

The background of the page features a soft, artistic illustration of a landscape. It shows a wide, calm body of water in the foreground, with rolling hills and mountains in the distance. The color palette is muted and natural, consisting of various shades of light blue, teal, and pale green, creating a serene and atmospheric effect.

# Stratégie pour composer avec l'incertitude climatique liée aux inondations dans le bassin du lac Champlain et de la rivière Richelieu

**Étude internationale du lac Champlain et  
de la rivière Richelieu**

RAPPORT À LA COMMISSION MIXTE INTERNATIONALE

*Présenté par*

Bill Werick

Groupe de travail technique sur la  
gestion des inondations et les mesures d'atténuation

mai 2022

Version anglaise rédigée par :

Bill Werick

Traduction par



Revue par :

Baptiste François, Ph.D.

# REMERCIEMENTS

---

Ce livre blanc a fait l'objet d'examens et de commentaires précieux de la part des membres du comité d'étude et des responsables de l'étude.

## GRUPE D'ÉTUDE INTERNATIONAL DU LAC CHAMPLAIN ET DE LA RIVIÈRE RICHELIEU

### **Coprésident, Canada**

Jean-François Cantin

### **Coprésidente, États-Unis**

Deborah H. Lee

### **Membres, Canada**

Michel Jean

Daniel Leblanc

Madeleine Papineau

Richard Turcotte

### **Membres, États-Unis**

Eric Day

Ann Ruzow Holland

Pete LaFlamme

Kristine Stepenuck

### **Cogestionnaire de l'étude, Canada**

Serge Villeneuve

### **Cogestionnaire de l'étude, États-Unis**

Mae Kate Campbell

# RÉSUMÉ

---

Le présent rapport décrit la stratégie de prise en compte des changements climatiques par le Groupe d'étude international du lac Champlain et de la rivière Richelieu dans ses conclusions et ses recommandations concernant l'atténuation des inondations.

## OBJECTIF D'ÉTUDE

La stratégie en question est conforme aux lignes directrices de la Commission mixte internationale en ce qui a trait à l'anticipation des impacts des changements climatiques, notamment grâce à un processus appelé « Decision Scaling »<sup>1</sup>. Cette démarche permet de s'affranchir des limites caractéristiques des projections climatologiques qui sont, par définitions, incertaines, et qui autorise une prise de décision robuste malgré l'incertitude. Une partie du travail décrit dans la stratégie a déjà été menée à terme, tandis que d'autres éléments sont encore en cours d'élaboration.

## APPROCHER

Les experts de l'étude appliqueront la méthode Decision Scaling suivant quatre approches et cela à partir soit d'analyses individuelles conduites à certaines fins, soit d'analyses groupées pour d'autres fins. La première approche est statistique. Les experts de l'étude développeront trois ensembles stochastiques d'apports nets du bassin (ANB) à partir de trois régimes hypothétiques d'apports historiques, cela pour permettre une prédiction à propos des futurs régimes d'apports. Quand ils sont utilisés comme intrants dans une série de modèles informatiques, les apports peuvent être exprimés en niveaux d'eau, en débits, en étendue et en profondeur des inondations ainsi qu'en dommages causés. Les résultats stochastiques seront

particulièrement utiles pour estimer les ratios coûts-bénéfices de solutions structurelles potentielles.

La deuxième approche consiste à faire intervenir une crue maximale probable (CMP). La crue historique de 2011 a été le résultat de trois facteurs relativement indépendants, soit : 1) une forte accumulation de neige; 2) des températures fraîches au début du printemps qui ont favorisé le maintien d'une grande partie du couvert neigeux, et 3) des précipitations abondantes en mars et en avril. La CMP consiste à supposer que chacun de ces trois facteurs, pris individuellement, est plus important que les autres et qu'après combinaison des trois, la crue résultante est plus importante que celle de 2011. Le concept de CMP et des concepts similaires ont déjà été utilisés pour éviter tout défaut de conception dans le cas des projets de contrôle des inondations qui risqueraient de provoquer des catastrophes. De plus, ce concept pourrait être utile pour délimiter les plaines inondables aux fins de leur gestion.

La troisième approche est celles des stress-tests dans lesquels la température annuelle moyenne et les quantités de précipitations sont progressivement augmentées, et où les données produites par un « générateur météorologique » alimentent un modèle d'apports nets dans le bassin du lac Champlain. Il devient dès lors possible de calculer les niveaux de crue et les dommages dus aux différentiels de niveaux obtenus, puis de comparer ces résultats à un large éventail de

---

<sup>1</sup> NDT : Cette méthode, mise au point par le professeur Casey Brown, n'a pas d'équivalent en français, d'autant qu'aucun auteur francophone n'a encore écrit à son sujet.

projections de précipitations et de températures dérivés de nombreux modèles climatiques. Les experts de l'étude peuvent ainsi cartographier l'éventail des répercussions des inondations projetées par ces modèles.

La quatrième approche consiste, à partir de résultats historiques de modèles de circulation générale et régionale, à déterminer les apports nets de bassin qui pourraient se concrétiser au XXI<sup>e</sup> siècle, et cela selon différents scénarios d'émissions.

Les quatre approches seront appliquées de concert afin de tester et de peaufiner les constats tirés de chacune d'elles pour ce qui est des niveaux probables du lac Champlain au XXI<sup>e</sup> siècle. De multiples autres approches seront aussi appliquées pour éclairer les recommandations du Groupe d'étude concernant les plans d'intervention en cas d'inondation et la gestion des plaines inondables. Les experts ont accepté de dévoiler leurs communications internes sur les questions techniques, les hypothèses et les choix de modélisation. Le rapport final sur le climat, qui doit paraître plus tard cette année, contiendra de courts résumés de l'analyse de ces questions par l'équipe afin que les lecteurs, et notamment les chercheurs travaillant sur d'autres études climatiques, puissent bénéficier des fruits de ces délibérations.



---

## LA COMMISSION MIXTE INTERNATIONALE

---

En vertu du Traité des eaux limitrophes de 1909 (le Traité), les gouvernements des États-Unis et du Canada ont établi des principes de base pour gérer les nombreuses questions touchant aux eaux le long de leur frontière internationale commune. Le Traité a établi la CMI en tant qu'organisme international permanent chargé de conseiller et d'aider les gouvernements relativement à tout un ensemble de questions liées à la gestion des eaux. La CMI est investie de deux grandes responsabilités, soit réglementer l'utilisation partagée des eaux et étudier les questions transfrontalières en vue de recommander des solutions.





# RESTEZ CONNECTÉS ET MOBILISÉS

---

Vous voulez en savoir plus sur l'Étude du lac Champlain et de la rivière Richelieu? Vous avez une question à poser au Groupe d'étude?

Envoyez un courriel à [lcr@ijc.org](mailto:lcr@ijc.org)

[Inscrivez-vous](#) pour recevoir des nouvelles de l'Étude, comme les avis de réunions publiques et de séances de consultation, les rapports, les fiches d'information et d'autres publications.

***Suivez l'Étude sur les médias sociaux***

 [@IJCsharedwaters](https://twitter.com/IJCsharedwaters)

 [www.facebook.com/commissionmixteinternationale](https://www.facebook.com/commissionmixteinternationale)

 [www.linkedin.com/company/international-joint-commission/](https://www.linkedin.com/company/international-joint-commission/)



# TABLE DES MATIÈRES

---

Remerciements	i
Résumé	ii
Restez connectés et mobilisés	vi
<b>1 INTRODUCTION</b>	<b>1</b>
<b>2 UNE MÉTHODE DE PRISE DE DÉCISION OÙ INTERVIENNENT CLIMATOLOGIE ET HYDROLOGIE</b>	<b>2</b>
<b>3 TRAVAIL DES EXPERTS</b>	<b>4</b>
<b>4 TYPES DE CONSTATATIONS ET DE RECOMMANDATIONS QUE LE GROUPE D'ÉTUDE POURRAIT FORMULER À PROPOS DU CLIMAT</b>	<b>5</b>
<b>5 APPLIQUER LES QUATRE PERSPECTIVES POUR ESTIMER L'AMPLEUR D'INONDATIONS FUTURES</b>	<b>7</b>
5.1 PERSPECTIVE 1. FUTURS APPORTS NETS DU BASSIN GÉNÉRÉS DE FAÇON STOCHASTIQUE	7
5.1.1 Modèle avec tendance linéaire et modèle de moyenne non-stationnaire	8
5.1.2 Analyse des cycles dans un ensemble de données chronologiques	9
5.2 PERSPECTIVE 2. CRUE MAXIMALE PROBABLE	11
5.3 PERSPECTIVE 3. STRESS-TEST DU SYSTÈME À PARTIR D'ANB OBTENUS À L'AIDE D'UN « GÉNÉRATEUR MÉTÉOROLOGIQUE »	13
5.4 PERSPECTIVE 4. MODÉLISATION CLIMATIQUE	16
5.5 COLLABORATION ET COORDINATION ENTRE LES TROIS ÉQUIPES	17
5.6 DISCUSSIONS ENTRE PAIRS	19
5.7 LA QUESTION	20
5.8 LES FAITS PERTINENTS	20

5.9	EXEMPLE DE RÉOLUTION	22
<b>6</b>	<b>SIMULATION DES DOMMAGES CAUSÉS PAR LES APPORTS NETS DU BASSIN SELON L'APPROCHE DECISION SCALING</b>	<b>23</b>
<b>7</b>	<b>ÉVALUER LES PLANS SUIVANT QUATRE PERSPECTIVES</b>	<b>24</b>
<b>8</b>	<b>CONSTATATIONS ET RECOMMANDATIONS PAR CATÉGORIE</b>	<b>26</b>
8.1	CONSTATATIONS GÉNÉRALES À PROPOS DE L'EFFET DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LE NIVEAU DU LAC CHAMPLAIN ET SUR LE DÉBIT DE LA RIVIÈRE RICHELIEU DANS L'AVENIR	26
8.2	CLIMAT ET ALTERNATIVES DES THÈMES 1 ET 2	26
8.3	CLIMAT ET ALTERNATIVES DES THÈMES 3 ET 4	27
<b>9</b>	<b>GESTION ADAPTATIVE</b>	<b>29</b>
9.1	INONDATION AGGRAVÉE PAR LA FONTE DES NEIGES	29
9.2	ÉVAPOTRANSPIRATION	29
9.3	MÉGA-CRUES	29

## LISTE DES FIGURES

---

Figure 1. Les alternatives pour atténuer l'impact des inondations sont organisées en quatre thèmes. ....	5
Figure 2. Trois illustrations des ANB (« NBS ») historiques dans le lac Champlain : tendance (en haut), variation (au milieu) et moyennes cycliques. ....	8
Figure 3. Le cycle projeté dans l'oscillation arctique (panneau du bas) entraîne les cycles d'ANB dans la simulation stochastique des ANB du SSSC (panneau du haut). ....	9
Figure 4. Tracé des valeurs historiques de l'indice OA (« AO ») (courbe en pointillés rouge; ordonnée de gauche) et des ANB annuels (courbe bleue; ordonnée de droite). ....	10
Figure 5. Tracé d'une année à partir des ensembles de données stochastiques d'ANB avec un niveau maximal de 32,52 m (106,7 pieds). ....	11
Figure 6. Trois équipes de spécialistes du climat contribueront au modèle du bassin d'Hydrotel pour appuyer les évaluations quantitatives des risques d'inondation liés au climat. ....	14
Figure 7. Taux d'apports nets du bassin à partir d'une projection du modèle climatique. ....	15
Figure 8. Estimations du bilan hydrique en fonction du niveau du lac Champlain, selon la séquence des ANB de la figure 7. ....	15
Figure 9. ANB quotidiens maximums selon le résultat des simulations du générateur météorologique pour différentes températures et précipitations. ....	16
Figure 10. Diagramme de contribution des tâches de chaque équipe à la méthode Decision Scaling. ....	18
Figure 11. Rapports et article sur le travail du Groupe d'étude LCRR à propos de la méthode Decision Scaling. ....	19

## LISTE DES TABLEAUX

---

Tableau 1. Forces et faiblesses de chaque perspective. ....	24
---	----

# 1 INTRODUCTION

---

Le présent rapport propose la stratégie que devrait suivre le Groupe d'étude international du lac Champlain et de la rivière Richelieu (LCRR) pour prendre en compte la variabilité et les changements du climat dans ses conclusions et ses recommandations relatives aux inondations dans le bassin du lac Champlain et de la rivière Richelieu. Certains des travaux décrits dans cette stratégie sont terminés, tandis que d'autres se poursuivent. Bien que le présent document ne soit pas un rapport d'étape, il y est en partie question des travaux en cours en vue de clarifier la stratégie. Les rapports sur les résultats de l'application de ces méthodes seront terminés plus tard en 2021.

