habituellement interprétée comme une description approximative de l'incertitude scientifique générale liée aux processus climatiques. Pour cette raison, les études d'impacts climatiques s'appuient sur des douzaines de modèles afin d'obtenir autant que possible l'éventail complet de tous les futurs potentiels.

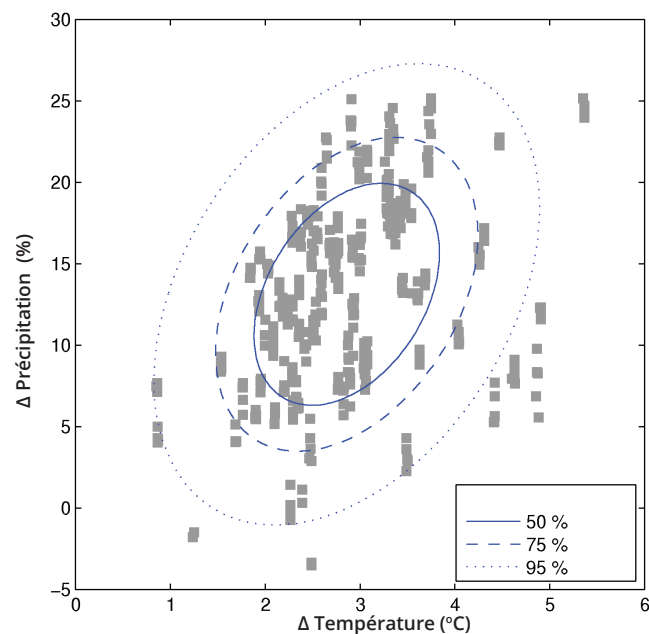


Figure 4 Illustration des incertitudes liées aux changements projetés de la précipitation annuelle et de la température sur un bassin versant à l'horizon 2050 (par rapport au climat actuel), obtenues par un grand ensemble de simulations de modèles climatiques globaux basés sur divers scénarios d'émissions futures. Source : Braun, Ouranos, 2015.

Une autre importante source d'incertitude a trait au scénario des gaz à effet de serre et aérosols décrivant l'évolution future du CO₂, du méthane et d'autres composés atmosphériques émis par l'activité humaine (soit les SRES et, plus récemment, les RCP). Les niveaux d'émissions futures dépendent du coût de l'énergie renouvelable, des réserves prouvées de combustibles fossiles, de la réglementation des États et de l'industrie, de la démographie, etc. Ces facteurs ne relèvent pas de la science du climat et sont étudiés par des équipes multidisciplinaires composées d'économistes et d'analystes de système. Même si un grand nombre de scénarios d'émissions ont été publiés, les climatologues coordonnent leurs expériences communes en sélectionnant quelques scénarios représentant toute la gamme des niveaux d'émissions. Ces scénarios sont lancés avec des conditions observées, puis divergent lentement dans le temps. La similitude initiale des scénarios d'émissions et l'inertie du système climatique sont telles que le choix du scénario d'émissions influe peu sur les résultats climatiques avant 2040.

Finalement, une autre importante source d'incertitude est la variabilité naturelle et aléatoire du climat. Le système climatique évolue dans un flux perpétuel : il passe d'un état à un autre (les phénomènes d'El Niño et de La Niña), subit des éruptions volcaniques émettant d'énormes quantités d'aérosols refroidissants et se fait constamment secouer par les interactions dynamiques prenant place sur la planète entre les océans, l'atmosphère, le sol et les glaciers. Même avec un rayonnement solaire constant et une

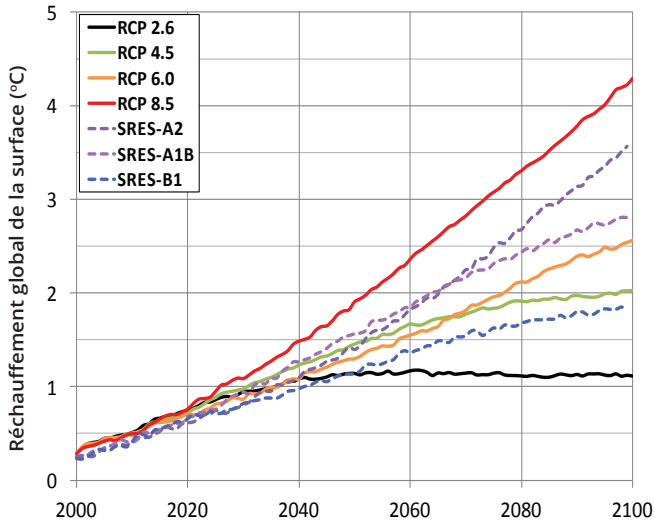


Figure 5 Trajectoires du réchauffement annuel modélisé à la surface du globe (par rapport à la période 1980-1999) associées à divers scénarios d'émissions futures de GES et d'aérosols. Source : Gervais, Manitoba Hydro, 2015.

composition atmosphérique stable, la terre connaîtrait des années chaudes et des années froides, des périodes pluvieuses et des périodes sèches. Cette variabilité naturelle rend encore plus difficile le calcul de la probabilité d'événements extrêmes. La précipitation maximale pour une période de 30 ans pourrait être très différente d'une autre période de précipitation maximale de 30 ans dans un climat semblable, simplement à cause du hasard. Cette incertitude d'échantillonnage oblige les modélisateurs du climat à effectuer de nombreuses simulations (membres) du même modèle et du même scénario d'émissions de gaz à effet de serre et aérosols : ils obtiennent ainsi un plus grand nombre d'années de simulation et de meilleures statistiques sur les événements rares.

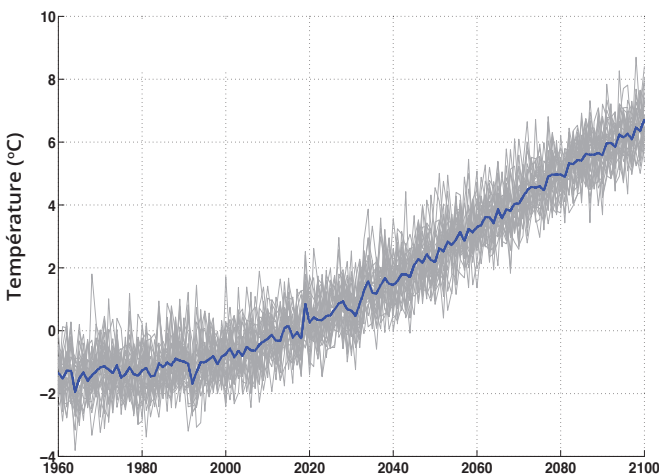


Figure 6 Exemple de la variabilité naturelle du climat montrant l'évolution de la température sur un bassin versant étudié par 30 membres du même modèle climatique global (CESM1, avec scénario RCP 8.5 ultérieur à 2005). La ligne bleue correspond à la moyenne de l'ensemble. Source : Willibald, Ouranos, 2015.

La crue la plus forte de tous les temps

Les risques d'inondation s'évaluent souvent en termes de probabilités. Par exemple, sur certains territoires, les petits barrages sont conçus de façon à gérer un écoulement dont la probabilité de dépassement est, en moyenne, d'une fois tous les 100 ans. Cela veut dire qu'il y a chaque année une chance sur 100 que cet écoulement soit supérieur à cette valeur. Le calcul des événements 1/100 ans est relativement simple : il s'agit d'ajuster une distribution statistique aux données historiques, puis de trouver la valeur qui, au sein de cette distribution, a une probabilité de dépassement de 1 %.

PRÉCIPITATION MAXIMALE PROBABLE

En ce qui concerne les barrages qui présentent un danger extrême, la population espère habituellement que ceux-ci soient conçus de manière à obtenir une probabilité quasi nulle de dépassement de la capacité d'écoulement de la crue de conception. Comme cela ne se limite pas à une question de statistique, les hydrométéorologues ont mis au point les concepts de précipitation maximale probable (PMP) et de crue maximale probable (CMP) (Myers, 1967). Le terme probable ne se rapporte pas à la précipitation ni à la crue, mais au fait que divers experts obtiendront diverses valeurs de PMP et de CMP, ce qui suggère une incertitude quant à la valeur numérique. L'Organisation météorologique mondiale définit la PMP comme étant la quantité de précipitation la plus élevée pouvant s'accumuler dans un bassin versant en un temps donné et à une certaine période de l'année (WMO, 2009). Le défi consiste à trouver les valeurs de PMP les plus justes possible, car une sous-estimation accroît le risque de rupture du barrage et une surestimation entraîne des coûts de construction et de maintenance inutiles.

Il vaut la peine de rappeler que les PMP se rapportent à une région, une période de l'année et une durée. Pour illustrer la vaste étendue de l'intensité des précipitations, mentionnons que la ville de Sohra (aussi connue sous le nom de Cherrapunjee), située sur un plateau élevé dominant les plaines du Bangladesh, reçoit en moyenne 11 mm de pluie en janvier, mais détient le record mondial de pluie pour une période de 48 heures, soit 2 493 mm (juin 1995). Cela correspond à peu près à la quantité de pluie que Prince-Rupert (C.-B.), la ville la plus pluvieuse du Canada, reçoit dans une année moyenne. Pour une période de 24 heures, le record mondial appartient à Cilaos, à La Réunion, où le cyclone Denise a déversé 1 825 mm de pluie le 8 janvier 1966. Le record canadien, plus modeste, a été enregistré en 1967 à Ucluelet (C.-B.), soit 490 mm en 24 heures.

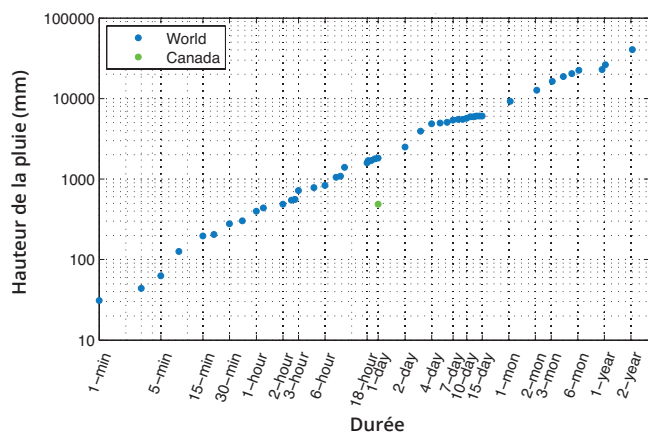


Figure 7 Records mondiaux observés de précipitations ponctuelles (en mm) selon la durée, dont le record canadien sur 24 heures à Ucluelet (point vert). Source : Gervais, Manitoba Hydro, 2015; données tirées de : http://www.nws.noaa.gov/oh/hdsc/record_precip/record_precip_world.html.