Après l'inondation record de 2011 dans le bassin LCRR, les gouvernements du Canada et des États-Unis ont adressé un renvoi<sup>2</sup> à la Commission mixte internationale (CMI) pour qu'elle formule des recommandations sur ce qui devrait être fait afin d'atténuer l'impact des inondations. La CMI a alors mis sur pied le Groupe d'étude international du lac Champlain et de la rivière Richelieu en 2017 qu'elle a chargé de superviser et de gérer l'étude portant sur les causes et les impacts des inondations dans le bassin, ainsi que sur les risques en découlant et les correctifs possibles. En cours d'année, le débit des apports dans le lac Champlain varie, le pic étant généralement atteint au printemps. La plupart du temps, les crues qui surviennent en avril et en mai sont le résultat de débits entrants élevés et soutenus en provenance des affluents du lac. Les débits enregistrés durant cette période varient d'une année à l'autre en raison de l'évolution naturelle du climat stationnaire, de l'alternance quasi périodique entre les périodes de sécheresse et les périodes pluvieuses, et des changements climatiques. La question fondamentale qui se pose au Groupe d'étude consiste à savoir comment se préparer aux inondations qui surviendront dans le bassin du lac Champlain et de la rivière Richelieu dans les prochaines décennies. La stratégie proposée dans les pages suivantes vise à trouver la meilleure réponse possible à cette question malgré l'incertitude incontournable associée à l'estimation de la gravité et des risques d'inondation dans l'avenir. D'après les premiers résultats des analyses climatiques, la région doit se préparer à connaître des niveaux d'eau généralement plus bas et des problèmes associés au phénomène d'étiage.

*La question fondamentale qui se pose au Groupe d'étude consiste à savoir comment se préparer aux inondations qui surviendront dans le bassin du lac Champlain et de la rivière Richelieu dans les prochaines décennies.*

*D'après les premiers résultats des analyses climatiques, la région doit se préparer à connaître des niveaux d'eau généralement plus bas et des problèmes associés au phénomène d'étiage.*

---

<sup>2</sup> Demande officielle des deux gouvernements à la Commission mixte internationale (CMI) de formuler des recommandations sur une question particulière.

## 2 UNE MÉTHODE DE PRISE DE DÉCISION OÙ INTERVIENNENT CLIMATOLOGIE ET HYDROLOGIE

---

De nombreuses études réalisées sur les ressources hydriques au XXI<sup>e</sup> siècle reposent sur des modèles climatiques qui permettent d'établir un ensemble de conditions hydrologiques à partir desquels déterminer les impacts subis par le réseau hydrographique examiné. Les tests fondés sur cette approche sont limités à une gamme d'intrants hydrologiques dérivés de modèles climatiques. En revanche, la stratégie décrite dans le présent document suit la méthode dite « Decision Scaling » qui permet de « voir » par-delà les projections climatologiques — inévitablement incertaines — et de déterminer quelles décisions robustes peuvent être prises en dépit des incertitudes. La méthode Decision Scaling consiste à soumettre le système à des stress-tests<sup>3</sup> pour voir comment il réagirait sous un régime hydrologique de plus en plus extrême, puis à tenir compte du degré de plausibilité du régime hydrologique envisagé, de l'ampleur des impacts et des stratégies d'atténuation au stade de la planification. Ici, la notion de « plausibilité » revient à dire que, selon une analyse ou des données régionales, il existe des preuves qu'une crue d'une certaine ampleur pourrait se produire.

Pour l'étude LCRR, les données probantes seront obtenues suivant quatre approches :

- 1 Calcul stochastique des futurs apports nets du bassin (ANB).
- 2 Calcul en fonction de la crue maximale probable.
- 3 Série de stress-tests du système à partir des ANB dérivés d'un « générateur météorologique ».
- 4 Modélisation climatique.

Chacune de ces approches est abordée dans le présent rapport et toutes seront utilisées conjointement pour tester et peaufiner les constatations faites à partir de l'approche adoptée à propos des niveaux probables du lac Champlain dans le courant du XXI<sup>e</sup> siècle.

---

<sup>3</sup> NDT : Bien que l'on trouve parfois « stress de résistance » dans le domaine financier (bancaire), en sciences et techniques, on rencontre plus couramment stress-test dans les textes non-traduits

Des quatre approches en question, seule la modélisation stochastique envisage une probabilité de crues beaucoup plus importantes que la crue record. Ce type de planification est facilité par l'utilisation de modèles de type ISEE, qui affichent sur une carte les impacts des inondations bâtiment par bâtiment. La méthode Decision Scaling, qui a été mise au point par Casey Brown, est utilisée dans de nombreux articles de revues à comité de lecture (Brown et al, 2012; Moody et Brown, 2012; Ghile et al, 2014; Steinschneider et al, 2015; Poff et al, 2016). C'est aussi l'approche adoptée par la CMI dans sa stratégie climatique pour les nombreux Conseils internationaux qu'elle a établis. L'analyse climatique traditionnelle réalisée dans le cadre de la présente étude donne à penser que le risque d'inondation diminuera au cours du XXI<sup>e</sup> siècle, bien qu'il demeure possible qu'une crue supérieure à celle de 2011 survienne à un moment donné. L'analyse de chacun des quatre points de vue montre que des inondations bien pires que celles de 2011 sont plausibles et que la planification actuelle des mesures d'atténuation des inondations, à l'aide d'outils comme ceux qui ont été élaborés à la faveur de cette étude, est une bonne réponse à des événements d'impact élevé et de faible probabilité.

D'après les évaluations effectuées dans le cadre de l'étude sur le bassin LCRR, il convient de noter que la plausibilité d'inondations plus importantes est trop faible pour influencer sur le ratio coûts-bénéfices d'un projet structurel. Toutefois, il se peut que des mesures ne puissent être prises que si une inondation de cette ampleur est imminente, et le fait de connaître les limites supérieures de l'inondation permet aux planificateurs des interventions en cas d'inondation de déterminer le type de mesures à prendre et les lieux d'intervention.

### 3 TRAVAIL DES EXPERTS

---

Une équipe d'experts effectuera l'analyse selon les quatre approches présentées. S'agissant de la modélisation climatique (Approche 4), mentionnons le document intitulé « Will Evolving Climate Conditions Increase the Risk of Floods of the Large U.S.-Canada Transboundary Richelieu River Basin? » de Phillippe Lucas-Picher, Simon Lachance-Cloutier, Richard Arsenault, Annie Poulin, Simon Ricard, Richard Turcotte et François Brissette. Richard Turcotte est membre du Groupe d'étude et MM. Lucas-Picher et Lachance-Cloutier conseillent le Groupe d'étude en matière de modélisation hydrologique et du climat. Taha Ouarda dirige le travail sur la crue maximale probable. Taesam Lee travaille sur les apports nets du bassin (approche stochastique). Baptiste François générera les données de température et de précipitations obtenues lors des stress-tests, cela en vue de leur chargement dans le modèle de bassin hydrologique et de la production de données sur les apports nets du bassin devant alimenter les stress-tests. M. Casey Brown dirigera le travail d'ensemble relatif à la prise de décision (Decision Scaling) qui intègre ces perspectives. Cette équipe sera appuyée par certains membres du Groupe d'étude international LCRR qui ont une vaste expérience de la gestion de l'incertitude climatique, ainsi que par des experts des groupes de travail techniques.



## 4 TYPES DE CONSTATATIONS ET DE RECOMMANDATIONS QUE LE GROUPE D'ÉTUDE POURRAIT FORMULER À PROPOS DU CLIMAT

Le Groupe d'étude LCRR envisage de tirer des conclusions à propos de l'impact futur des changements climatiques sur le niveau du lac Champlain et le débit de la rivière Richelieu. Le Groupe d'étude s'intéresse surtout aux inondations transfrontalières, mais si cette recherche fournit la preuve que le niveau du lac va généralement diminuer au cours du XXI<sup>e</sup> siècle, le Groupe d'étude pourrait alors tirer une conclusion parallèle au vu, non seulement de la réduction du risque d'inondation, mais aussi des risques d'impacts accrus sur les loisirs et l'environnement.

Le Groupe d'étude recommandera éventuellement des alternatives susceptibles de favoriser une réduction du risque d'inondation. Il a commencé par répartir ces alternatives suivant quatre thèmes (figure 1). Les mesures structurelles relèvent soit du thème 1 (qui porte sur des structures comme des dérivations en vue de réduire le niveau d'eau en fonction du débit entrant), soit du thème 2 (stockage dans les hauteurs pour réduire les apports dans le lac Champlain).

Les alternatives des thèmes 1 et 2 seraient évaluées en partie par le biais d'une comparaison entre les avantages et les coûts. Les coûts de construction des structures sont absorbés à court terme et, dans certaines limites, ils sont prévisibles.

Mais les avantages découlent en grande partie de la valeur associée à la réduction des dommages dus aux inondations. Cette valeur résulte d'une combinaison de l'ampleur et de la probabilité d'un impact. Les décisions du Groupe d'étude au sujet des alternatives des thèmes 1 et 2 reposeront donc sur des analyses fréquentielles des crues.

Le Groupe d'étude décidera également s'il doit recommander des pratiques de gestion exemplaires pour les mesures de planification d'urgence en cas d'inondation (thème 3). Les coûts de ces mesures sont généralement moindres et, dans une certaine mesure, ils n'interviennent qu'en cas d'inondation imminente. Un plan des mesures d'urgence consiste à tenir compte d'un événement ou d'une circonstance probable dans un avenir prévisible. Ainsi, dans la méthode Decision Scaling, il est important de déterminer s'il est plausible qu'une crue d'une certaine ampleur se produise à un moment donné.

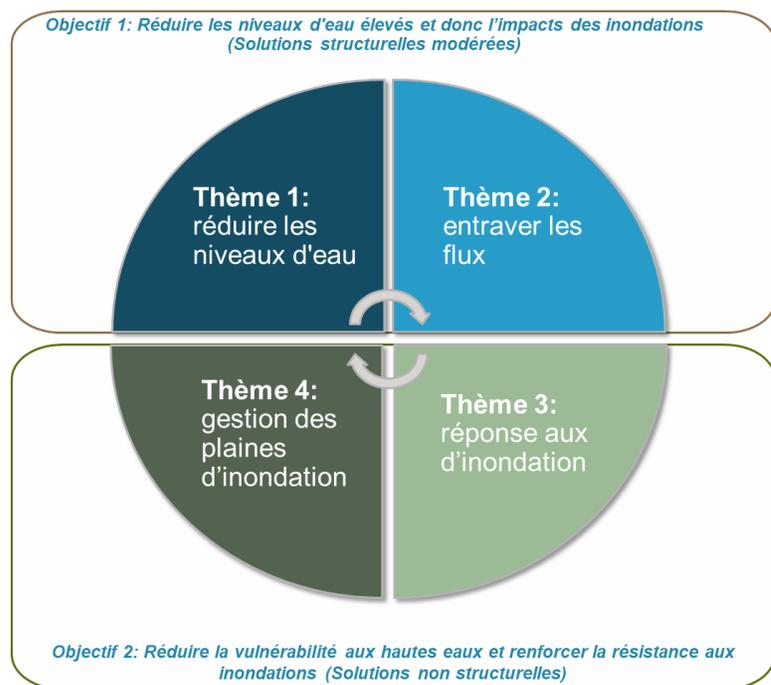


Figure 1. Les alternatives pour atténuer l'impact des inondations sont organisées en quatre thèmes.

Enfin, le Groupe d'étude envisagera des alternatives devant permettre une meilleure gestion des plaines inondables (thème 4). Ces alternatives pourront combiner les exigences des trois premiers thèmes. Normalement, la gestion des plaines inondables concerne à un territoire délimité par des inondations d'une certaine fréquence et, dans la mesure où il e plie à cette approche traditionnelle, le Groupe d'étude tiendra donc compte de la fréquence future des niveaux ou des débits de crue. La même démarche pourra également s'appliquer à toute constatation ou recommandation faite au sujet de l'assurance inondation appliquée à la gestion des plaines inondables. Par ailleurs, comme l'assurance inondation est un outil de protection contre d'éventuels impacts majeurs, mais peu probables, le Groupe d'étude pourrait en venir à constater que les restrictions ou lignes directrices en matière de gestion des propriétés situées nettement à l'extérieur de la plaine inondable délimitée constituent une solution pour réduire les dommages futurs. Il pourrait donc être tout aussi important de déterminer si une inondation majeure est, pour le moins, plausible (en l'absence d'estimation fiable de la fréquence des crues).

## 5 APPLIQUER LES QUATRE PERSPECTIVES POUR ESTIMER L'AMPLEUR D'INONDATIONS FUTURES

---

Les experts de l'étude analyseront l'effet des changements climatiques sur les inondations dans la zone couverte par l'étude. Ils estimeront pour cela le changement et la variabilité des apports nets du bassin (ANB) dans le lac Champlain. Le Groupe d'étude a commandé une étude (Lucas-Picher, 2020) qui s'appuie sur des modèles climatiques pour générer un modèle du bassin LCRR prévoyant les apports dans le lac. En outre, les experts de l'étude soumettront le système à des stress-tests fondés sur les ANB développés à partir des trois autres perspectives. Voici quelles sont les quatre perspectives en question et l'état d'avancement des travaux à propos de la stratégie :

- 1 Ensembles de données sur de futurs ANB obtenus de façon stochastique.
- 2 Crue maximale probable.
- 3 Stress-tests des ANB obtenus à l'aide d'un « générateur météorologique ».
- 4 Modélisation climatique (recherche sur le climat examinée par les pairs publiée en 2020).

Chaque perspective est décrite ci-dessous.

### 5.1 PERSPECTIVE 1. FUTURS APPORTS NETS DU BASSIN GÉNÉRÉS DE FAÇON STOCHASTIQUE

---

Ces évaluations sont fondées sur l'idée voulant que la théorie des probabilités puisse être appliquée aux données hydrologiques afin de déterminer dans quelle mesure des inondations de différentes ampleurs sont susceptibles de produire à l'avenir. Ce travail est dirigé par le professeur Taesam Lee. Lui et son équipe mettront au point des ensembles d'apports stochastiques du bassin selon différentes hypothèses fondées sur des modèles d'apports historiques en vue de bâtir des modèles d'apports dans l'avenir. Des modèles informatiques permettent de traduire les apports en niveaux d'eau et en étendue des inondations. Le professeur Lee ayant fourni trois ensembles de données sur les apports stochastiques en janvier 2021, le présent rapport sur la stratégie à adopter présente un examen initial de ces résultats.

M. Taesam Lee est professeur de génie civil à l'Université nationale Gyeongsang, à Jinju (Corée du Sud). Il détient un doctorat de l'université d'État du Colorado et a signé de nombreux articles évalués par des pairs sur le thème de l'analyse stochastique des apports nets du bassin. C'est cet aspect de la recherche qu'il dirige pour l'étude LCRR.

Les hydrologues spécialisés en statistiques ont mis au point des modèles informatiques permettant de générer des ensembles de données hydrologiques synthétiques qui couvrent des périodes plus longues que les données historiques. Ce faisant, il est possible — à des fins de planification — de reproduire des inondations de plus grande ampleur que celles obtenues à partir de données purement historiques.

Auparavant, ces séquences étaient bâties selon l'hypothèse voulant que le climat fût stationnaire et que la moyenne et l'écart-type devraient demeurer les mêmes que la moyenne historique et l'écart-type. M. Lee ayant été invité à supposer que le climat est non-stationnaire, il a appliqué trois méthodes fondées sur trois hypothèses différentes :

- 1 Moyenne des ANB futurs affichant une tendance constante à la hausse ou à la baisse.
- 2 Moyenne changeant de façon aléatoire.
- 3 Moyenne variant de façon cyclique.

Les trois hypothèses sont illustrées à la figure 2, qui contient trois graphiques des mêmes ANB historiques de 1924 à 2017, mais selon les trois hypothèses décrites ci-dessus pour des périodes pluvieuses et des périodes de sécheresse historiques.

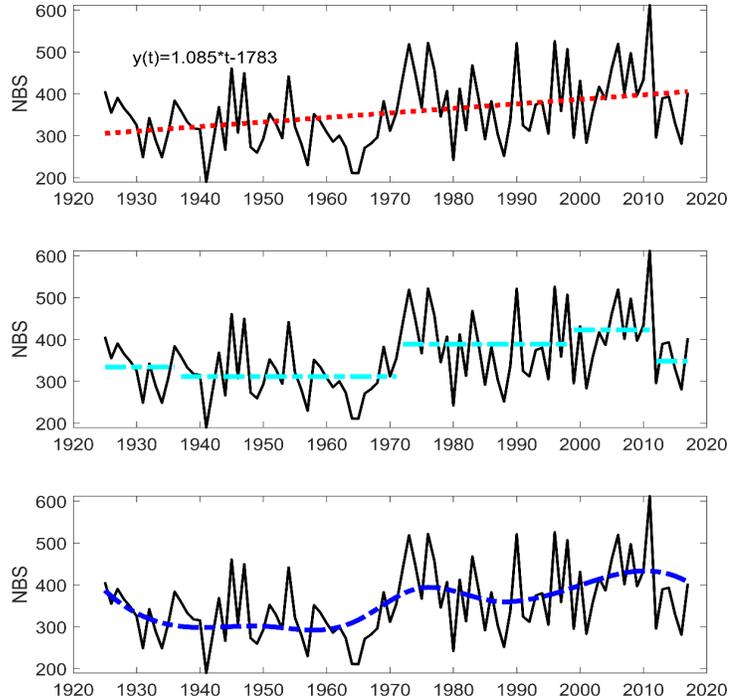


Figure 2. Trois illustrations des ANB (« NBS ») historiques dans le lac Champlain : tendance (en haut), variation (au milieu) et moyennes cycliques.

### 5.1.1 Modèle avec tendance linéaire et modèle de moyenne non-stationnaire

Le modèle avec une tendance linéaire et le modèle de moyenne non-stationnaire sont les plus faciles à comprendre. Si la moyenne est à la hausse, le modèle produit des séries annuelles d'ANB qui présentent une tendance à des apports d'eau supérieurs dans le temps. Selon le modèle de moyenne non-stationnaire, les ANB annuels moyens fluctueront au cours du XXI<sup>e</sup> siècle. À l'origine, ce dernier servait à refléter les changements de causalité connus et spectaculaires, comme une éruption volcanique, plutôt que des processus aléatoires ou inconnus. Toutefois, comme le montre le panneau central de la figure 2, il est possible de conclure à la non-stationnarité de la moyenne à partir d'une analyse des données historiques; les apports nets moyens du bassin ont augmenté vers 1970, puis de nouveau à la fin du siècle. Ce qui peut sembler être de simples changements dans des données relevées sur une courte période pourrait néanmoins s'inscrire dans le cadre d'un ensemble plus complexe d'alternance de cycles de sécheresse et de forte pluviosité. Le panneau du bas interprète les mêmes données que celui du milieu, mais les résultats sont plus nuancés. Certains des outils mathématiques employés, qui permettent de déterminer l'existence de tels cycles et leur utilité dans tout travail de prévision, sont décrits ci-dessous.

## 5.1.2 Analyse des cycles dans un ensemble de données chronologiques

Il existe un certain nombre de méthodes mathématiques rigoureuses permettant de caractériser les tendances cycliques dans les données, même si celles-ci sont difficiles à voir ou à identifier. Jean-Baptiste Joseph Fourier, mathématicien français du tournant du XIXe siècle, a prouvé que tout ensemble de données peut être défini comme une série de fonctions sinusoïdales dont le tracé a la forme d'une onde. Une analyse de Fourier produit donc des cycles, mais, selon les données, ces cycles peuvent être trop complexes pour présenter un aperçu des données ou pour appuyer une projection dans le temps. La transformation de Fourier est considérée comme un cas particulier d'une méthode plus générale d'analyse des cycles de données appelée analyse des ondelettes.

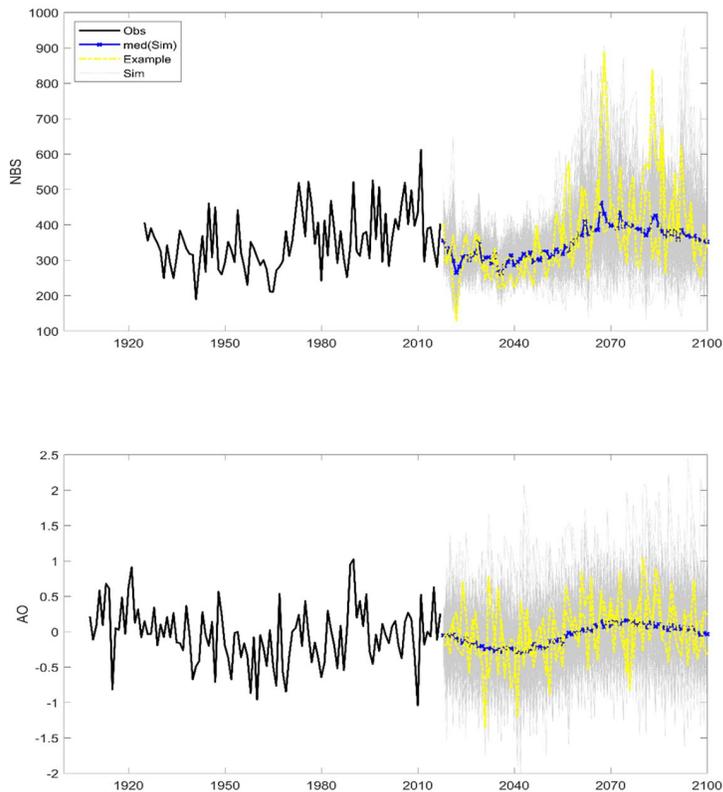


Figure 3. Le cycle projeté dans l'oscillation arctique (panneau du bas) entraîne les cycles d'ANB dans la simulation stochastique des ANB du SSSC (panneau du haut).

basée sur l'indice d'oscillation arctique (OA). L'indice OA exprime les pressions atmosphériques au pôle Nord. Or, les changements de pression influent sur la trajectoire du courant-jet et, par conséquent, sur les conditions météorologiques dans le bassin LCRR. Un indice OA positif est imparfaitement corrélé avec des ANB associés à une forte pluviosité (figure 4). Quand la courbe de l'indice OA (pointillés en rouge à la figure 4) est au-dessus de zéro, les apports nets du bassin (courbe en bleu) ont tendance à être plus élevés que la moyenne.

L'analyse des ondelettes est généralement considérée comme une amélioration par rapport à l'analyse de Fourier, et elle est plus utile pour prévoir la survenue de cycles de forte pluviosité et de sécheresse. Le professeur Lee a choisi d'utiliser une troisième méthode (figure 3), celle de la décomposition en modes empiriques (DME) qui est jugée meilleure que la décomposition par ondelettes. La DME repose sur un algorithme qui génère des fonctions de type mode intrinsèque (modèle cyclique d'apparence sinusoïdale présentant des caractéristiques bien précises quant au nombre de pics et aux changements de positif à négatif). M. Lee a utilisé une technique de rééchantillonnage par oscillation non-stationnaire (ou NSOR pour Nonstationary Oscillation Resampling) pour modéliser les éléments de la DME. Les résultats de cette troisième analyse sont soit un modèle de simulation stochastique hydrologique à signaux climatiques (SSSC), soit une méthode DME-NSOR

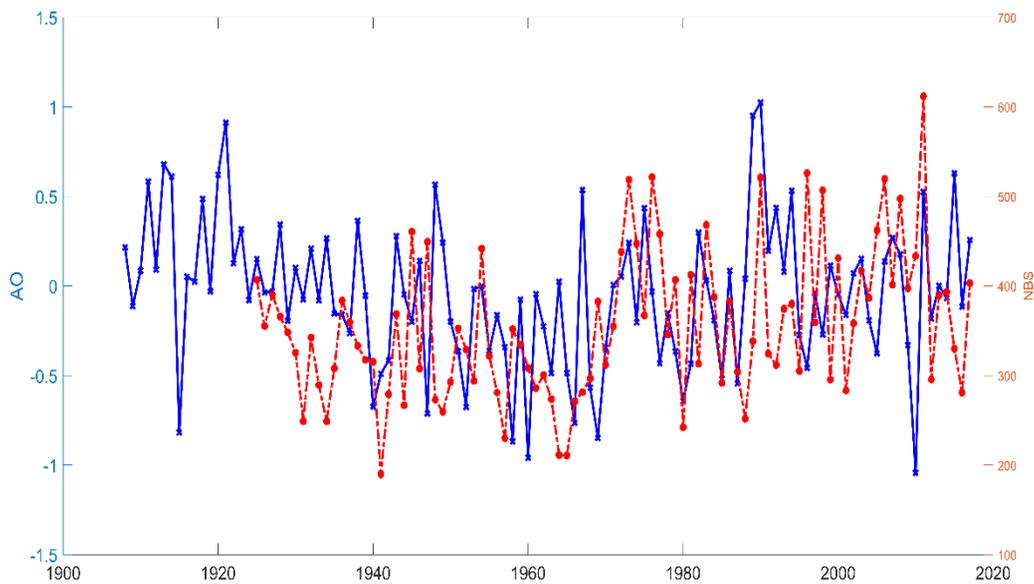


Figure 4. Tracé des valeurs historiques de l'indice OA (« AO ») (courbe en pointillés rouge; ordonnée de gauche) et des ANB annuels (courbe bleue; ordonnée de droite).