Il est intéressant de se demander si nous pouvons utiliser ces valeurs records pour en savoir plus sur les PMP. En un sens, ces valeurs supposent qu'il existe une limite supérieure à la quantité de pluie qui peut s'accumuler pendant un temps donné, ce qui nous amènerait à limiter les valeurs de PMP. Cependant, les typhons, cyclones et ouragans qui sont à l'origine de ces événements extrêmes ne peuvent être simplement transposés sur d'autres régions sans tenir compte des processus qui les causent. Pour cette raison, les météorologues définissent des zones de transposition, c'est-à-dire des régions au sein desquelles les systèmes météorologiques peuvent se développer. En fait, c'est la base même de la méthode d'estimation des CMP : pour un bassin versant donné, toutes les principales tempêtes historiques survenues dans la zone de transposition leur étant associée sont positionnées sur le bassin et le modèle hydrologique convertit les quantités de pluie en écoulement.

L'EAU PRÉCIPITABLE, UN CONCEPT QUI VISE À REPRÉSENTER TOUTE L'EAU D'UNE COLONNE ATMOSPHÉRIQUE CONDENSÉE À LA SURFACE, PERMET D'ÉVALUER LA PRÉCIPITATION MAXIMALE THÉORIQUE.

À cette fin, Environnement Canada a publié *Pluies orageuses au Canada*. Ce document contient un ensemble de graphiques décrivant les courbes hauteur-durée-surface des principales tempêtes de la période 1912–1981. Les quantités maximales de pluie produites par ces tempêtes historiques sont très éloignées des valeurs théoriques de précipitations maximales, et c'est pourquoi ces tempêtes sont ensuite maximisées. La maximisation consiste à déterminer la quantité maximale de pluie que chaque tempête aurait pu produire. Selon le processus de maximisation,

chaque tempête peut être décrite en fonction de son efficacité à convertir la vapeur d'eau atmosphérique en précipitation, soit le ratio de la précipitation à l'eau précipitable. Les météorologues posent l'hypothèse suivante : l'efficacité demeurerait constante s'il y avait une plus grande quantité de vapeur d'eau disponible. Donc, en évaluant la quantité d'humidité disponible dans l'atmosphère au-dessus du bassin versant à la période de l'année où la tempête est survenue et en supposant que l'efficacité de la tempête demeure la même, nous obtenons la précipitation maximale que chaque tempête aurait pu produire. La PMP résultante correspond à la précipitation maximale produite par l'ensemble des tempêtes maximisées au sein de la zone de transposition associée au bassin d'intérêt.

CRUE MAXIMALE PROBABLE

Une fois la PMP évaluée par le météorologue, l'hydrologue la convertit en crue maximale probable (CMP). Celle-ci est semblable à la PMP en ce qu'elle évalue la crue maximale qui pourrait raisonnablement se produire dans un bassin versant, compte tenu de nombreux autres facteurs :

HUMIDITÉ DU SOL

- ▲ Pour qu'une crue soit la plus intense possible, le sol doit n'avoir pratiquement pas de capacité de stockage. Les hydrologues simulent souvent une importante précipitation quelques jours avant d'appliquer la PMP pour s'assurer que le sol est saturé et obtenir ainsi l'écoulement maximal.

COUVERT DE NEIGE

- ▲ Sur de nombreux bassins canadiens, la crue de printemps est habituellement la plus importante; elle est déclenchée par une combinaison de fonte de neige rapide et de pluie. Un épais couvert de neige accroît la probabilité de fortes crues.

SÉQUENCE DE TEMPÉRATURE

- ▲ Pour que la fonte se produise au pire moment possible, il faut imposer au couvert de neige des températures chaudes pour l'amener près du point de fusion. Les hydrologues simulent une séquence de température pendant les semaines précédant la PMP pour que la fonte du couvert de neige coïncide avec la PMP.

NIVEAU DU RÉSERVOIR

- ▲ De grands réservoirs peuvent stocker une partie de l'écoulement et réduire le débit de pointe. Cependant, comme les barrages hydroélectriques fonctionnent souvent à leurs niveaux maximaux afin d'augmenter la hauteur de chute et l'énergie produite, les hydrologues établissent habituellement le niveau initial du réservoir à sa valeur d'exploitation maximale.

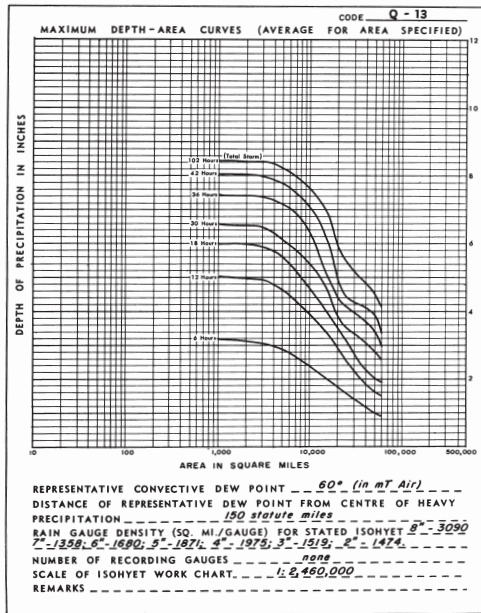


Figure 8 Courbes hauteur-durée-surface tirées de l'analyse d'une tempête qui a touché la vallée du St-Laurent du 14 au 18 septembre 1932. Source : Pluies orageuses au Canada, Environnement Canada.

Parmi ces facteurs, le couvert de neige est parfois le plus difficile à traiter : quelle quantité de neige doit s'accumuler sur le bassin versant pour calculer la CMP? Il est possible d'évaluer un enneigement maximal probable (EMP) décrivant la quantité maximale théorique de neige qui pourrait s'accumuler au cours de l'hiver. La méthode servant à calculer l'EMP consiste habituellement à maximiser toutes les tempêtes de neige de nombreux hivers pour calculer la quantité de neige la plus élevée qui pourrait s'accumuler au sol pendant une saison. En théorie, les hydrologues combineraient la PMP et l'EMP, s'assurant que le sol est saturé et que le couvert de neige est prêt à fondre, puis calculeraient l'écoulement résultant. Cependant, cela donne lieu à des valeurs et des marges de sécurité extrêmement élevées. Bien que la combinaison PMP et EMP ait été utilisée par le passé, la méthode consensuelle actuelle consiste à combiner la PMP

de printemps et le couvert de neige 1/100 ans ou la pluie printanière 1/100 ans et l'EMP, puis à choisir la combinaison qui génère l'écoulement le plus important.

Les hydrologues entrent ces données météorologiques dans un modèle hydrologique décrivant les processus d'infiltration et d'écoulement sur le bassin versant en amont du barrage. En déplaçant le centre de la tempête de conception de la PMP et en adaptant les paramètres du modèle et la séquence de température, ils évaluent la sensibilité des résultats modélisés par rapport à leurs hypothèses, puis développent un hydrogramme représentant le pire scénario d'écoulement physiquement plausible. Les ingénieurs civils et mécaniques peuvent utiliser l'hydrogramme pour concevoir et construire des barrages, des digues et des vannes d'évacuation adaptés à la CMP.

Si la conception d'un barrage adapté à une CMP donne l'impression qu'il ne peut y avoir de rupture, la réalité n'est cependant pas si simple. Historiquement, la plupart des ruptures de barrage ne sont pas causées par des événements extrêmes auxquels des structures mal conçues ne peuvent résister, mais plutôt par des fondations instables, une construction de piètre qualité, un mauvais entretien, une gestion inadéquate, des pannes de communication ou une combinaison de ces facteurs. Même si une vanne d'évacuation et ses barrières sont de taille adéquate, rien ne garantit que l'opérateur du barrage saura exactement à quel moment ouvrir la vanne, que les moteurs des barrières fonctionneront, que les barrières s'ouvriront sans obstruction et que l'ouverture sera libre de sédiments. Si ces facteurs semblent banals par une belle journée ensoleillée, durant une tempête de type PMP, les routes d'accès et les lignes électriques seront probablement coupées par des ruisseaux gonflés et des arbres tombés. Les employés ne pourront ou ne voudront peut-être pas se rendre au barrage, et les débris charriés par l'eau et le vent obstrueront les vannes d'évacuation. Au bout du compte, il pourrait être difficile de diagnostiquer et de résoudre les problèmes.

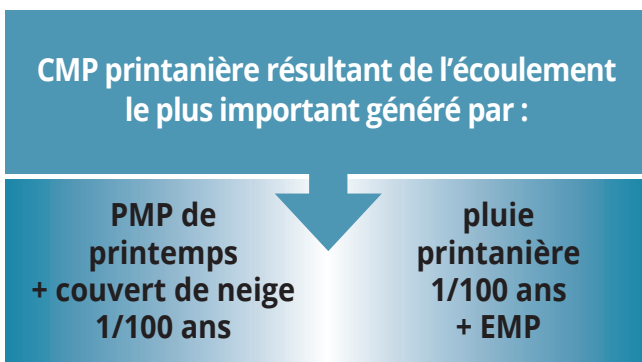


Figure 9 Diagramme des deux approches servant à sélectionner la CMP printanière la plus forte.



UTILISER LES SIMULATIONS CLIMATIQUES

Les premiers modèles de climat, appelés modèles de circulation générale, ont été accessibles dans les années 1960. Ces modèles se limitaient à décrire la circulation de l'atmosphère, contrôlée par le rayonnement solaire et les mécanismes du transfert de chaleur. Ils étaient en mesure de reproduire la circulation atmosphérique autour du globe tout en supposant que la surface de la terre était couverte d'eau calme et en ignorant la topographie et la physique des nuages. Néanmoins, ces modèles simples ont permis aux chercheurs de tester des hypothèses et de réaliser d'importantes percées dans notre compréhension des processus climatiques, notamment le rôle des gaz à effet de serre dans les propriétés radiatives de l'atmosphère.

Avec l'augmentation rapide de la puissance de calcul et des connaissances numériques, les modélisateurs ont petit à petit couplé les modèles atmosphériques et océaniques, puis ceux des glaces de mer. Ils ont incorporé la topographie et la bathymétrie et pris en compte les processus à la surface de la terre ainsi que les nuages, la chimie atmosphérique, la biochimie océanique, la végétation, le cycle du carbone et les glaciers. Étant donné l'envergure et la complexité de ces modèles – certaines équations décrivent les échanges de CO₂ et de vapeur des cavités stomatiques (pores de feuilles microscopiques) –, aucun climatologue ne peut dire qu'il maîtrise un modèle climatique dans sa totalité. Plutôt, des équipes de chercheurs se concentrent sur divers aspects des modèles. Les modèles climatiques sont en quelque sorte la concrétisation des connaissances scientifiques sur les processus climatiques, et les différences entre les modèles, une représentation de la diversité des points de vue scientifiques et des algorithmes numériques.