Le professeur Lee a constaté que le modèle avec tendance linéaire et les modèles SML, et DME-NSOR reproduisent les statistiques historiques d'étiage et d'apports d'eau excédentaires ainsi que les statistiques-clés. Il a effectué une comparaison détaillée de laquelle il ressort que le modèle DME-NSOR est supérieur au modèle SML, en particulier pour la variabilité à long terme des ANB observée à partir du coefficient Hurst (mesure permettant de déterminer si les années de crue sont aléatoires ou si elles surviennent en série groupées). Les résultats globaux l'ont amené à conclure que le modèle DME-NSOR serait le meilleur pour simuler les futurs ANB dans le bassin LCRR.

Les simulations du modèle de bilan hydrique fondées sur les apports nets du bassin fournis par M. Certaines simulations du modèle de bilan hydrologique reposant sur les apports nets du bassin fournis par le professeur Lee sont fondées sur des élévations (altitudes) du lac Champlain d'au moins 32,3 mètres (environ 106 pieds), (Figure 5.) (à titre de référence, l'altitude maximale du lac lors des inondations de 2011 a été de 31,32 mètres, soit 102,77 pieds). Selon les résultats stochastiques des ANB du modèle SML, utilisés pour alimenter le modèle du bilan hydrique, le niveau du lac pourrait atteindre 104 pieds (31,7 mètres), et un maximum de 104,89 pieds (31,97 mètres), pendant cinq ans. Les résultats du modèle DME-NSOR font aussi état de niveaux d'eau beaucoup plus élevés que ceux de l'inondation de 2011. D'après les premiers chiffres des dommages estimés par l'étude Hazus<sup>4</sup> portant sur les dégâts causés par les inondations dans l'État de New York, par rapport à une crue de 103 pieds (31,4 mètres), un niveau d'eau de 104,9 pieds causerait trente fois plus de dommages et un niveau à 106,7 pieds (32,5 mètres) en causerait 220 fois plus. Bien que ces dommages fassent actuellement l'objet d'un examen, il est à craindre qu'ils augmentent de façon non linéaire au-delà de la cote de 103 pieds parce que les eaux de crue engloutiraient alors des zones

<sup>4</sup> Hazus est un logiciel d'estimation des dangers (de la FEMA) utilisé dans le cadre de cette étude sur le lac Champlain pour élaborer des tableaux de dommages-étape pour des propriétés situées aux États-Unis. Les extraits Hazus seront utilisés avec le modèle ISEE pour estimer la façon dont les dommages causés par les inondations aux États-Unis changeraient en fonction des variations des apports nets du bassin ou du niveau d'eau associées aux alternatives du thème 1.

habitées que l'on croyait à l'abri de tout risque d'inondation. L'étude traitera les ensembles de données sur les moyennes des tendances, des variations et des oscillations et rendra compte de la façon dont ces ensembles ont été utilisés pour évaluer et classer les décisions dans le rapport de l'étude sur la modélisation hydrologique du climat.

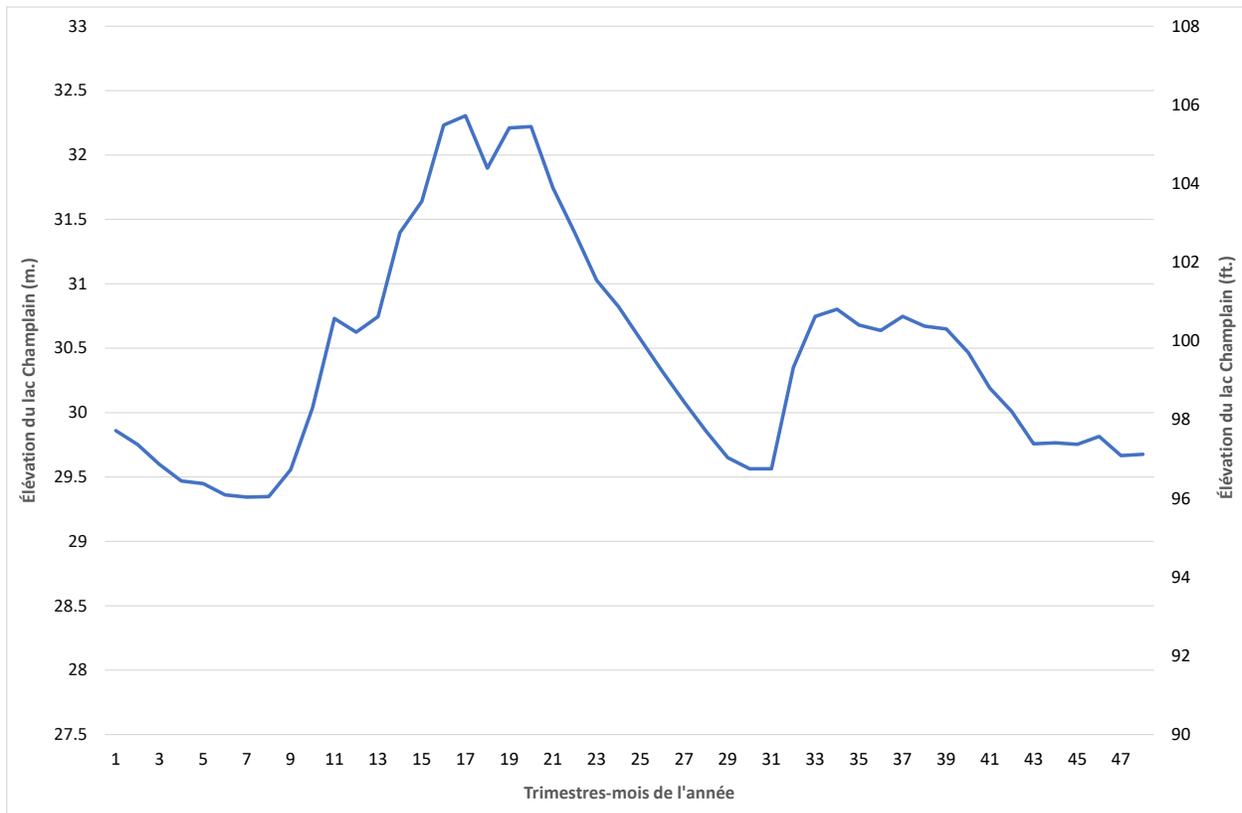


Figure 5. Courbe représentant une année d'ensembles de données d'ANB selon une OA stochastique, pour un niveau maximum de 32,31 m (105,99 pieds).

## 5.2 PERSPECTIVE 2. CRUE MAXIMALE PROBABLE

Cette partie du travail est dirigée par le Taha Ouarda, Ph. D. Son évaluation a pour objet d'estimer la crue maximale probable (CMP) dans le réseau du lac Champlain et de la rivière Richelieu. Il est question de déterminer s'il existe une limite extérieure au risque absolu d'inondation, autrement dit, une limite au-delà de laquelle il demeure possible de construire sans risque d'inondation par le débordement du lac Champlain. Les estimations des précipitations maximales probables et des inondations ont été utilisées il y a un siècle pour évaluer la taille des évacuateurs de crue. Depuis que les analyses coûts-bénéfices sont exigées à la faveur de l'adoption du Flood Control Act de 1936 aux États-Unis, la taille de presque toutes les structures inondables est calculée de sorte à optimiser les avantages nets, ce qui signifie qu'il est peu probable qu'elles soient fonction de la CMP. Néanmoins, les principes et lignes directrices de l'US Army Corps of Engineers (USACE) exigent que ce dernier tienne compte de la CMP afin de s'assurer qu'un projet optimisé ne cause pas de catastrophe en cas d'inondation plus importante que l'inondation prévue. Étant donné que ces règles s'appliquaient à de nombreuses études de planification, des règles d'estimation de la CMP ont été fixées pour l'USACE, la Federal Energy Regulatory Commission

des États-Unis et le Bureau of Reclamation des États-Unis. Ces agences n'ont pas exprimé le CMP en termes probabilistes, si bien que différentes méthodes produiront des estimations différentes. La CMP est utile à des fins de planification, mais il s'agit d'un concept théorique qui ne se concrétisera peut-être jamais dans des horizons de planification réalistes.

Une estimation de la CMP fondée sur des données, dans le cas du réseau hydrographique qui nous intéresse, serait plus compliquée que le calcul de la précipitation maximale probable (PMP) et de l'écoulement maximal probable utilisés dans les calculs traditionnels des inondations catastrophiques. L'estimation doit consister à déterminer : l'influence d'une tempête extrême sur le moment où survient le débit de pointe dans les affluents du lac; la combinaison fortes accumulations de neige et températures printanières qui donnerait lieu aux plus fortes pluies sur le plus fort équivalent en eau de la neige; de même que la façon dont la date de début et la durée d'un épisode de crue pourrait influencer sur la série chronologique du niveau d'eau du lac. Plus le niveau du lac Champlain augmente, plus les débits à l'exutoire sont importants et plus les apports d'eau doivent être élevés pour maintenir le niveau. Les données disponibles sont insuffisantes pour appuyer une telle analyse où les probabilités de chutes de neige, de températures de janvier à avril, de fonte des neiges et de précipitations printanières sont combinées. C'est pour cela qu'il a fallu élaborer une autre approche pour en arriver à l'équivalent d'un scénario de la pire inondation.

Taha Ouarda dirige la Chaire de recherche du Canada en hydroclimatologie statistique au Centre Eau Terre Environnement de l'INRS, à Québec. Il est spécialisé en Hydrométéorologie statistique. Il a obtenu son doctorat à l'Université d'État du Colorado et est mondialement reconnu pour ce type d'analyse. Il a collaboré avec la CMI à l'analyse des points de changement de tendance dans les niveaux d'eau des Grands Lacs et a produit des séries chronologiques stochastiques des apports d'eau dans les Grands Lacs ou la rivière Richelieu.

### 5.3 PERSPECTIVE 3. STRESS-TEST DU SYSTÈME À PARTIR D'ANB OBTENUS À L'AIDE D'UN « GÉNÉRATEUR MÉTÉOROLOGIQUE »

---

Dans leur exploration de cette démarche, MM. Casey Brown et Baptiste François de l'Université du Massachusetts cherchent à déterminer en quoi les variations de la température et des précipitations annuelles peuvent influencer sur les inondations, et à voir si ces changements sont plausibles ou non. L'outil appelé « générateur météorologique » produira des données d'entrée au même modèle Hydrotel que celui utilisé dans le document sur le climat de M. Picher (analysé ci-dessous sous le titre : Perspective 4. Modélisation climatique, page 16), à partir des données d'augmentation progressive des précipitations et des températures actuelles dans le bassin. (augmentation annuelle de la température pouvant atteindre 6° C et augmentation de 50 % des précipitations annuelles). Le générateur produit des séries chronologiques avec des variations d'une année à l'autre et dans une même année qui permettent de simuler la variabilité naturelle autour de la moyenne. Cent soixante-quinze ensembles seront générés pour servir d'ensembles de données d'entrée des précipitations et de la température pour le modèle du bassin Hydrotel, lequel calculera des ensembles de données d'apports nets du bassin convenant au modèle du bilan hydrique (la figure 6 illustre le débit des résultats du modèle de cette alternative). Cette série de générateurs a été exécutée pour produire des ensembles de données d'apports nets du bassin qui servent à alimenter le modèle du bilan hydrique afin de produire des séries chronologiques sur le niveau et le débit à l'exutoire du lac.