L'une des questions auxquelles les scientifiques ont essayé de répondre au moyen des modèles climatiques est celle de l'effet d'une hausse des gaz à effet de serre sur la température et la précipitation. Avec un doublement des niveaux de CO₂, les modèles plus simples des années 1960 ainsi que les versions les plus récentes simulent un réchauffement global d'environ 3 °C, les estimations variant entre 1,5 °C et 4,5 °C. Dans le cas de la précipitation, ce n'est pas aussi évident. L'air plus chaud augmente le potentiel d'évaporation, qui peut à son tour augmenter la pluviosité ou la sécheresse, tout dépendant des régions et des vents. Malgré cela, l'idée voulant qu'une plus grande quantité d'énergie dans le système entraîne des précipitations maximales plus intenses, en partie attribuables à des taux d'humidité plus élevés étant donné le réchauffement de l'air, est généralement acceptée.

On utilise souvent les modèles régionaux du climat pour focaliser sur les impacts des changements climatiques à l'échelle

du bassin versant, car leur résolution spatio-temporelle est plus fine. Ces modèles sont très semblables aux modèles climatiques globaux en ce qui a trait aux équations et à la représentation des processus climatiques, mais ont ceci de différent qu'ils se concentrent sur une seule région du globe. Par exemple, le projet CORDEX (<http://www.cordex.org>) est une expérience coordonnée de simulations réalisées par des modélisateurs régionaux sur des domaines prédéfinis couvrant l'Afrique, l'Europe, l'Asie, l'Arctique, l'Amérique du Nord, etc. Le processus de modélisation s'amorce avec des scénarios d'émissions futures décrivant l'évolution des émissions et des concentrations de gaz à effet de serre et aérosols, et différents modèles climatiques globaux simulent ensuite le climat

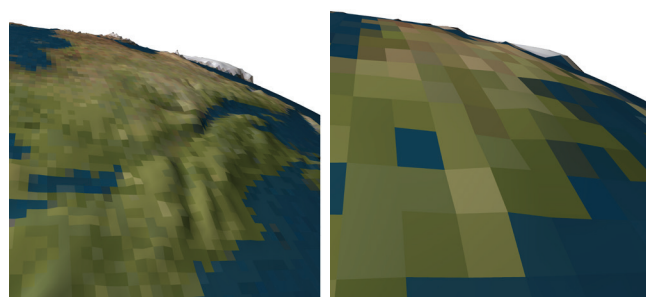


Figure 10 Résolutions spatiales types des modèles régionaux de climat (à gauche : résolution de 40 km) et des modèles climatiques globaux (à droite : résolution de 200 km) sur l'Est du Canada. On y voit la baie James (coin supérieur gauche), le lac Ontario (centre-gauche) et le fleuve St-Laurent (à droite). Source : Braun, Ouranos, 2015.

du globe à partir de ces scénarios. Les résultats varient selon les scénarios, les modèles et la variabilité naturelle du climat, dont l'influence rend le climat presque imprévisible au-delà d'un horizon de deux semaines. Les valeurs de vent, de pression, d'humidité et de température de ces simulations globales servent ensuite à piloter les modèles régionaux, qui simulent eux aussi les mêmes variables climatiques, mais à des résolutions plus fines. De nos jours, la plupart des modèles climatiques globaux sont généralement exécutés avec des tuiles dont la résolution horizontale est de 200 km, contre 25 à 50 km pour les tuiles des modèles régionaux.

Les travaux et les résultats présentés dans les prochaines pages s'appuient sur un ensemble de simulations climatiques sur l'Amérique du Nord réalisées à l'aide de modèles régionaux du climat (tableau 1). Ils comprennent les projections produites par Ouranos (CRCM4; de Elia et Côté, 2010) et d'autres qui sont disponibles via le North American Regional Climate Change Assessment Program (NARCCAP; Mearns et al., 2009). Ces modèles sont pilotés à leurs frontières par des simulations de modèles climatiques globaux. En raison de ressources de calcul limitées et d'un intérêt particulier pour l'horizon 2050 (la période 2041-2070), seul un scénario d'émissions de gaz à effet de serre et aérosols (SRES-A2)

a été étudié dans un futur où aucun véritable effort n'est fait pour réduire les émissions. Les résultats de plus d'une douzaine de simulations réalisées par divers modèles sont stockés dans d'énormes fichiers binaires contenant les valeurs des variables climatiques simulées par le modèle toutes les six heures sur chaque tuile du modèle. La dimension des tuiles est d'environ 50 x 50 km (2 500 km²), ce qui veut dire que les processus de petite échelle, comme les orages convectifs d'été, ne sont pas générés par ces modèles; les modélisateurs incorporent donc dans leurs modèles des paramétrisations pour tenir compte de ces processus. Les analystes du climat sélectionnent ensuite les tuiles qui correspondent à la région d'intérêt – dans ce cas-ci, des bassins versants – et calculent à partir des données brutes les indicateurs qui les intéressent, par exemple la précipitation maximale d'été d'une durée de 24 heures. Compte tenu des limites des modèles, de la variabilité naturelle du climat et de l'incertitude d'échantillonnage, surtout lorsqu'il s'agit de valeurs extrêmes, l'interprétation judicieuse de ces résultats constitue un défi de taille.

Pour évaluer l'effet potentiel des gaz à effet de serre sur les CMP et la sécurité des barrages, les sorties de l'ensemble de simulations de modèles régionaux de climat ont été analysées. L'approche

utilisée pour évaluer les PMP, soit la maximisation des tempêtes, a été appliquée aux sorties des modèles de climat (Rousseau *et al.*, 2014). Une zone de transposition a été définie pour chaque bassin étudié. Pour chaque tuile dans cette zone et pour les deux périodes simulées par les modèles (1971-2000 et 2041-2070), tous les événements de pluie de 24, 48, 72 et 120 heures et la quantité d'eau précipitable de chacun ont été enregistrés. Une valeur d'eau précipitable ayant une période de retour de 100 ans a été calculée et utilisée pour maximiser la hauteur des précipitations de tous les événements enregistrés. La précipitation maximisée la plus importante dans la zone de transposition pour la PMP de printemps, ainsi que pour la PMP d'été/automne, a été considérée comme étant la PMP simulée. En comparant les valeurs des périodes future et passée, nous obtenons une estimation du changement projeté de la PMP par les modèles climatiques. Cette analyse a été réalisée une cinquantaine de fois en regroupant les tuiles du modèle selon certaines configurations afin de couvrir des zones de tempêtes de 4 000 à 50 000 km², ce qui correspond à l'étendue des superficies utilisées dans de nombreuses études de CMP. Des séries temporelles du couvert de neige provenant des simulations de modèles régionaux de climat ont également été analysées afin d'obtenir les changements projetés du couvert de neige, représenté par la période de retour de 100 ans des valeurs annuelles maximales de l'équivalent en eau de la neige pour chaque bassin. En dernier lieu, les changements projetés de la séquence de température quotidienne ont été évalués à l'échelle du bassin.

Rappelons ici que l'impact des changements climatiques sur les PMP et les CMP n'a pas souvent fait l'objet d'études indépendantes aussi approfondies. En suivant étroitement l'approche traditionnelle du calcul des PMP avec les données des modèles de climat, nous avons cherché à rendre la méthodologie aussi familière que possible aux météorologues et aux ingénieurs. Cependant, les outils d'observation et de modélisation offrent de nombreuses autres possibilités, peut-être plus fructueuses, pour comprendre et évaluer les limites physiques de la précipitation extrême.

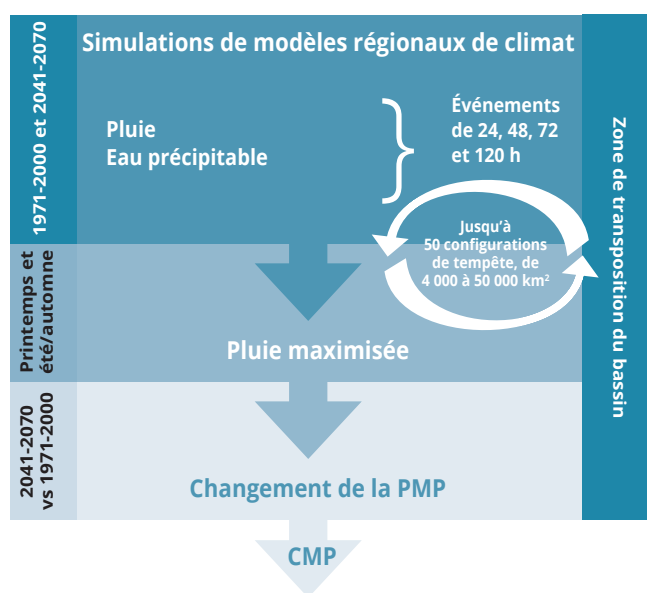


Figure 11 Schéma de la méthodologie développée et appliquée dans ce projet, qui utilise les sorties de modèles régionaux de climat pour évaluer les changements projetés de la CMP sur les bassins versants à l'étude. Source : Gervais, Manitoba Hydro, 2015.

MODÈLE RÉGIONAL	MODÈLE GLOBAL PILOTE	MEMBRES
CRCM4	CGCM3	5
CRCM4	ECHAM5	3
CRCM4	CCSM3	1
ECP2	GFDL_CM2.5	1
MM5I	CCSM3	1
MM5I	HadCM3	1
RCM3	CGCM3	1

Tableau 1 Détails de l'ensemble de simulations régionales utilisées, dont le nom des modèles régionaux et des modèles globaux de pilotage, et le nombre de réalisations différentes d'un même modèle de climat global. Toutes les simulations ont été réalisées avec le scénario d'émission de GES et d'aérosols SRES-A2. **Remarque :** les cinq dernières simulations faisaient partie du NARCCAP.

Les crues maximales probables au Canada

Dans le cadre de ce projet, l'approche de modélisation climatique visant à évaluer les PMP, le couvert de neige, la pluie 1/100 ans et la séquence de température a été appliquée à cinq bassins versants sur lesquels les barrages ont été conçus en tenant compte des CMP. Un ensemble de 14 modèles régionaux de climat ayant une résolution spatiale de 45 à 50 km et couvrant 30 années en climat actuel et en climat futur a permis d'évaluer l'incertitude liée aux hypothèses et à l'échantillonnage des modèles. La méthode utilisée consiste à déterminer la précipitation maximale dans une simulation de 30 ans. Cela peut paraître long, mais les simulations ont produit de très fortes variations dans les précipitations maximales sur 30 ans, et ce, même lorsque le même modèle est utilisé. La comparaison de multiples simulations contribue à une première évaluation de l'erreur liée au calcul du maximum sur des périodes de seulement 30 ans.

Les prochaines pages décrivent les bassins versants étudiés et présentent un survol de la méthode de calcul de la CMP originale et des changements attendus dans les CMP à l'horizon 2050 (2041-2070 par rapport à 1971-2000). Cette analyse, qui repose uniquement sur le scénario d'émissions futures SRES-2, représente un futur où aucun véritable effort n'est fait pour réduire les émissions, ce qui correspond actuellement à notre réalité.

Mattagami



Centrale Harmon

Le bassin de la rivière Mattagami fait partie du Bouclier canadien, dont le lit rocheux est recouvert d'un sol très mince principalement composé de limon et d'argile. Les forêts du bassin abritent des conifères – pin blanc et rouge, épinette, pruche du Canada – ainsi que des arbres feuillus – bouleau jaune, diverses espèces d'érable, orme et chêne. La rivière Mattagami, qui signifie *la rencontre des eaux* en ojibwa, recueille l'écoulement des rivières Kapuskasing et Groundhog, et s'écoule au nord vers la baie James en passant par la rivière Moose. Un canal de dérivation construit vers 1968 détourne aussi le débit de la rivière Opasatika, et la structure de dérivation d'Adam Creek sert à détourner la crue printanière.

LE VOLUME UTILE

Le volume utile (aussi appelé capacité de stockage) et le volume du réservoir sont deux choses différentes. Le volume du réservoir est simplement la quantité d'eau totale qui se trouve dans le réservoir, tandis que le volume utile est la quantité d'eau que l'opérateur du barrage peut déverser en aval. Plus précisément, c'est la quantité d'eau qui peut être stockée entre le niveau d'exploitation minimal et le niveau d'exploitation maximal.

Dans la pratique, pendant de courtes périodes et dans des circonstances exceptionnelles, une partie du volume utile peut excéder le niveau d'exploitation maximal sans mettre en péril l'intégrité structurelle du barrage. Toutefois, il est peu probable que l'eau soit à son niveau d'exploitation minimal avant une CMP. Les opérateurs gardent habituellement les niveaux élevés pour maximiser la hauteur de chute et la production d'énergie, et quelques jours de préavis ne suffiraient pas pour abaisser rapidement le niveau du réservoir. C'est pourquoi les études de CMP présumant habituellement que le réservoir est à son niveau historique maximal au moment de la CMP.



Centrale Kipling

Les barrages réservoirs de Mesomikenda, Minisinakwa, Mattagami et Peter Long longent la rivière Mattagami et alimentent huit centrales : Wawaitin, Sandy Falls, Lower Sturgeon, Smooth Rock Falls, Little Long, Smoky Falls, Harmon et Kipling. La centrale la plus ancienne, Sandy Falls, a été en activité de 1911 jusqu'à 2008, avant d'être désactivée puis reconstruite. De toutes les centrales du bassin de la rivière Mattagami, Smoky Falls possède la plus grande capacité (268 MW) depuis qu'elle a été redéveloppée en partenariat avec la nation Moose Cree. Exploitée depuis les années 1920, la centrale alimentait à l'origine l'usine de pâtes et papiers de Kapuskasing, qui fournissait le papier journal au *New York Times* (O'Kane, 2013).

En 1991, le calcul des premières estimations de la PMP sur le bassin s'est fait à partir de tempêtes majeures d'été (dix) et de printemps (quatre) survenues entre 1878 et 1986 dans des régions météorologiquement semblables en Ontario et aux États-Unis. La tempête qui s'est abattue sur Timmins en août 1961 a aussi été retenue : une pluie torrentielle et de la grêle qui ont causé une crue éclair, détruisant des routes et des maisons. L'eau précipitable maximale a été évaluée à partir de la période de retour de 50 ans, celle-ci étant tirée des données de températures du point de rosée sur une période de 12 heures. Des courbes hauteur-durée-superficie ont été calculées pour des durées de 6, 12, 24, 48, 72 et 96 heures et des superficies de 1 000, 2 000, 5 000 et 10 000 km². Les tempêtes ont été positionnées sur quatre emplacements à l'aide du logiciel BOSS HMR52, qui centre, oriente et dimensionne automatiquement la tempête de PMP pour obtenir des résultats optimaux.

Sur la base des relevés de neige et des crues observées, les deux premières semaines de mai ont été retenues comme moment d'occurrence de la CMP de printemps. La séquence de température critique était une version modifiée de la crue printanière record de 1960. Deux scénarios de couvert neigeux ont été utilisés, établis selon des événements ayant une période de retour de 100 et de 500 ans. La fin du mois de juin a été retenue pour la CMP d'été – la période durant laquelle sont survenues les fortes inondations de l'été 1957 –, où l'écoulement obtenu ne représentait que 60 % de la CMP

printanière. L'écoulement a été généré par les simulations réalisées à l'aide du modèle informatique Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation (SSARR-8), développé par le US Army Corps of Engineers.

Les projections des modèles régionaux de climat pour les changements de la PMP de printemps sur le bassin de Mattagami à l'horizon 2050 (soit 2041-2070 par rapport à 1971-2000) tournent autour d'une hausse d'environ 10 % pour l'événement de 24 heures et de 5 % pour les événements de 48, 72 et 120 heures. Une fois convertis en écoulement, ces résultats correspondent à une hausse de 5 à 7 % du débit de pointe sur les 12 sections de la rivière. Quant au couvert de neige 1/100 ans, les changements projetés tournent autour d'environ -1 % et ont peu d'effet sur la pointe de crue. Tous les autres facteurs étant égaux par ailleurs, les changements dans la séquence de température générant la fonte de neige ont tendance à donner des résultats très variables, certaines simulations produisant pour la pointe de crue des baisses de 10 % et d'autres, des hausses de 15 %. En règle générale, les séquences de température sont expressément définies de manière à produire le débit de pointe le plus élevé possible, ce qui n'a pas été fait ici et qui explique sans doute la grande variabilité des résultats. Dans l'ensemble, les changements projetés suggèrent des hausses de la CMP de l'ordre de 5 % sur la rivière Mattagami.



Centrale Smoky Falls

MATTAGAMI

Pluie annuelle	517–621 mm
Enneigement annuel	290–349 mm
Température annuelle moyenne	0,1–1,3 °C
Écoulement annuel moyen	300–400 m ³ /s
Moment d'occurrence de la CMP	Printemps
Superficie du bassin	36 800 km ²
Stockage	337 hm ³

Manic-5



Réservoir Manicouagan

Située sur la Côte-Nord, la rivière Manicouagan prend sa source au nord du cratère de la Manicouagan et s'écoule vers le sud jusqu'au fleuve Saint-Laurent. Le cratère, formé par un météorite de cinq kilomètres de diamètre qui a percuté la terre il y a 215 millions d'années, est le plus grand cratère visible sur terre. La collision a produit suffisamment d'énergie pour faire fondre le Bouclier canadien jusqu'à neuf kilomètres sous la surface. (O'Dale, 2015). La construction et le remplissage du barrage Daniel-Johnson, dans les années 1960, ont donné au réservoir sa forme arrondie, et deux lacs en forme de croissant situés à l'ouest (Mushalagun) et à l'est (Manicouagan) de la couronne de l'impact ont fusionné. Le réservoir actuel est un lac circulaire de 70 km de diamètre; son volume total de 140 km³ le place au cinquième rang mondial en termes de capacité (ICOLD, 2015).

Le bassin versant de Manic-5 draine en amont la section la plus au nord de la rivière Manicouagan et son exutoire se trouve au barrage Daniel-Johnson. Le potentiel hydroélectrique de la rivière était connu depuis les années 1920, mais celle-ci était trop éloignée à l'époque pour envisager un projet de construction aussi important. En 1955, avec l'essor des industries de la sidérurgie et de la foresterie sur la Côte-Nord, puis la construction d'une nouvelle route, l'amélioration des technologies du transport de l'électricité et la demande accrue d'énergie, on a commandé une étude de faisabilité pour le complexe Manic-Outardes. La construction du barrage s'est échelonnée de 1959 à 1964, et le réservoir a atteint son niveau d'exploitation maximal 13 ans plus tard. Bâti durant la Révolution tranquille, le barrage est devenu un emblème du nationalisme québécois, inspirant des chansonniers et attirant aujourd'hui quelque 7 000 touristes tous les ans.

La PMP d'été a initialement été évaluée à partir de huit tempêtes survenues entre 1917 et 1996, la tempête de 1996 étant le déluge du Saguenay. Les tempêtes ont été maximisées à partir du maximum obtenu des températures persistantes du point de rosée sur une période de 12 heures. Pour calculer la CMP d'été, une pluie ayant une période de retour de 100 ans a été déclenchée quatre jours avant la PMP de 72 heures de manière que le sol soit presque totalement saturé. Les tempêtes de conception ont été optimalement positionnées sur le bassin versant et réparties dans le temps sur trois jours à l'aide du logiciel HMR52.

Le calcul de la CMP printanière exige une comparaison de deux combinaisons : le couvert de neige 1/100 ans et la PMP de printemps d'une part, et l'enneigement maximal probable et la

pluie 1/100 ans d'autre part. Dans les deux cas, aucune précipitation antérieure n'est appliquée puisqu'on suppose que la fonte de neige saturera le sol. Cependant, la séquence de température et le moment d'occurrence de la pluie ont été soigneusement choisis pour maximiser le débit de pointe : les températures ont été fixées juste au-dessus du point de congélation dans les deux semaines précédant la tempête de conception pour préparer le couvert de neige à une fonte rapide. Pendant l'événement de PMP, il est supposé que la centrale est arrêtée, de sorte que tout l'écoulement passe par l'évacuateur de crue. Ces simulations du bassin et du réservoir ont été réalisées à l'aide du modèle SSARR.

Durant la phase de conception d'un barrage, on utilise la CMP pour déterminer la capacité de l'évacuateur de crue. Cependant, une fois l'infrastructure construite, des études et des mises à jour de la CMP ont toujours lieu et, advenant une nouvelle CMP, la question suivante se pose : « Quel doit être le niveau initial du réservoir pour faire en sorte que le niveau atteint durant la CMP ne dépasse jamais le seuil critique? » Plus la CMP est forte, plus le niveau du réservoir doit être bas. Au barrage de Manic-5, le débit de pointe le plus élevé est généré par la combinaison PMP et couvert de neige 1/100 ans, alors que le volume de crue le plus élevé et, par conséquent, le niveau initial du réservoir le plus faible requis avant la crue, est généré par la combinaison EMP et pluie 1/100 ans.

Les projections des modèles régionaux de climat pour les changements de la PMP de printemps à l'horizon 2050 (soit 2041-2070

par rapport à 1971-2000) sont centrées sur une hausse d'environ 15 % et entraînent une hausse des débits de pointe de la CMP d'environ 10 %; cependant, le volume total de la crue n'augmente que de 4 %. Avec l'ajout des changements médians projetés du couvert de neige (une hausse de 3 % de l'équivalent en eau de la neige), le débit de pointe et le volume de crue augmentent de 11 % et de 6 % respectivement. En laminant le débit entrant dans le modèle de réservoir, nous pouvons déterminer les fluctuations du niveau du réservoir durant une telle CMP future, et les résultats donnent à penser que le niveau du réservoir de Manic-5 augmenterait de 40 cm par rapport au résultat obtenu en calculant la CMP avec la météorologie observée, et que cette augmentation du niveau peut être prise en charge par les infrastructures en place.