Baptiste François est professeur adjoint au département de génie civil et environnemental de l'Université du Massachusetts, à Amherst. Sa soutenance de thèse de doctorat, à l'Université de Grenoble-Alpes (France), qu'il a obtenu en 2013, a porté sur la gestion optimale d'un réservoir hydraulique multiusages au vu des changements climatiques.

M. Casey Brown est professeur au département de génie civil et environnemental de l'Université du Massachusetts, à Amherst. Il a obtenu son doctorat à Harvard en 2004. Il a travaillé avec la NSF, la Fondation Rockefeller et la Banque mondiale et est reconnu à l'échelle internationale pour son approche d'échelle décisionnelle visant à utiliser la science du climat au service des décisions de gestion de l'eau.

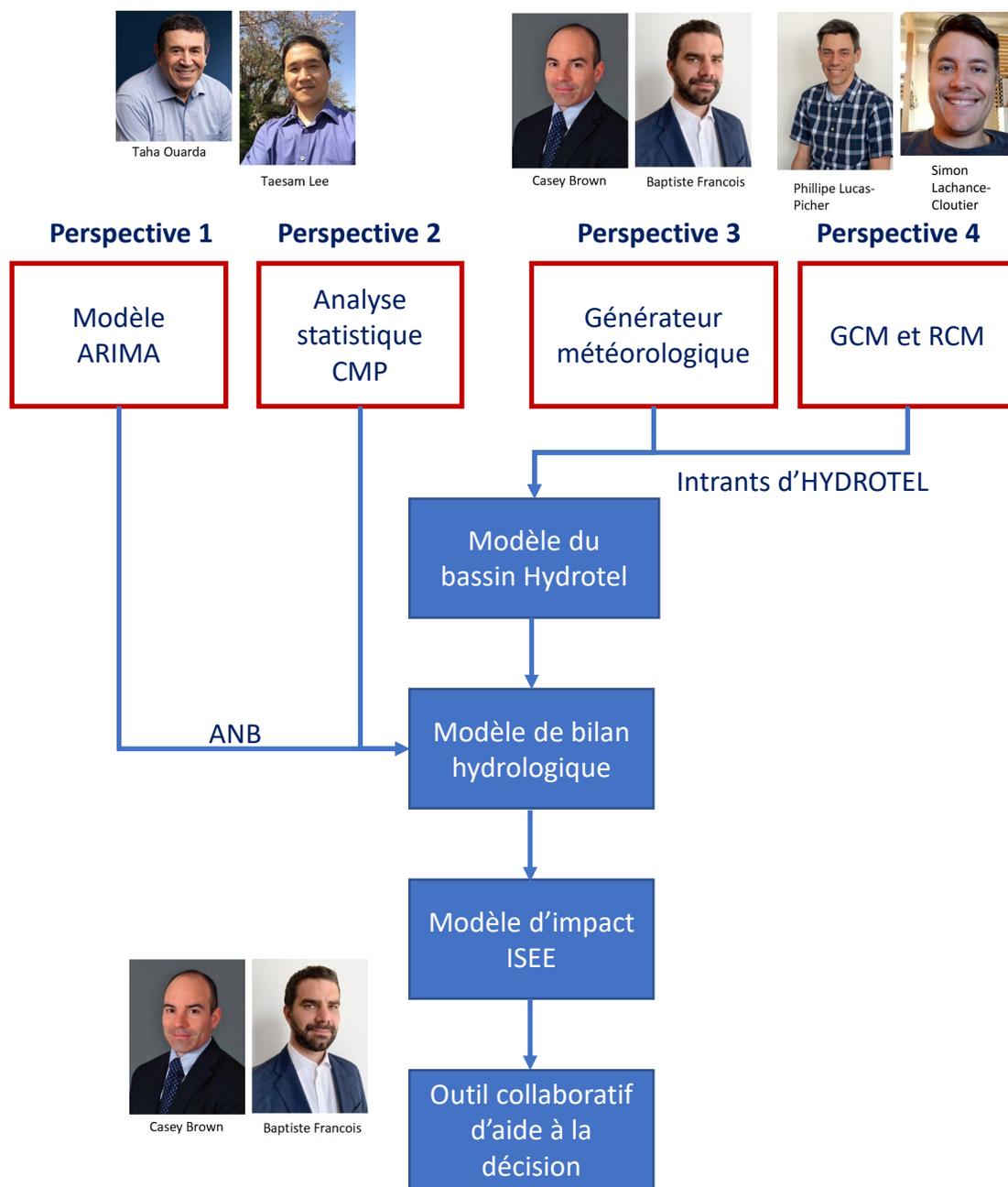


Figure 6. Trois équipes de spécialistes du climat contribueront au modèle du bassin d'Hydrotel pour appuyer les évaluations quantitatives des risques d'inondation liés au climat.

Les figures 7, 8 et 9 montrent de quelle façon le générateur météorologique (Perspective 3) et la recherche sur le climat (Perspective 4) ont permis de conclure à la plausibilité d'inondations d'ampleur supérieure à celles de 2011. La figure 7 représente les apports nets du bassin dans une simulation climatique; elle a été retenue parce qu'elle établit la plausibilité d'apports nets beaucoup plus élevés que ceux de 2011, d'après les résultats du modèle de générateur météorologique. La figure 8 montre les niveaux d'eau produits quand les apports nets du bassin sont soumis au modèle du bilan hydrique. La figure 9 montre les ANB quotidiens maximums produits par les simulations d'Hydrotel effectuées par le générateur météorologique. On y présente une série de simulations des ANB et du bilan hydrique dérivées de l'étude du climat, avec un

pic de niveau du lac Champlain de 107,72 pieds (32,83 m). Bien que les unités ne soient pas parfaitement comparables, les ANB obtenus du générateur météorologique suggèrent que des niveaux d'eau supérieurs à 107 pieds (32,6 m) sont possibles avec une augmentation aussi faible que 20 % des précipitations annuelles moyennes.

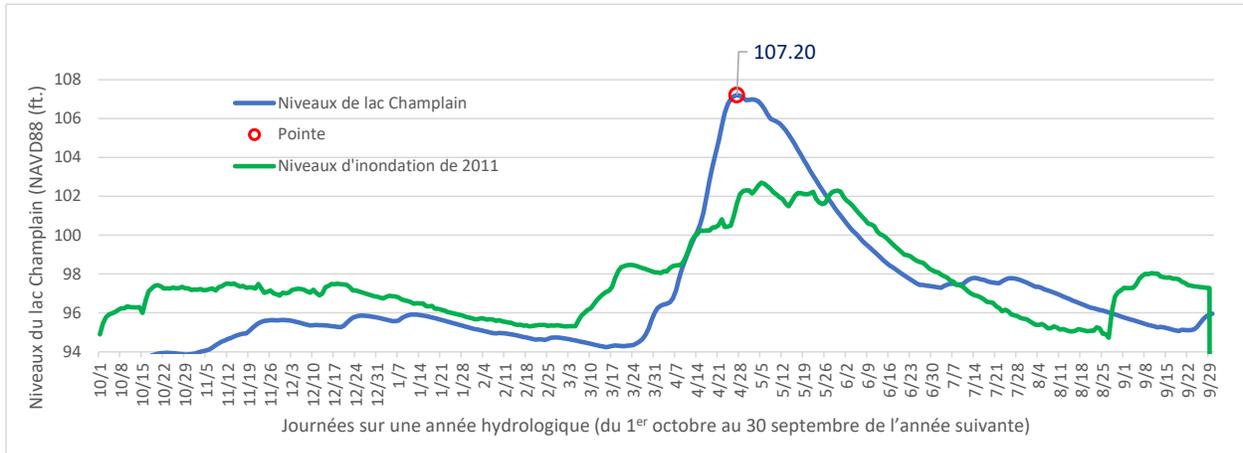


Figure 7. Taux d'apports nets du bassin à partir d'une projection du modèle climatique.

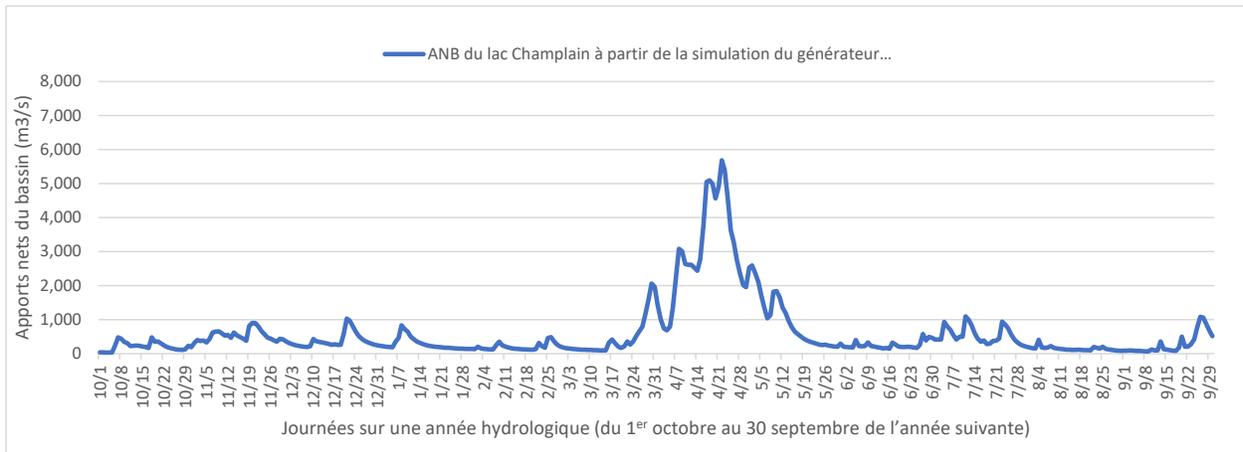


Figure 8. Estimations du bilan hydrique en fonction du niveau du lac Champlain, selon la séquence des ANB de la figure 7.

## fournitures nettes journalières maximales du bassin

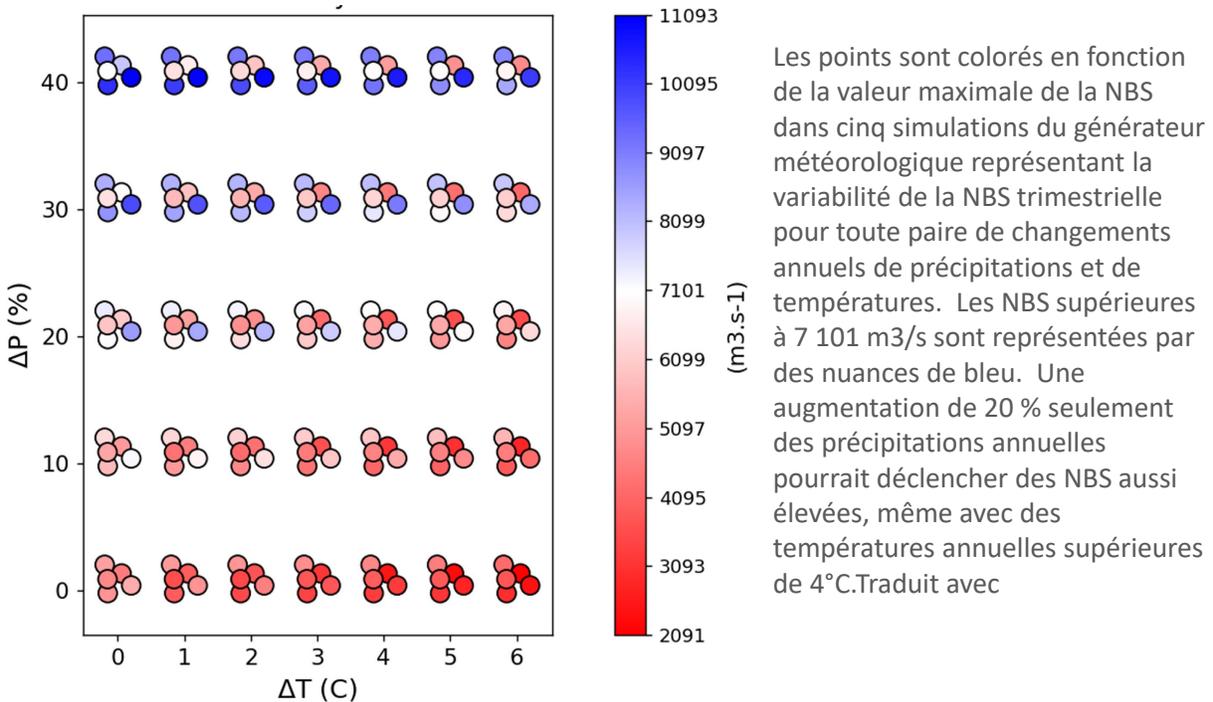


Figure 9. ANB quotidiens maximums selon le résultat des simulations du générateur météorologique pour différentes températures et précipitations.