MANIC-5

Pluie annuelle	640 mm
Enneigement annuel	310 mm
Température annuelle moyenne	-1,8 °C
Écoulement annuel moyen	660 m ³ /s
Moment d'occurrence de la CMP	Printemps
Superficie du bassin	29 200 km ²
Stockage	35 000 hm ³



Barrage Daniel-Johnson à Manic-5

Kénogami



Pulperie de Chicoutimi sur la rivière Saguenay, vers 1910
Source : Musée McCord, MP-0000.1101.7



Barrage du lac Dubuc sur la rivière Chicoutimi, à l'usine n° 2, vers 1980
Source : BAnQ, P90, P67405

Situé près de la rivière Saguenay, le lac Kénogami a été le terrain de chasse des Innus pendant près de 4 000 ans, jusqu'à ce que les colons bâtissent sur les berges le village agricole de St-Cyriac à la fin du 19^e siècle. Kénogami, qui signifie lac long en montagnais, est alimenté par trois rivières : Pikauba, Cyriac et aux Écorces. Le lac s'écoule vers l'est en passant par les rivières Chicoutimi et aux Sables, et traverse les municipalités de Chicoutimi et de Jonquière dans la région du Saguenay. Au tournant du 20^e siècle, les usines de pâtes et papiers situées dans ces deux villes ont érigé sur le lac les barrages Pibrac et Portage-des-Roches afin d'augmenter le niveau d'eau et accroître ainsi la production hydroélectrique.

L'énergie hydroélectrique servait à éclairer les villes en expansion et à alimenter les activités mécaniques nécessaires à la transformation du bois en pâte. En 1920, la Compagnie de pulpe de Chicoutimi devenait le plus important producteur de pâte de bois mécanique du monde, faisant concurrence à la famille Price, propriétaire des usines de Jonquière (Gagnon, 2007). La demande croissante d'électricité allait donner lieu à des batailles juridiques opposant les propriétaires des usines quant à la répartition de l'eau et aux demandes de hausses du niveau du lac. En 1922, la Commission des eaux courantes du Québec allait approuver le relèvement des barrages et la construction de nouvelles digues. Le village de St-Cyriac, malgré les recours juridiques des résidents contre la Commission, a été inondé en 1924 (Cantin, 1975).

Le petit bassin versant du lac Kénogami se compose d'un sol rocheux et irrégulier ayant une faible capacité de stockage de l'eau. Sa réaction à la pluie est très rapide et amplifiée par les effets orographiques. Par exemple, en 1996, lors du déluge du Saguenay, le bassin de Kénogami a reçu près de deux fois plus de pluie que les plaines environnantes. Un pluviomètre de la Réserve faunique des Laurentides a enregistré 279 mm sur 36 heures, une quantité qui a causé la rupture de plusieurs digues et barrages privés dans la région (Grescoe, 1997). Étant donné l'effet orographique, il est difficile de transposer sur le bassin de Kénogami des tempêtes survenues ailleurs. Ainsi, dans une étude réalisée en 1997, les valeurs de la PMP ont été évaluées en maximisant les tempêtes locales. La région compte parmi celles qui reçoivent le plus de neige dans la

province, de sorte que l'estimation du couvert de neige 1/100 ans et l'enneigement maximal probable (EMP) sont des éléments indispensables au calcul de la CMP. Le couvert de neige 1/100 ans est évalué au moyen d'une analyse de fréquence des relevés de neige, tandis que l'EMP est établi à partir de la maximisation des tempêtes d'hiver survenues durant les trois hivers les plus enneigés enregistrés.

Dans l'étude initiale de 1997, la combinaison PMP de printemps et couvert de neige 1/100 ans a produit la CMP la plus forte. Divers modèles hydrologiques quotidiens ont été testés (CEQUEAU, SSARR et HSAMI), et le modèle qui a généré le débit de pointe le plus élevé, soit le SSARR, a été sélectionné. Une mise à jour faite en 2001 a utilisé un modèle hydrologique horaire pour mieux tenir compte de la rapidité du temps de réponse du bassin. Cette résolution temporelle plus élevée a entraîné une hausse de 30 % dans les débits de pointe printaniers, et transformé la CMP en un événement été/automne. À titre de comparaison, en termes de débit de pointe horaire, la CMP est près de trois fois plus élevée que le débit de pointe du déluge de 1996.

Les projections des modèles régionaux de climat quant aux changements de la PMP de printemps à l'horizon 2050 (soit 2041-2070 par rapport à 1971-2000) indiquent des hausses dont la valeur médiane est d'environ 20 %. Cependant, la fourchette de valeurs entourant la médiane est très large, allant de -25 % à 90 %, ce qui pourrait s'expliquer par la petite taille du bassin par rapport

à l'échelle des tuiles du modèle régional de climat. Les résultats pour le couvert de neige sont semblables, les changements projetés se situant entre -30 % et 30 %. Dans le modèle HYDROTEL, qui a été utilisé pour la mise à jour de l'étude de la CMP, l'eau additionnelle est laminée sans être redistribuée de façon importante, si bien qu'elle a peu d'effet sur le débit. Dans l'ensemble, les changements médians de la CMP tournent autour d'une hausse de 20 %, comme c'est le cas pour la PMP. Le changement médian de la PMP pourrait être pris en charge par l'infrastructure actuelle, avec un léger débordement des barrages en béton; la hauteur libre des digues de terre est suffisante pour s'adapter à la hausse.

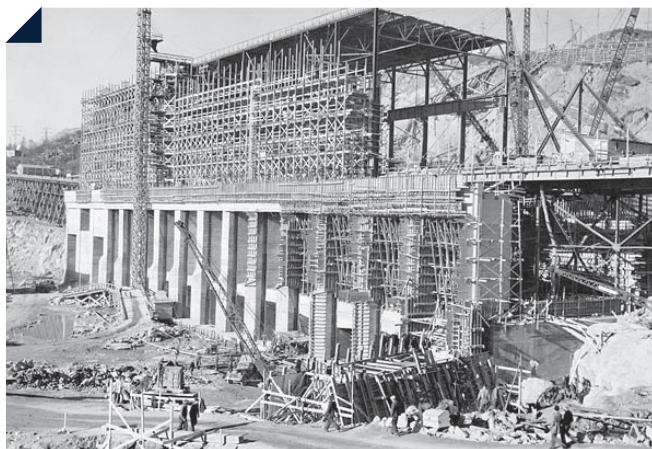
KÉNOGAMI

Pluie annuelle	1 030 mm
Enneigement annuel	287 mm
Température annuelle moyenne	2 °C
Écoulement annuel moyen	77,4 m³/s
Moment d'occurrence de la CMP	Printemps
Superficie du bassin	3 390 km²
Stockage	380 hm³



Barrage Portage-des-Roches

Saguenay–Lac-St-Jean



Travaux de construction de la centrale n° 2 du projet d'aménagement hydroélectrique de Shipshaw



Construction de l'entrée de la galerie C de l'aménagement hydroélectrique de Shipshaw

Le fjord du Saguenay et le lac St-Jean sont situés dans une plaine entourée de montagnes, soit les Laurentides au sud et les Monts Valin au nord. Le fjord est un graben formé il y a des millions d'années par les forces de la croûte terrestre qui ont créé des lignes de faille parallèles. L'écoulement glaciaire le long du graben a érodé et élargi les flancs, laissant des moraines sur son sillage et comprimant la croûte localement. À la fin du dernier âge glaciaire, le lac-St-Jean était entièrement relié à l'océan par le Saguenay, ce qui explique la présence d'espèces marines, comme le saumon, qui vivent à l'année dans des lacs dont l'eau est désormais douce. Le retrait de la mer a laissé des argiles et des sédiments, faisant de certaines régions autour du lac d'excellentes terres agricoles, qui sont cependant vulnérables aux glissements de terrain – on se souviendra de la catastrophe de St-Jean-Vianney en 1971.

Le lac-St-Jean, appelé Piekouagami (*lac plat*) par les Innus, est alimenté par les rivières Peribonka, Mistassini, Mistassibi et Ashuapmushuan, et sept autres petites rivières. Étant donné la présence d'un si grand nombre de rivières, la région a été un important carrefour pour le commerce entre Innus et plus tard avec les Européens. Bien que la région ait été d'abord colonisée pour son potentiel agricole dans la seconde moitié du 19^e siècle, les innombrables forêts et les rivières tumultueuses ont favorisé le développement de scieries, puis d'usines de pâtes et papiers et, finalement, d'alumineries. La centrale construite en 1926 par l'Aluminum Company of Canada (Alcoa) à la Grande Décharge, à l'Isle-Maligne, alimentait la nouvelle aluminerie d'Arvida et fut à une époque la plus puissante du monde.

Au cours des décennies qui ont suivi, sept centrales ont été construites et des réservoirs ont été aménagés sur les lacs Manouane et Passes-Dangereuses. Avec une capacité de stockage (ou volume utile) de 7 900 hm³, contre 5 083 hm³ pour celui du peu profond lac St-Jean, ces deux réservoirs agissent comme principal mécanisme de régulation du bassin versant.

Pour cette étude, la CMP sur le bassin versant du lac St-Jean a été calculée pour cinq emplacements. Dans le cas des PMP, les estimations ont été réalisées à partir des records météorologiques trouvés dans la zone de transposition associée au bassin, incluant des tempêtes lâchant plus de 50 mm de pluie sur une période de trois jours à au moins deux stations. Pour l'EMP, quatre hivers ayant l'accumulation de neige la plus importante ont été sélectionnés, et les tempêtes de neige individuelles durant ces hivers ont été maximisées. La séquence de température suppose que la PMP se

produit vers la mi-mai et comporte cinq parties afin de générer une fonte rapide du couvert de neige à la fin de la séquence. La CMP est calculée à l'aide du modèle SSARR, à partir des hypothèses suivantes : les lacs et les réservoirs sont à leurs niveaux d'exploitation moyens à cette période de l'année; les centrales sont hors service dans les 15 jours suivant le début de la PMP en raison d'une panne des lignes de transport; et les vannes de l'évacuateur sont ouvertes dès que le risque de débordement du niveau maximal du réservoir devient apparent. Les résultats indiquent que la CMP est deux fois plus importante que l'inondation de 1928 et résulte de la combinaison PMP printanière et couvert de neige 1/100 ans.

Bien que les valeurs originales de la CMP aient été simulées à l'aide du modèle SSARR, pour ce projet-ci, Rio Tinto a choisi le modèle hydrologique CEQUEAU qu'elle utilise pour ses prévisions au jour le jour. Les valeurs originales de la PMP de printemps et du couvert de neige 1/100 ans ont été traitées par le modèle CEQUEAU pour établir les données de référence du volume de crue et du débit de pointe avant d'appliquer les facteurs du changement climatique à la pluie et au couvert de neige. À partir des modèles régionaux de climat, la valeur médiane des changements projetés de la PMP à l'horizon 2050 (soit 2041-2070 par rapport à 1971-2000) indique

une hausse d'environ 10 %, alors que le changement médian dans le couvert de neige 1/100 ans est de -5 %. Ces changements s'annulent quant au volume de crue, mais entraînent une légère hausse du débit de pointe (2 %). En termes de grandeur, ces changements projetés sont comparables aux différences entre les valeurs obtenues par les modèles SSARR et CEQUEAU, donnant ainsi à penser que le signal du changement climatique est compris dans la plage de l'incertitude hydrologique.

SAGUENAY-LAC-ST-JEAN

Pluie annuelle	656 mm
Enneigement annuel	276 mm
Température annuelle moyenne	0,6 °C
Écoulement annuel moyen	861 m ³ /s
Moment d'occurrence de la CMP	Printemps
Superficie du bassin	45 385 km ²
Stockage	5 083 hm ³



Centrale Chute-à-Caron

Cours inférieur du fleuve Nelson



Centrale Long Spruce (située en amont de la centrale Kettle); la construction s'est échelonnée de 1973 à 1979.

Le fleuve Nelson (aussi connu sous le nom de *Keche Sipi*, qui signifie « grand fleuve » en cri) est situé dans le nord du Manitoba; il prend sa source dans le lac Winnipeg et s'écoule sur 656 kilomètres vers le nord jusqu'à la baie d'Hudson. Les lacs Winnipeg et Manitoba sont des vestiges du lac glaciaire Agassiz, un lac endigué plus grand que tous les Grands Lacs réunis et formé par les eaux de fonte du glacier continental laurentien il y a quelque 10 000 ans. Le lac Agassiz est sorti de son lit à plusieurs reprises : vers le golfe du Mexique, affouillant sur sa trajectoire une vallée de 2 à 5 kilomètres de large et 30 mètres de profond; vers l'est jusqu'à l'actuel lac Supérieur; et vers l'ouest jusqu'à l'océan Arctique en passant par le fleuve Mackenzie (Thorleifson, 1966). Ces inondations massives ont probablement été déclenchées par un important changement climatique, le dernier ayant causé une élévation soudaine du niveau de la mer qui pourrait expliquer les mythes de déluge.

L'aire de drainage naturel du bassin versant naturel du Nelson dépasse le million de kilomètres carrés, mais seulement depuis qu'il a gagné 300 000 km² en 1977, lorsque le fleuve Churchill au nord-ouest du bassin a été partiellement détourné vers le Nelson par les rivières aux Rats et Burntwood. Cela a considérablement augmenté le débit des centrales le long du cours inférieur du Nelson et porté la superficie totale du bassin à 1 400 000 km² – soit 15 % environ de la masse terrestre du Canada. Cependant, sur presque toute la superficie du bassin, l'écoulement est régulé avant d'atteindre le fleuve Nelson. La zone de l'écoulement non régulé qui se déverse dans le fleuve est de 91 000 km², et c'est sur cette zone qu'a porté l'analyse de la CMP.

La presque totalité de l'eau s'écoulant dans le fleuve Nelson provient de l'exutoire du lac Winnipeg. Comptant parmi les plus grands lacs du monde, le lac Winnipeg a le bassin versant le plus important par rapport à la superficie de son lac (rapport 40:1). Plus d'une douzaine de rivières s'écoulent dans le lac, provenant d'aussi loin que les montagnes Rocheuses, le partage des eaux laurentien du Dakota du Nord et du Minnesota et presque jusqu'au littoral ouest du lac Supérieur. Avec une superficie de 24 000 km², le lac Winnipeg offre une importante capacité de stockage et atténue les pointes de crue du fleuve Nelson. Avant l'aménagement du lac Winnipeg, dans les années 1970, de fortes crues s'abattaient sur les peuplements riverains en raison de la forte variabilité des débits entrants et de la capacité limitée de l'exutoire naturel.

Le climat continental subarctique du bassin se caractérise par des hivers froids et de courts étés chauds. Pour un bassin versant de cette taille, le relief est peu variable. Des forêts et des terres humides

dans le nord, des terres cultivées et des prairies dans le sud. Même si son potentiel hydroélectrique considérable était connu dès 1913 (McClellan *et al.*, 1914), le climat hostile et l'éloignement du fleuve Nelson ont retardé le développement hydroélectrique jusqu'aux années 1960, car la technologie du transport d'électricité ne facilitait pas l'exploitation de centrales si éloignées des consommateurs. En fait, la ligne électrique reliant la centrale de Kettle à Winnipeg, qui a été construite en 1972, était à l'époque la plus longue ligne de courant continu haute tension du monde, mesurant près de 900 kilomètres.

Pour le calcul de la CMP originale, plusieurs conditions ont été considérées en s'appuyant sur les recommandations de l'Association canadienne des barrages : une PMP d'été, une PMP de printemps avec couvert de neige 1/100 ans, une pluie printanière 1/100 ans avec un EMP, et un EMP combiné à une séquence de température extrême. Dans tous les cas, le débit sortant du lac Winnipeg était assigné à une valeur correspondant au maximum 1/100 ans et le fleuve Churchill était détourné au maximum. Six tempêtes parmi les 186 décrites dans le Storm Rainfall Atlas of Canada et de l'atlas de Warkentin (Warkentin, 1987) ont été sélectionnées en fonction de plusieurs critères, dont la taille, la forme, l'orientation et l'absence d'effet d'amplification orographique. La PMP d'été a été établie en fonction de la maximisation du point de rosée de juillet, lorsque l'apport d'humidité est à son maximum. Comme il y a très peu de tempêtes printanières à analyser, les PMP de printemps ont été calculées au moyen d'ajustements saisonniers des tempêtes estivales. Ces ajustements ont été faits en examinant sur une base mensuelle les tempêtes historiques les plus fortes et en comparant leurs pluies à celles des maximums de juillet. Le modèle SSAR, expressément calibré pour le traitement optimal des années les plus pluvieuses enregistrées, a été utilisé pour le calcul de la CMP.

Les projections concernant la PMP de printemps et le couvert de neige 1/100, évaluées à partir de l'ensemble de modèles régionaux de climat à l'horizon 2050 (soit 2041-2070 par rapport à 1971-2000), sont particulièrement incertaines pour le bassin versant du cours inférieur du fleuve Nelson, la fourchette des valeurs allant de -35 % à 30 % pour la pluie et de -15 % à 20 % pour le couvert de neige. Bien que le changement médian de la PMP soit d'environ -10 %, le degré de confiance de cette valeur est faible. Pour explorer cet éventail de futurs possibles, tous les scénarios de PMP en climat futur ont été simulés par le modèle hydrologique afin de mieux évaluer l'étendue des résultats possibles

en matière d'écoulement. Les résultats indiquent une relation linéaire assez robuste (5:1) entre les changements du volume de la PMP et les changements résultants du débit de pointe de la CMP, de sorte que le changement médian de la PMP, soit -10 %, se traduit par un débit de pointe de la CMP de 2 % inférieur à la valeur estimative actuelle. Les changements médians projetés du couvert de neige 1/100 ans et de l'écoulement 1/100 ans sortant du lac Winnipeg (le bassin versant en amont) compensent la baisse projetée de la PMP, entraînant ainsi une hausse du débit de pointe de la CMP de 1 % supérieure à la valeur actuelle. Bien que cette hausse médiane du débit de pointe de la CMP soit négligeable, la sensibilité aux futurs scénarios climatiques extrêmes donne lieu à une fourchette d'incertitude de 23 % par rapport au débit de pointe de la CMP de référence.

COURS INFÉRIEUR DU FLEUVE NELSON

Pluie annuelle¹	315 mm
Enneigement annuel	221 mm
Température annuelle moyenne	-3,7 °C
Écoulement annuel moyen²	3 280 m ³ /s
Moment d'occurrence de la CMP	Printemps
Superficie du bassin	91 000 km ²
Stockage³	81,4 hm ³



Fleuve Nelson à Gull Rapids (site de la centrale Keeyask)

¹ Normales climatiques tirées de la station météorologique de l'aéroport de Gillam, Environnement Canada (1981-2010).

² Débit annuel moyen à la centrale de Kettle (1981-2010).

³ Stockage compris entre les niveaux d'exploitation minimal et maximal de la centrale de Keeyask.

Les barrages au 21^e siècle – solutions d'adaptation

Au Canada, la construction de barrages a connu son apogée entre 1950 et 1980, et près de la moitié des barrages du pays sont en exploitation depuis plus de 50 ans. Au cours de leur longue durée de vie, les barrages du monde ont beaucoup évolué, que ce soit les techniques de construction, les matériaux, la technologie de surveillance, les connaissances en géologie et en hydrologie ainsi que la surveillance réglementaire. Cette évolution est en partie attribuable aux catastrophes et aux quasi-désastres. Par exemple, en Grande-Bretagne, les ruptures de barrage ont longtemps été considérées comme des accidents, causés par des pluies intenses imprévisibles, jusqu'à ce que les barrages de Bilberry en 1852 et la digue Dale en 1864 cèdent sous un ciel bleu. Des enquêtes ont révélé une négligence grave et fautive, et des lacunes dans les compétences techniques. Les législateurs ont commencé à obliger les propriétaires de barrage à soumettre leurs plans de construction pour approbation et à autoriser des inspections avant le début du remplissage.

La croissance de la population a aussi joué un rôle dans le développement des barrages. Il fallait périodiquement relever les ouvrages des petits villages pour répondre à la demande grandissante de villes en plein essor. L'urbanisation, la déforestation et le drainage en amont ont augmenté les débits de pointe dans les réservoirs. Parallèlement, comme la sédimentation naturelle dans les réservoirs a réduit les volumes utiles, il a fallu draguer ou relever les crêtes. La recherche scientifique a également révélé des vulnérabilités insoupçonnées, dont le soulèvement hydraulique, c'est-à-dire la force ascendante créée par l'eau qui s'infiltre dans le sol sous la structure du barrage. Ce phénomène, peu connu par les premiers constructeurs de barrage, a causé l'effondrement de plusieurs barrages lorsque les fondations se sont soulevées. Il y a également le problème du réseau de tuyauterie : l'eau qui s'infiltre sous l'ouvrage transporte des sédiments qui découpent les canaux et les tuyaux et affaiblissent les fondations du barrage.