Le niveau du lac Champlain dépend des niveaux antérieurs et des apports nets du bassin. Si le niveau initial est bas, le lac peut tolérer des apports records sans déborder. Dans le cas contraire, tout apport du bassin supérieur à la capacité d'élimination du lac provoque son débordement. Le modèle du bilan hydrique utilisé dans cette étude est fondé sur un apport net mensuel moyen du bassin de 2 235 m<sup>3</sup>/s en 2011, ce qui est inférieur aux 2 626 m<sup>3</sup>/s de mars 1936, lorsque le lac était plus bas, et cet important apport n'a pas fait monter le lac aux niveaux de 2011. Les apports nets quotidiens maximums dans le bassin seraient supérieurs aux moyennes trimestrielles mensuelles. En 2011, l'ANB quotidien maximal était de 3 234 m<sup>3</sup>/s. À titre de comparaison, le pic de 2011 se situe en bas de la fourchette des ANB illustrée à la figure 9.

## 5.4 PERSPECTIVE 4. MODÉLISATION CLIMATIQUE

L'équipe chargée de la modélisation climatique est dirigée par Philippe Lucas-Picher. Philippe Lucas-Picher, Simon Lachance-Cloutier, Richard Arsenault, Annie Poulin, Simon Ricard, Richard Turcotte et François Brissette ont publié un document évalué par des pairs (Lucas-Picher et al, 2020) dans lequel ils se demandent si l'évolution des conditions climatiques va donner lieu à une augmentation du risque d'inondations dans le grand bassin transfrontalier Canada-États-Unis de la rivière Richelieu. Pour ce document, les chercheurs sont partis de trois ensembles de projections climatiques à résolution multiple, avec correction du biais, appliqués à deux scénarios de concentration des gaz à effet de serre pour alimenter Hydrotel (modèle hydrologique distribué de pointe, à haute résolution). Le document prévoit une tendance à la baisse de l'apport net annuel moyen dans le lac Champlain. Dans la plupart des simulations, l'augmentation de

l'évapotranspiration annuelle, causée par des températures plus élevées, est supérieure à l'augmentation relativement modeste des précipitations annuelles projetées par la plupart des modèles climatiques.

Le document conclut également que la probabilité d'inondations sera moindre dans les conditions climatiques futures, bien que la plupart des modèles climatiques montrent une augmentation de 0 à 30 % des précipitations moyennes en hiver et au printemps. Par exemple, la période de récurrence des débits de crue de 20 ans (crue d'ampleur moyenne causant actuellement peu de dommages) devrait diminuer de 8 % à 35 % d'ici la fin du XXI<sup>e</sup> siècle (2070-2099) et pour un profil d'évolution de concentration représentatif du scénario d'émissions élevées (RCP 8.5). La diminution des accumulations de neige et l'augmentation de l'évapotranspiration, deux phénomènes découlant des températures plus élevées attendues dans la région, sont les causes physiques de cette réduction du risque d'inondation.

Ces trois chiffres, les deux premiers du point de vue du modèle climatique et la figure 9 des procédures de simulation de crise, suggèrent la plausibilité de niveaux élevés du lac Champlain. Les points bleus de la figure 9 représentent des simulations avec un ANB maximal plus élevé que le pic de 7 100 m<sup>3</sup>/s de la figure 7.

Les estimations de l'évaporation future ont pesé lourd dans cette conclusion et sont devenues un sujet de débat au sein de l'équipe d'experts (voir l'analyse à ce propos qui débute à la page 20).

Les auteurs recommandent la vigilance dans cette région parce que la variabilité hydrologique d'une année à l'autre pourrait tout de même donner lieu à des inondations majeures, même si le niveau moyen du lac venait à diminuer. Bien qu'il s'agisse là d'une étude sur les inondations, le Groupe d'étude pourrait également indiquer aux administrations régionales qu'une importante baisse de niveau du lac est envisageable à l'avenir, ce qui aurait une incidence sur la navigation de plaisance et la prolifération d'algues nuisibles.

## 5.5 COLLABORATION ET COORDINATION ENTRE LES TROIS ÉQUIPES

---

Les trois équipes d'experts fourniront soit des données sur les apports nets du bassin — en vue d'alimenter le modèle de bilan hydrique et de dériver les niveaux et les débits sortants du lac Champlain —, soit des données pour alimenter le modèle d'Hydrotel à partir de l'étude du climat, auquel cas le modèle d'Hydrotel produira les ensembles de données d'ANB pour parvenir aux niveaux et aux débits sortants (Figure 6).

La figure 10 présente l'organigramme des tâches de toutes les équipes, y compris en ce qui a trait aux extrants produit par une équipe, à destination d'une autre. Les principaux rapports de ces travaux sont présentés à la figure 11.

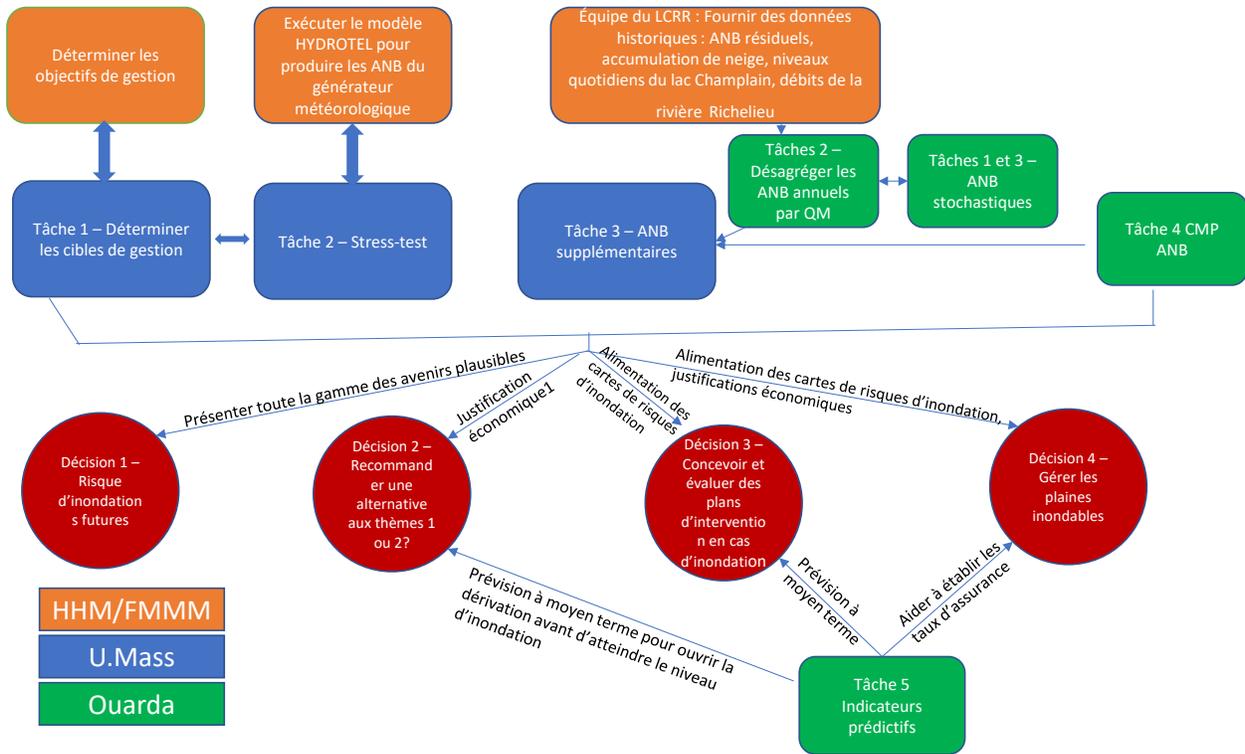
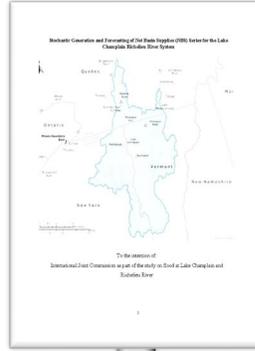


Figure 10. Diagramme de contribution des tâches de chaque équipe à la méthode Decision Scaling.

Septembre 2020,  
 article dans le  
 Journal de la  
 JAWRA, Lucas-  
 Picher



Novembre 2020,  
 Preliminary  
 Stochastic Report,  
 Taesam Lee



Mars 2021,  
 Strategy Report  
 FMMM

Avril 2021,  
 Stochastic and  
 PMF Net Basin  
 Supplies, Ouarda

Octobre 2021,  
 Decision Scaling,  
 UMass

Figure 11. Rapports et article sur le travail du Groupe d'étude LCRR à propos de la méthode Decision Scaling.

## 5.6 DISCUSSIONS ENTRE PAIRS

Toute tentative de prévision des conditions climatiques et de calcul des probabilités d'inondations futures soulève forcément beaucoup de questions. Les articles de recherche sont soumis à l'examen d'un comité de pairs en vue de cerner les problèmes risquant d'entacher les conclusions présentées, mais cet examen intervient tardivement dans le processus et il est effectué par des personnes qui ne connaissent pas la recherche elle-même et qui n'ont que peu de temps et un accès limité à l'équipe de chercheurs. Dans le cadre des présents travaux, les experts ont convenu : de recenser les principales incertitudes, les principaux enjeux et les principaux doutes soulevés par cette recherche; d'évaluer les aspects risquant le plus d'influencer les conclusions et les recommandations du Groupe d'étude; de discuter des mesures à prendre face au facteur incertitude, et de consigner leurs conclusions à cet égard dans le rapport final sur l'approche Decision Scaling. Il est à espérer que la prise en compte de ces incertitudes consolidera l'analyse et ajoutera de la valeur pour les autres personnes qui entreprendront des travaux semblables.

Sept enjeux-clés ont déjà été retenus à l'étape de la formulation de la stratégie. Une discussion préliminaire sur le deuxième enjeu (l'évapotranspiration) est incluse dans le présent rapport pour illustrer la façon dont ces analyses seront saisies.

- 1 Pertinence des différents scénarios RCP relativement à la question des inondations futures dans ce bassin.
- 2 Estimation de l'évapotranspiration dans le modèle Hydrotel.
- 3 Réflexion sur ce que montre la correction de biais à propos des incertitudes dans la modélisation des effets climatiques sur les apports nets du bassin.
- 4 Exagérations possibles du risque d'inondation découlant du concept de crue maximale probable du lac.
- 5 Mauvaise évaluation possible du risque d'inondation due à l'utilisation de données concernant des bassins voisins (comme pour les épisodes de 2017 et de 2019 dans le bassin de la rivière des Outaouais).
- 6 Influence des cycles quasi périodiques à long terme sur les tendances à longue échéance et sur la valeur potentielle des téléconnexions pour comprendre ces tendances et prévoir les points d'inflexion du cycle.
- 7 Extraction des modèles de précipitations et de températures selon les quatre perspectives en vue d'appréhender les types de conditions météorologiques susceptibles de causer des méga-crues.

### Exemple de consignation des discussions internes entre pairs : estimations de l'évapotranspiration dans le modèle Hydrotel.

Il s'agissait-là d'une des premières questions soulevées par les experts des changements climatiques dans le cadre de l'étude. Une discussion préliminaire sur cette question est incluse ici afin d'illustrer la forme que prendront ce genre d'échanges.

## 5.7 LA QUESTION

---

La question consiste à savoir si la tendance à la baisse prévue dans le cas des ANB ne serait pas attribuable à une surestimation de l'évaporation. Pour les Grands Lacs, par exemple, les climatologues croient maintenant que l'augmentation des précipitations fera plus que compenser l'augmentation de l'évaporation et que les niveaux des lacs augmenteront. Mais l'évaporation des Grands Lacs est plus complexe que celle du lac Champlain parce que la surface du lac ne représente qu'environ 5 % de tout le bassin hydrologique, comparativement à environ 47 % pour les Grands Lacs. Dans le bassin du lac Champlain, le problème est l'évapotranspiration, définie comme étant le processus par lequel l'eau est transférée de la terre à l'atmosphère par évaporation de l'eau du sol et d'autres surfaces et par transpiration des plantes.