La conception technique des barrages a évolué et des solutions de modernisation ont permis d'adapter les ouvrages aux exigences et conditions environnementales changeantes. Les tableaux 2, 3 et 4 présentent une liste partielle des mesures d'adaptation structurelles, opérationnelles et réglementaires destinées à réduire le risque de rupture de barrage. Ces mesures peuvent aussi contribuer à la résistance des barrages aux risques liés aux changements climatiques. La plupart des mesures d'ordre opérationnel, dont une meilleure prévision des inondations et l'abaissement des niveaux d'exploitation des réservoirs, peuvent être adoptées sur une grande échelle. La faisabilité et la rentabilité des adaptations d'ordre structurel, cependant, varient en fonction

des caractéristiques de chaque ouvrage. Par exemple, il pourrait être impossible d'ajouter un pertuis à un barrage existant sans en compromettre l'intégrité structurale ou plus simplement, il pourrait ne pas y avoir suffisamment d'espace pour un évacuateur auxiliaire.

L'aspect économique de la reconstruction d'un barrage dans un climat changeant soulève plusieurs enjeux complexes sur les plans sociaux et réglementaires, auxquels s'ajoutent d'importantes incertitudes concernant les projections de CMP. Pour certains bassins, les simulations climatiques prévoient des augmentations de la CMP supérieures à 100 %. Bien que les climatologues fassent peu confiance à une seule simulation – surtout lorsqu'il s'agit d'extrêmes –, l'approche prudente en matière de réglementation consisterait à exiger des propriétaires de barrage la mise en place d'une protection contre les pires scénarios futurs. Aucune solution de modernisation unique ne pourrait prendre en compte des changements d'une telle ampleur et seules d'importantes mises à niveau structurelles — ou le déclassement — pourraient satisfaire à une réglementation fondée sur des scénarios futurs aussi extrêmes. Si la réglementation et les normes de conception étaient établies en fonction de scénarios climatiques optimistes où les changements de la CMP sont moins grands, cela créerait en revanche un faux sentiment de sécurité. Étant donné l'incertitude des projections climatiques pour de tels extrêmes, établir une réglementation adéquate fondée sur les normes de conception représente un défi de taille.

Du point de vue de la rentabilité, le respect des normes de conception en présence d'incertitudes climatiques si grandes soulève d'autres questions. La modernisation des infrastructures d'un barrage en réponse à une CMP possiblement plus forte n'apporterait aucun avantage direct à la société, autre que la diminution théorique de la possibilité déjà improbable d'un événement catastrophique. L'histoire récente des barrages donne à penser que les défaillances et les bris évités de justesse ne résultent pas d'une conception inadéquate, mais d'une maintenance et d'une surveillance inadéquates, d'une gestion cavalière ou d'un enchaînement d'erreurs et de défaillances mineures.

Étant donné que l'objectif final est de protéger la vie et de maintenir les avantages offerts par les barrages, les exploitants de barrage mettent l'accent sur le profil de risque global, et non sur les seuls risques liés à la conception structurelle du barrage. Le maintien de la confiance de la population à l'égard des infrastructures hydroélectriques exigera des mesures proactives, dont la recherche sur les risques actuels et futurs, l'amélioration de l'estimation des CMP futures et la mise en œuvre d'un ensemble crédible et diversifié de mesures visant à atténuer le risque.

ÉVALUER LE RISQUE GLOBAL

La prise en compte de la réduction des pertes de vie dans l'évaluation du risque global soulève plusieurs enjeux. Un bassin versant est un système complexe formé d'éléments naturels et opérationnels interdépendants. Outre la conception du barrage, d'autres facteurs peuvent entraîner un bris de barrage, notamment un mauvais fonctionnement de l'évacuateur de crue, un arrêt forcé limitant la capacité de production, une panne du système de transport, un manque d'effectifs, l'impossibilité pour le personnel d'atteindre le barrage lors d'une crise ainsi que des erreurs de nature opérationnelle et prévisionnelle. Tous ces facteurs doivent être considérés, tant indépendamment que de façon intégrée.

Pour comprendre la réponse d'un système de barrage après un accident, une panne et de fortes pluies et fontes de neige, on peut mettre au point un modèle de système multifacette, composé de plusieurs éléments : un logiciel produisant divers scénarios météorologiques; un

modèle de pluie-écoulement qui transforme les données météorologiques en débits entrants dans les réservoirs et les centrales; un modèle qui simule la production d'électricité, la gestion de réservoir, les contraintes de transport et la cascade de réactions advenant une panne d'équipement; un modèle hydrodynamique qui décrit l'écoulement en cas de rupture du barrage ou d'une digue; et un modèle de sécurité qui évalue les pertes de vie potentielles selon les schémas d'inondation prévus et la distribution de la population sur le territoire inondable. Le modèle de système évalue la probabilité de défaillances et de pertes de vie en fonction d'un intervalle de récurrence (tous les 10, 100 et 1 000 ans). Ce type d'analyse du risque contribue à déterminer les vulnérabilités remédiables, les plans d'urgence qui pourraient sauver des vies en cas de défaillance et les politiques de développement qui limiteraient les conséquences des inondations.

Tableau 2 Mesures d'adaptation structurelles.

TYPE	MESURE	DESCRIPTION	AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
AMÉLIORATIONS - ÉVACUATEUR DE CRUE	Modification de l'évacuateur principal	Abaissement de la crête du déversoir	- Capacité d'évacuation accrue, avec incidence minimale sur l'aménagement et les opérations générales	- Éventuel redimensionnement des vannes - Considérations structurelles - Perte de capacité d'évacuation pendant la construction - Perte potentielle de capacité d'emmagasinement, augmentation de la fréquence des déversements - Mise à niveau potentielle du bassin de dissipation
		Modifications : déversoir, évacuateur de fond, canal de restitution	- Capacité d'évacuation accrue, avec incidence minimale sur l'aménagement et les opérations générales	- Considérations structurelles - Perte de capacité d'évacuation pendant la construction
		Ajout de pertuis / augmentation de la longueur de crête	- Capacité d'évacuation accrue, avec incidence minimale sur les ouvrages existants - Perte de capacité d'évacuation moindre pendant la construction	- Complexité de la modification des installations existantes
	Remplacement de l'évacuateur principal	Remplacement de l'évacuateur existant par un nouvel ouvrage	- Nouvelle conception - Risques minimaux en matière de rendement/ fiabilité - Possibilité de remplacer des ouvrages près de la fin de leur vie utile	- Coûteux - Éventuelle perte de capacité d'évacuation pendant la construction

Tableau 2 Mesures d'adaptation structurelles (suite)

TYPE	MESURE	DESCRIPTION	AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
AMÉLIORATIONS - ÉVACUATEUR DE CRUE	Modification de l'évacuateur auxiliaire	Modification des évacuateurs auxiliaires existants	- Modifier la structure pour accroître la capacité sans augmenter l'espace requis (ex., déversoir en touches de piano ou en labyrinthe, seuil gonflable)	- Perte de capacité d'évacuation auxiliaire pendant la construction - Certaines mesures peuvent réduire la capacité de stockage et la flexibilité opérationnelle
	Construction d'un évacuateur auxiliaire	Ajout d'un évacuateur (à vannes ou non)	- Capacité d'évacuation accrue - Aucune perte de capacité de l'évacuateur existant	- Nécessité de construire/exploiter/maintenir un ouvrage indépendant - Contraintes possibles liées à l'espace disponible
		Ajout d'une digue fusible/hausse fusible	- Relativement simple à installer/modifier	- Conséquences environnementales de la sédimentation causée par l'érosion de la digue - Coût et temps de réparation de la digue fusible après utilisation - Coûts de maintenance/entretien en cas d'utilisation fréquente - Détermination d'un endroit convenable pour réduire le risque de déclenchement d'une défaillance du barrage - Perte possible de fiabilité et de performance des digues fusibles érodables en cas de maintenance inadéquate - Dans des conditions de gel, les digues fusibles peuvent ne pas être fonctionnelles - Débit fortement incontrôlable pendant l'utilisation de la digue fusible
AMÉLIORATIONS - TERRASSEMENT ET CANAUX	Modification du remblai	Augmenter la hauteur du remblai pour accroître la capacité de surcharge du réservoir et la capacité d'évacuation correspondante	- Construction relativement simple à bas coût - Possibilité de construction de parapets en crête pour augmenter la hauteur de remblai localement, dans la zone de revanche du barrage qui est soumise à l'action des vagues	- Éventuelles modifications requises aux vannes de l'évacuateur ou au bassin de dissipation (risques de cavitation accrus de vitesses plus élevées) - Peu efficace si la capacité de rétention dépend de la hauteur d'autres ouvrages principaux
	Ajout d'une capacité de stockage en amont	Construction d'un réservoir en amont pour atténuer l'onde de crue	- Aucune modification requise au site existant	- Nécessité de construire/exploiter/maintenir un ouvrage indépendant - Potentiel de risque accru en cas de mode de défaillance en cascade

Tableau 2 Mesures d'adaptation structurelles (suite)

TYPE	MESURE	DESCRIPTION	AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
AMÉLIORATIONS – TERRASSEMENT ET CANAUX	Améliorations des canaux	Améliorer les canaux amont/ aval pour accroître la capacité de sortie du barrage et réduire le risque d'inondation en aval	- Permet le passage des débits plus élevés pour des niveaux amont/aval donnés - Améliorations au canal en aval susceptibles de réduire les impacts d'une rupture de barrage pour les communautés avoisinantes	- Considérations environnementales
		Aménager un déversoir/canal de dérivation	- Permet d'écouler le passage sécuritaire de la crue autour de l'ouvrage principal du barrage	- Doit être bien situé et conçu pour assurer une protection contre l'érosion du canal et la rupture du barrage - Peut exiger un revêtement en enrochement pour prévenir une érosion excessive - Conception adéquate et maintenance continue du canal pour en assurer la fiabilité
	Système de protection contre le débordement	Renforcer/stabi- liser les remblais pour permettre le passage sécuritaire de la crue pendant le débordement	- De plus en plus considéré comme une solution viable aux incertitudes hydrologiques en l'absence d'autres options réalisables - N'entraîne aucun changement dans l'exploitation du barrage	- Peut ne pas être faisable dans les centrales de haute chute - Ne convient habituellement qu'aux centrales de basse chute, où le débordement est de courte durée et d'ampleur limitée - Mesure non acceptée par certains organismes réglementaires - Exige une analyse approfondie des modes de défaillance du barrage étant donné le risque important de rupture structurelle au moment du débordement
AMÉLIORATIONS - CENTRALE	Ajout de groupes/ remise en service	Augmenter la capacité totale des groupes turbines- alternateurs pour les fortes crues	- Aucune modification requise de l'évacuateur - Amélioration de la production d'électricité	- Possibilité d'une hausse minimale de la capacité de débit - Perte de production d'électricité pendant la construction - Exige une justification de la hausse des débits moyens (facteur de capacité)
DÉMANTÈLEMENT	Démolition des ouvrages	Démolir les ouvrages	- Élimination du risque de défaillance/rupture - Peut être indiqué si les installations sont à la fin de leur vie utile	- Perte d'un actif/d'une source de production électrique - Potentiel de changements importants dans le régime hydrique - Besoin éventuel de mesures correctrices pour la restauration/adaptation de l'habitat

Tableau 3 Mesures d'adaptation opérationnelles.

TYPE	MESURE	DESCRIPTION	AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
OPÉRATIONS DE LA CENTRALE	Réduction du niveau du réservoir	Réduire le niveau normal d'exploitation pour accroître la capacité de stockage disponible afin d'atténuer l'onde de crue	Aucune modification des ouvrages requise	- Réduction de l'efficacité des turbines/de la hauteur de chute et de la production d'électricité - Prise en compte des limites structurelles/mécaniques liées au niveau minimal du réservoir - Considérations environnementales/communautaires liées au changement dans le régime hydrique
		Utiliser un système de suivi/prévisions pour abaisser le niveau du réservoir en mode préventif avant la crue	Aucune modification des ouvrages requise	- Exige des capacités de prévision pour prévoir les inondations - Peut ne pas être efficace si le réservoir est trop petit
OPÉRATIONS DU SYSTÈME	Modification de la régulation en amont	Réduction des débits de dérivation	Aucune modification structurelle requise	- Modification éventuelle des permis d'exploitation - Exige des prévisions de débit fiables
		Changement dans les opérations en amont (vidange préventive) pour réduire les débits de pointe de la crue	Aucune modification structurelle requise	- Modification éventuelle des permis d'exploitation - Exige des prévisions de débits fiables et la coordination de stations multiples - Peut ne pas être réalisable dans les situations déclenchant le mode de défaillance en cascade avec des stations multiples

Tableau 4 Mesures d'adaptation réglementaires.

TYPE	MESURE	DESCRIPTION	AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
ÉVALUATION DU RISQUE / RECLASSIFICATION DU BARRAGE	Passer en revue les mesures possibles pour réduire l'exigence relative à la crue de conception en réduisant les conséquences d'une rupture/classification du risque	Modifications aux mesures d'urgence, expropriation des terres en zone inondable afin de réduire les pertes de vie humaine et les conséquences d'une rupture	Aucune modification aux ouvrages et aux opérations requise	- Réduction des conséquences d'une rupture peut ne pas être possible - La reclassification du barrage ne réduit pas le risque hydrologique des ouvrages; ne change que les conséquences d'une rupture
ADOPTION D'UNE APPROCHE TENANT COMPTE DU RISQUE POUR LA SÉLECTION DE LA CRUE DE CONCEPTION ET DU DIMENSIONNEMENT DE L'ÉVACUATEUR	Approche tenant compte du risque pour la sélection de la crue de conception plutôt que l'approche classique fondée sur des normes	Évaluer les conséquences probables d'une rupture du barrage due à des crues extrêmes en regard des coûts liés à l'augmentation de la capacité d'évacuation pour parer à un tel événement. La dimension de l'évacuateur est déterminée en fonction de la probabilité d'une inondation, des conséquences d'une rupture, de la définition/compréhension d'un risque acceptable, et de l'application du principe ALARP (as low as reasonably practicable)	Justifie la capacité d'évacuation requise pour un ouvrage donné, compte tenu du risque probabiliste d'inondation et des conséquences d'une rupture, plutôt que d'adopter une crue de conception prescrite reposant sur la classification relativement large des barrages dans le cadre d'une approche fondée sur les normes Donne aux propriétaires et autres intervenants une meilleure compréhension des risques d'inondation propres à un site et permet d'établir la priorité des mesures visant à corriger les faiblesses Les programmes de sécurité des barrages tenant compte du risque sont de plus en plus considérés comme une option en réponse aux faiblesses	Exige une analyse/expertise plus approfondie du risque d'inondation que l'approche fondée sur les normes : - Identification de tous les modes de rupture - Quantification des probabilités et conséquences de chaque mode de rupture - Élaboration d'une distribution de probabilité continue du risque d'inondation (jusqu'à la CMP) - Prise en compte éventuelle d'une distribution de probabilité conjointe d'événements non indépendants - Définition du risque acceptable - Démonstration du principe ALARP pour la dimension de l'évacuateur - La plupart des organismes réglementaires utilisent encore une approche fondée sur les normes pour évaluer le risque d'inondation. Plusieurs (ex. CDA) reconnaissent l'approche tenant compte du risque, mais fournissent peu de lignes directrices quant à la portée et aux exigences de l'approche - Peut être considéré non acceptable par certains organismes réglementaires

Abréviations

CCSM3	National Center for Atmospheric Research (NCAR) Community Climate System Model version 3
CDA	Canadian Dam Association / Association canadienne des barrages
CGCM3	Canadian Climate Centre Coupled General Circulation Model version 3 / Modèle canadien couplé climatique global, version 3
CMP	crue maximale probable
CO₂	dioxyde de carbone
CORDEX	COordinated Regional Climate Downscaling EXperiment
CRCM4	Canadian Regional Climate Model version 4 / Modèle régional canadien de climat, version 4
ECHAM5	European Centre Hamburg Model version 5
ECP2	Scripps Experimental Climate Prediction Center Regional Spectral Model
EMP	enneigement maximal probable
GES	gaz à effet de serre
GFDL_CM2.5	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Climate Model version 2.5
HadCM3	Met Office Hadley Centre's regional climate model version 3
MM5I	Pennsylvania State University/National Center for Atmospheric Research (NCAR) Mesoscale Model
NARCCAP	North American Regional Climate Change Assessment Program
PMP	précipitation maximale probable
ppm	parties par million
RCM3	Regional Climate Model version 3
RCP	Representative Concentration Pathways / trajectoires de concentration représentatives
RT	Rio Tinto
SRES	Special Report on Emissions Scenarios / Rapport spécial sur les scénarios d'émission
SSARR	Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation
WMO	World Meteorological Organization / Organisation météorologique mondiale

Références

- Arrhenius, S. (1896). On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground, (page 270).
- Bouchard, R. (1988). *Le pays du Lac-Saint-Jean Esquisse historique de la colonisation* (2^e éd.). Chicoutimi-Nord, Québec.
- Canadian Dam Association. (2013). *Dam Safety Guidelines 2007* (Rev. 2013.).
- Cantin, L. (1975). *Le Lac Kénogami et Saint-Cyriac 1825-1924*. Université Laval.
- De Elía, R., & Côté, H. (2010). Climate and climate change sensitivity to model configuration in the Canadian RCM over North America. *Meteorol. Z.*, 19(4), 325-339. doi: 10.1127/0941-2948/2010/0469
- Gagnon, G. (2007). Pulperie de Chicoutimi. *Encyclopédie de patrimoine culturel de l'Amérique française*. Consulté le 21 octobre 2015, à http://www.ameriquefrancaise.org/fr/article-243/Pulperie_de_Chicoutimi.html#.VZ5_Tt-GaVo
- Grescoe, T. (1997). After the deluge. *Canadian Geographic*. Consulté à http://www.canadiangeographic.ca/magazine/ma97/feature_saguenay_floods.asp
- Hulburt, E. O. (1931). The Temperature of the Lower Atmosphere of the Earth. *Physical Review*, 38(10), 1876-1890. doi:10.1103/PhysRev.38.1876
- International Commission on Large Dams. (2015). ICOLD. *Classification by Reservoir Capacity*. Consulté le 25 janvier 2015, à http://www.icold-cigb.org/GB/World_register/general_synthesis.asp?IDA=211
- IPCC. (2012). Summary for Policymakers. In C. B. Field, V. Barros, T. F. Stocker, & Q. Dahe (Eds.), *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9781139177245
- Kunkel, K. E., Karl, T. R., Easterling, D. R., Redmond, K., Young, J., Yin, X., & Hennon, P. (2013). Probable maximum precipitation and climate change. *Geophysical Research Letters*, 40(7), 1402-1408. doi:10.1002/grl.50334
- Mearns, L. O., Gutowski, W. J., Jones, R., Leung, L.-Y., McGinnis, S., Nunes, A. M. B. & Qian, Y. (2009). A regional climate change assessment program for North America. *EOS Transactions*, 90(36), 8 September 2009, pp. 311-312
- McClean, D. L., Scovil, S. S., & Johnson, J. T. (1914). *Report on Manitoba Water Powers* (No. 7). Ottawa.
- Myers, V. A. (1967). The estimation of extreme precipitation as the basis for design floods Resume of practice in the United States. In *Proceedings of the Leningrad Symposium on Floods and their Computation* (pp. 84-101). Gentbrugge, Belgium: International Association of Scientific Hydrology.
- O'Dale, C. (2015). Manicouagan impact structure. *The Royal Astronomical Society of Canada*. Consulté le 21 octobre 2015, à <http://ottawa-rasc.ca/wiki/index.php?title=Odale-Articles-Manicouagan>
- O'Kane, J. (2013). Massive project gives new life to old hydro dams. *The Globe and Mail*. Consulté from <http://www.theglobeandmail.com/report-on-business/breakthrough/massive-project-gives-new-life-to-old-hydro-dams/article15613280/?page=all>
- Plass, G. N. (1956). The Carbon Dioxide Theory of Climatic Change. *Tellus A*, 8(1896), 140-154. doi:10.3402/tellusa.v8i2.8969
- Rousseau, A. N., Klein, I. M., Freudiger, D., Gagnon, P., Frigon, A., & Ratté-Fortin, C. (2014). Development of a methodology to evaluate probable maximum precipitation (PMP) under changing climate conditions: Application to southern Quebec, Canada. *Journal of Hydrology*, 519, 3094-3109. doi:10.1016/j.jhydrol.2014.10.053
- Stephens, G. L., Li, J., Wild, M., Clayson, C. A., Loeb, N., Kato, S., ... Andrews, T. (2012). An update on Earth's energy balance in light of the latest global observations. *Nature Geoscience*, 5(10), 691-696. doi:10.1038/ngeo1580
- Thorleifson, L. H. (1966). Review of Lake Agassiz history. *Sedimentology, Geomorphology, and History of the Central Lake Agassiz Basin. Geological Association of Canada Field Trip Guidebook, B(2)*, 55-84.
- Tomlinson, E. M., & Kappel, W. D. (2009). Dam Safety: Revisiting PMPs. *Hydro Review*, (7), 1-8. Consulté à <http://www.hydroworld.com/articles/hr/print/volume-28/issue-7/cover-story/dam-safety-revisiting.html>
- Warkentin, A. (1987). *Series of Precipitation Event Maps for the Prairie Provinces, 1975-1987*. Manitoba Water Resources Branch. Unpublished.
- WMO. (2009). *Manual on Estimation of Probable Maximum Precipitation (PMP)* (WMO-No. 1045). Geneva.