## 5.8 LES FAITS PERTINENTS

---

Hydrotel calcule l'évapotranspiration potentielle (ETP) en fonction de la température et d'un coefficient étalonné, puis calcule l'évapotranspiration réelle (ET) comme étant limitée par l'humidité du sol et les caractéristiques physiques qui affectent le passage de l'eau du sol à l'air. Cent soixante-quinze ensembles de données d'entrée d'Hydrotel, provenant du générateur météorologique utilisé par Casey Brown et Baptiste François pour projeter un large éventail de conditions climatiques, peuvent également être utilisés pour produire les effets combinés des précipitations et de la température sur l'évapotranspiration réelle (ET) calculée par Hydrotel. Le bassin dispose déjà de toute l'eau dont il a besoin pour satisfaire la

demande évaporatoire du bassin, de sorte qu'il faut que l'ETP augmente (dans ce cas sous l'effet d'un réchauffement) pour que l'ET augmente. Les résultats montrent que l'ET annuelle augmentera de 42 mm pour chaque augmentation de 1 °C de température. Autrement dit, si les températures annuelles augmentent de 1 °C, les précipitations devront augmenter de 4 % pour que les apports annuels demeurent les mêmes.

Idéalement, il nous faudrait vérifier la validité du modèle en le comparant à l'évapotranspiration réelle observée, mais il n'existe pas de mesures directes à grande échelle pour la rivière Richelieu. Deux ensembles de données — l'un pour le sud du Québec et l'autre pour la partie nord-est des États-Unis — peuvent être utilisés pour déduire ce qu'a dû être l'évapotranspiration, à supposer que l'ET soit la valeur restante une fois les composantes précipitations et ruissellement définies.

Un modèle de bilan hydrique indique où aboutit l'eau. En période de pluie, l'ET est moindre, et le volume d'eau stockée dans le sol augmente; par temps chaud et ensoleillé, l'ET est beaucoup plus importante que les précipitations (P) parce qu'elle peut être alimentée par l'eau stockée dans le sol. Sur une longue période, l'eau qui tombe au sol s'écoule (R) dans les cours d'eau ou retourne dans l'atmosphère par évaporation, de sorte que  $ET = P - R + \Delta S$  devient  $ET = P - R$  parce qu'à long terme, le volume d'eau emmagasiné dans le sol reste à peu près le même; le  $\Delta S$  est nul.

Partant de ce concept, les données de P et de R venant de 29 bassins versants du Québec physiquement semblables à ceux de la rivière Richelieu ont servi à calculer l'ET. Une plage de températures a été relevée dans ces 29 bassins hydrographiques, de sorte qu'il a été possible d'établir une corrélation entre les 29 ET les 29 températures annuelles moyennes. La pente de cette corrélation, qui est de 40 mm/°C, est donc proche de la valeur (42) déterminée à partir des simulations du générateur météorologique. On peut donc penser (sans pour autant en détenir la preuve) que les estimations d'ET du modèle Hydrotel sont valides. D'autres facteurs qui peuvent influencer sur l'ET varient entre les bassins les plus chauds et les bassins les plus froids. Bien qu'ils se trouvent près de la rivière Richelieu, ces bassins ont une température moyenne inférieure à celle du bassin LCRR et un ratio ET/P plus faible.

L'autre ensemble de données concernant le nord-est des États-Unis est extrait de l'ensemble de données concernant tout le territoire américain utilisé dans une étude de l'USGS qui a notamment porté sur les taux annuels d'évapotranspiration. Selon l'approche du bilan hydrique, on constate là encore que la relation entre l'augmentation des températures et l'évapotranspiration est principalement linéaire, ce qui donne à penser que la température est le facteur déterminant, mais que le taux est plus faible, à 30,2 mm/°C. Dans le pire des cas — à supposer que ces données conviennent mieux pour représenter le bassin LCRR —, c'est que la fonction d'évapotranspiration d'Hydrotel serait de la bonne forme, mais que le coefficient est trop élevé du tiers.

Dans quelle mesure l'estimation de l'évapotranspiration est-elle importante pour parvenir à une juste projection des inondations dans le bassin LCRR? Il est bien établi que l'apport net annuel du bassin a augmenté, ce qui a entraîné une augmentation notable du niveau annuel moyen du lac Champlain, mais sans augmentation correspondante des inondations. Cela tient au fait que les précipitations ont augmenté dans les mois autres qu'avril et mai, soit dans les deux mois où plus de 80 % des pics de crue se sont produits par le passé. L'ANB annuel n'est pas bien corrélé avec les inondations, contrairement à l'ANB14d (l'ANB maximal durant quatorze jours chaque année). Des températures plus chaudes signifient moins de neige accumulée et une ET supérieure en avril et en mai. Ces tendances qui contredisent l'hypothèse d'une aggravation des inondations pourraient-elles s'expliquer par l'utilisation, dans le modèle Hydrotel, d'un nouvel ensemble d'entrées produit par le générateurs météorologiques?

Baptiste François a préparé 35 séries supplémentaires de données à partir du générateur météorologique dans lesquelles les augmentations de température ne s'appliquent qu'aux mois de novembre, décembre, janvier, février, mars et avril (réchauffement sur six mois), ce qui simule les répercussions d'un temps plus chaud sur le manteau neigeux et sur l'ET jusqu'à la saison des inondations.

Cette expérience a produit deux résultats distincts :

- Le premier concerne la température et l'ET. L'ANBI4d diminue à mesure que la température augmente pendant toute l'année et que les intrants du générateur météorologique augmentent sur une période de six mois. Si l'on maintient les précipitations constantes, l'impact est d'environ 20 % à 2 °C pour un réchauffement sur six et sur douze mois, mais à 3 °C de réchauffement sur toute l'année, la modification de l'ANBI4d due au réchauffement est supérieure à celle constatée pour six mois de réchauffement. Cela revient-il à dire que l'augmentation de l'ET est synonyme de réduction des inondations? Les scénarios de réchauffement de six et de douze mois auraient dû avoir des répercussions semblables sur l'accumulation de neige. Mais alors, pourquoi les températures plus chaudes de mai à octobre réduisent-elles l'ampleur des inondations? Est-ce à cause de l'ET en mai? Il y a peu de répercussions sur les inondations de l'année suivante.
- Le deuxième résultat concerne la température et l'accumulation de neige. Le réchauffement des températures hivernales aura probablement pour effet de réduire considérablement l'ANBI4d avec une baisse d'environ 15 % pour un réchauffement de 1 °C et d'environ 20 % pour un réchauffement de 2 °C en raison de la réduction du manteau neigeux.

## 5.9 EXEMPLE DE RÉOLUTION

---

Cette évaluation ne prouve pas que les changements climatiques réduiront la menace d'inondations, mais elle montre que la conclusion ne peut être écartée parce que l'estimation de l'ET du modèle donne lieu à une perspective biaisées.

## 6 SIMULATION DES DOMMAGES CAUSÉS PAR LES APPORTS NETS DU BASSIN SELON L'APPROCHE DECISION SCALING

---

L'approche Decision Scaling établit une correspondance entre la climatologie et les exigences particulières de différentes décisions. Comme nous l'avons vu dans la partie traitant des constatations et des recommandations par catégorie (page 26), la plupart des coûts des alternatives des thèmes 1 et 2 sont dépensés avant que les investissements puissent produire des avantages. Ces coûts qui surviennent quasiment en temps réel sont comparés à des avantages futurs incertains calculés en fonction des dommages prévus (montant des dommages multiplié par la probabilité des dommages). Les inondations de moyenne ampleur ont tendance à peser plus lourd dans l'équation parce que le facteur de probabilité est relativement important. Le Groupe d'étude pourrait également envisager d'investir modestement dans des plans d'intervention en cas d'inondation (thème 3) afin de se protéger contre les dommages catastrophiques causés par des inondations plausibles dont les probabilités de survenue sont trop faibles pour être estimées avec certitude. Dans ce cas, la valeur prévue des avantages est très incertaine, et bon nombre des coûts ne seront engagés qu'en cas d'inondation importante, de sorte que les renseignements climatiques servant à la prise de décisions relatives au thème 3 pourraient essentiellement servir à établir la plausibilité, et non la probabilité d'inondations d'envergure.

Entre les deux, Le Groupe d'étude doit tenir compte de la gestion des plaines inondables (thème 4), qui peut modifier la vulnérabilité aux inondations au fil du temps, mais dont les résultats dépendent de la séquence des futures inondations. Les plaines inondables ont généralement été délimitées par des intervalles de « 100 ans » ou des intervalles de récurrence semblables, avec un traitement spécial de la propriété à l'intérieur de cette délimitation particulière. La FEMA prévoit de mettre en œuvre le concept de Risk-Rating 2.0 cette année, selon une vision plus nuancée du risque à l'intérieur et à l'extérieur des limites d'une crue centennale, de sorte qu'on ne voit pas vraiment de quelle façon le Groupe d'étude envisage d'utiliser des calculs de fréquence des inondations fondés sur les changements climatiques pour régler l'aménagement des plaines inondables.

# 7 ÉVALUER LES PLANS SUIVANT QUATRE PERSPECTIVES

## Forces et faiblesses des quatre perspectives

Chaque perspective a des forces et des faiblesses; chacune venant compléter les trois autres. Celles-ci peuvent être mixtes, particulièrement en ce qui a trait aux décisions liées à chaque thème. Le tableau 1 résume les principales forces et faiblesses de l'utilisation de chaque approche pour estimer et gérer le risque d'inondation. Il existe des différences apparentes dans les projections selon la perspective à expliquer ou à préciser. Les résultats de la modélisation climatique montrent que l'apport net annuel moyen du bassin accuse une tendance à la baisse. La série chronologique stochastique fondée sur l'oscillation arctique pointe dans le sens des pires inondations survenant plus tard au XXI<sup>e</sup> siècle, tandis que les ANB moyens sont stables au cours du siècle. Cela s'explique peut-être par le fait que l'étude sur le climat tient explicitement compte de l'effet de la température sur l'évapotranspiration, tandis que les ANB stochastiques de l'OA ne sont influencés par la température que dans la mesure où il s'agit d'un facteur implicite dans les corrélations historiques entre l'OA et les ANB.

Tableau 1. Forces et faiblesses de chaque perspective.

Forces	Faiblesses
1. Stochastique	
<p>Les projections des ANB à partir des ANB passés suppriment la nécessité de formuler des théories sur la façon dont le changement climatique influe sur les apports nets du bassin et sur l'incertitude qui en résulte.</p>	<p>Les projections des ANB sont fondées sur des tendances qui pourraient changer dans l'avenir.</p> <p>Toute estimation pertinente d'une probabilité d'inondations extrêmes est moins défendable qu'une estimation d'inondations plus normales en raison des données limitées et de la difficulté de valider l'adéquation des distributions aux événements extrêmes.</p> <p>On dispose de projections pour les ANB, mais pas pour les précipitations ou les températures qui pourraient pourtant servir à caractériser les régimes météorologiques menant à des mégacrués.</p>
2. CMP	
<p>Prise en compte de l'interaction la plus dommageable d'accumulation de neige, de températures printanières et de précipitations printanières. L'interaction de ces trois phénomènes semi-indépendants est à l'origine de la crue de 2011.</p> <p>Aide à établir une limite géographique raisonnable pour les interventions en cas d'inondation et pour la gestion des plaines inondables.</p>	<p>L'estimation du niveau maximal probable du lac est plus complexe que l'estimation du niveau maximal probable de la rivière, car cela dépend non seulement de l'ampleur des événements météorologiques, mais aussi du moment où survient, tour à tour, chacune des trois composantes, ainsi que des niveaux antérieurs des lacs pour chaque étape de la séquence.</p> <p>Le concept des CMP est contesté en raison de la nature qualitative des méthodes utilisées et de la non-reproductibilité de ces méthodes.</p>

Forces	Faiblesses
3. Tests de contrainte	
<p>Fournit une gamme d'ANB qui va au-delà des prévisions du modèle climatique par la prise en compte de l'impact de fortes précipitations et de changements de température susceptibles de se produire.</p> <p>L'éventail plus large peut aider à définir les points d'inflexion des impacts utiles pour la planification.</p> <p>Associe des combinaisons spécifiques de température et de précipitations à des inondations, ce qui peut aider à se faire une idée de la probabilité d'occurrence.</p>	<p>Des biais dans le modèle statistique sont possibles et influenceront sur la variabilité de chaque trace .</p>
4. Application des modèles RCM et GCM	
<p>Seule approche permettant d'évaluer l'impact des changements de bilan énergétique terrestre sur l'hydrologie du bassin LCRR.</p> <p>Un vaste ensemble de simulations RCM et GCM est disponible.</p> <p>L'application des modèles GCM et RCM est une approche rationnelle et bien acceptée qui a été suivie par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.</p>	<p>Malgré leur utilité, les modèles GCM et RCM sont assujettis à des limites (faible résolution, absence de processus physiques, etc.) qui pourraient entraîner un biais dans la simulation des extrants.</p> <p>L'ampleur du biais et la nécessité des procédures de correction révèlent à quel point il est difficile de prévoir le ruissellement futur.</p> <p>Un seul modèle hydrologique a été utilisé.</p> <p>L'ensemble des modèles climatiques choisis peut ou non représenter justement la gamme des cas de figure plausibles dans l'avenir.</p>

## 8 CONSTATATIONS ET RECOMMANDATIONS PAR CATÉGORIE

---

Le Groupe d'étude tirera des conclusions sur la vulnérabilité du bassin aux dommages que des inondations pourraient occasionner dans l'avenir et recommandera l'application de différentes approches en matière de gestion des inondations. L'objectif de cette stratégie climatique n'est pas de parvenir à une estimation « exacte » des apports nets du bassin dans l'avenir, qui serait un objectif inatteignable, mais de fournir un éventail adapté de scénarios d'apports nets au bassin pour tester la robustesse des recommandations du Groupe d'étude. Le texte qui suit explique le cadre d'ANB qui sera retenu pour tester les solutions des thèmes 1 et 2, ainsi que les cadres très différents pour les alternatives des thèmes 3 et 4.

### 8.1 CONSTATATIONS GÉNÉRALES À PROPOS DE L'EFFET DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LE NIVEAU DU LAC CHAMPLAIN ET SUR LE DÉBIT DE LA RIVIÈRE RICHELIEU DANS L'AVENIR

---

Les résultats partiels déjà disponibles à partir des quatre perspectives n'établissent pas un portrait clair de la façon dont les changements climatiques risquent d'affecter le niveau du lac Champlain et le débit de la rivière Richelieu d'ici la fin du XXI<sup>e</sup> siècle. Les auteurs de l'article du JAWRA ont découvert que, d'après les simulations fondées sur des modèles climatiques, l'apport net annuel moyen du bassin diminuera au cours de cette période, mais ils préviennent que des inondations majeures pourraient encore se produire en raison de la variabilité des apports. Les simulations stochastiques fondées sur l'indice d'oscillation arctique pointent dans le sens de niveaux d'eau plus élevés vers la fin du siècle. Les résultats des quatre perspectives indiquent clairement la plausibilité de méga-crues beaucoup plus importantes que celle de 2011.

Même si ces constatations sont relativement précises, il est probable que Le Groupe d'étude constatera que l'effet du climat sur le niveau des inondations futures est incertain. Dans la formulation de ses recommandations, le Groupe d'étude favorisera probablement des alternatives solides, c'est-à-dire des alternatives qui seront considérées comme de bonnes décisions au vu de toute une gamme d'impacts climatiques possibles dans l'avenir. Les sections suivantes décrivent les fondements d'un processus décisionnel solide.

### 8.2 CLIMAT ET ALTERNATIVES DES THÈMES 1 ET 2

---

Le thème 1 traite de la réduction du niveau des inondations par la régularisation du débit sortant du lac Champlain grâce à une modification du chenal de la rivière Richelieu. Le thème 2 consiste à réduire les niveaux d'inondation par la régularisation du débit entrant dans le lac Champlain grâce à la création de réservoirs de stockage le long des rives des affluents du lac. Les alternatives des deux thèmes exigent des investissements et des travaux de construction avant la survenue d'une quelconque inondation. Si les inondations futures devaient être plus fréquentes et plus graves, les investissements anticipés seraient alors mieux accueillis. En revanche, si les inondations futures devaient ne jamais atteindre l'ampleur de celle de 2011, ces alternatives risqueraient davantage d'être perçues comme un gaspillage de fonds. Ce pourrait d'ailleurs être plus particulièrement le cas des alternatives du thème 1, qui doivent être menées à terme pour être efficaces. C'est moins vrai pour les projets du thème 2, car l'étude du LCRR (Rousseau et al, 2021) suggère qu'il est peu probable que de tels projets soient rentables à l'échelle du bassin, peu importe les projections climatiques de l'étude. Dans son rapport l'équipe du professeur Rousseau se penche sur l'efficacité du stockage en amont du bassin (thème 2) en vue de réduire le débordement du lac Champlain. Quatre alternatives sont envisagées. La première, qui consiste à inonder des

terres agricoles le long des berges des affluents, nécessiterait une superficie de terres presque deux fois plus grande que le lac Champlain pour parvenir à une réduction de cinq centimètres d'une inondation de l'ampleur de celle de 2011. Trois alternatives qui ont permis de restaurer les terres humides exigeraient la mobilisation d'un territoire compris entre 50 % et 120 % de la taille du lac Champlain pour un abaissement du niveau du lac de 6 à 12 cm en 2011 (Rousseau, Savary et Bazinet, 2021).

En général, les alternatives de gestion des inondations des thèmes 1 et 2 ne seront pas efficaces pour faire face à des épisodes plausibles, mais peu probables, parce que les coûts sont élevés et immédiats, tandis que les avantages prévus sont faibles, diminués par de faibles probabilités. Néanmoins, les experts de l'étude ont maintenant identifié des alternatives en vertu du thème 1 qui permettent d'atténuer l'impact des inondations dans une certaine mesure pour une fraction du coût d'alternatives antérieures, et l'analyse préliminaire des coûts-bénéfices donne à penser que la solution du déversoir à crête (ou cunéiforme) présentera un ratio coûts-bénéfices très intéressant dans les conditions climatiques actuelles<sup>5</sup>. Le déversoir cunéiforme présente comme autres avantages de rehausser les niveaux d'eau les plus bas et d'avoir des impacts environnementaux et sociaux minimes, sans être assorti d'effets durables sur les débits en aval. Il peut aussi être considéré comme une mesure d'atténuation de l'augmentation du niveau d'eau causée par l'élargissement du canal de Chambly. Cette solution potentielle a été bien accueillie par les organismes canadiens et québécois. La méthode Decision Scaling servira à déterminer dans quelle mesure la recommandation de construire le déversoir se tient, et si elle représentera un avantage par rapport aux alternatives précédentes du thème 1, que le risque d'inondation augmente ou diminue.

### 8.3 CLIMAT ET ALTERNATIVES DES THÈMES 3 ET 4

---

Les alternatives du thème 3 sont des plans d'intervention d'urgence ayant pour vocation de réduire temporairement la vulnérabilité aux inondations. Elles sont élaborées maintenant, mais seront mises en œuvre plus tard, juste avant une inondation annoncée. Les alternatives du thème 4 visent à réglementer ou à influencer les aménagements immobiliers dans la plaine inondable afin de limiter les usages non durables.

En général, les alternatives du thème 3 sont les meilleures pour faire face aux épisodes plausibles, mais peu probables, parce que les coûts de préparation sont faibles et que les coûts de mise en œuvre du plan d'intervention ne sont assumés que lorsque l'inondation redoutée est imminente. Les alternatives du thème 4 peuvent être efficaces pour faire face à des épisodes plausibles, mais peu probables, parce que certaines mesures, comme les délocalisations, peuvent également servir à éliminer des dommages les plus courants. Toutefois, restreindre l'utilisation des terres pour éviter des dommages plausibles, mais peu probables, dus aux inondations introduit un déséquilibre comparable à celui des alternatives du thème 1, en ce sens qu'il y aura des coûts initiaux et des coûts de renonciation s'inscrivant dans la durée, même si l'inondation redoutée ne se produit jamais.

---

<sup>5</sup> Le déversoir cunéiforme n'a pas fait l'objet d'une évaluation complète au moment de la mise sous presse du présent rapport. Selon les évaluations préliminaires, le ratio coûts-bénéfices serait de 2 ou 3 par rapport à un régime hydrologique historique et une gamme de taux d'actualisation plausibles. Si le climat du futur donne lieu à une augmentation du nombre d'inondations et à une aggravation des épisodes, le ratio coûts-bénéfices augmentera sous l'effet d'avantages plus importants et de coûts identiques. Un climat beaucoup plus sec pourrait réduire les avantages du déversoir cunéiforme; l'équipe chargée de l'approche Decision Scaling étudiera la plausibilité que le ratio tombe sous 1. Il demeure que le déversoir favorise une augmentation des niveaux les plus bas, ce qui pourrait donner lieu à des avantages notoires sur le plan de la qualité de l'eau et des loisirs. On peut donc penser que la construction du déversoir serait est une décision valable.

La stratégie s'appuie sur l'expérience de nos experts en gestion des risques, de l'incertitude et de la prise de décisions pour en arriver à des postulats de décision qui peuvent être testés quantitativement :

- Couvrir les risques importants, plausibles mais peu probables avec des instruments financiers tels qu'une assurance ou des obligations catastrophe qui font des paiements au gouvernement à différents niveaux d'inondation.
- Les dépenses importantes à court terme pour les projets du thème 1 devraient être testées en fonction des valeurs prévues, mais aussi d'après l'analyse des scénarios afin de déterminer les conditions futures susceptibles de faire regretter la décision prise.
- Il sera important de déterminer l'intervalle de récurrence de l'inondation de 2011 si la question est de savoir s'il faut ou non construire une des structures du thème 1, mais pas s'il s'agit d'élaborer une réponse aux inondations selon le thème 3. L'analyse coûts-bénéfices des projets structurels consiste à comparer les coûts à court terme à la réduction à long terme des dommages prévus, ce qui nécessite de déterminer la fréquence des inondations d'ampleurs différentes. La réglementation des plaines inondables depuis les inondations de 1976 a considérablement réduit les dommages causés par des inondations de l'ampleur de celle de 1976 ou de 1998. Dans la partie américaine de la zone étudiée, les dommages commencent à environ un mètre de plus qu'en 1976, et la plupart des bâtiments endommagés au Québec ont été construits avant 1976. Par conséquent, peu de dommages ont été causés par des inondations de récurrence inférieure à 100 ans, si bien que le potentiel de réduction des dommages grâce à des projets structurels est faible, sauf pour des inondations les plus rares.
- Les intervalles de récurrence sont pertinents pour les alternatives du thème 4, comme la gestion des plaines inondables et l'assurance inondation, mais il ne devrait pas y avoir de changement radical dans la gestion des plaines à la limite d'inondations centennales ou bi-centennales.
- Étant donné que, selon les quatre perspectives sur le climat, la plausibilité d'inondations peu probables est beaucoup plus importante qu'en 2011, il y a lieu de compléter la protection fournie par le déversoir cunéiforme en recourant à des plans d'intervention d'urgence en cas d'inondation (thème 3) de sorte à réduire l'impact d'éventuelles méga-crues.

## 9 GESTION ADAPTATIVE

---

L'équipe chargée de l'approche Decision Scaling formulera une recommandation sur la gestion adaptative après avoir examiné toutes les études et toutes les évaluations des alternatives. En général, la gestion adaptative correspond à un processus structuré qui permet de déterminer les facteurs à la fois incertains et importants qui interviennent dans une décision de planification, de surveiller les données après qu'une décision a été prise afin de réduire ces incertitudes et, au besoin, de revoir la décision une fois acquise une meilleure compréhension de la réalité. À ce stade, plusieurs questions semblent incertaines mais suffisamment importantes pour qu'on envisage de les soumettre au processus de gestion adaptative. Au terme de l'étude, à la fin de 2021, l'équipe chargée de l'approche Decision Scaling formulera des recommandations sur la nature et la façon de surveiller ces facteurs. Le lecteur trouvera ci-dessous trois exemples de ce qui pourrait être surveillé pour tenter de peaufiner les projections de cette étude.

### 9.1 INONDATION AGGRAVÉE PAR LA FONTE DES NEIGES

---

L'inondation de 2011 est un exemple d'augmentation du niveau du lac Champlain sous l'effet de la fonte des neiges et des fortes précipitations printanières. Comme une augmentation des températures moyennes annuelles de la planète ne nécessiterait pas nécessairement des températures uniformément plus élevées entre janvier et avril dans le bassin du lac Champlain, on ne sait pas exactement quelle sera la contribution de la fonte des neiges à l'avenir.

### 9.2 ÉVAPOTRANSPIRATION

---

L'article du JAWRA avance que l'augmentation de la température augmentera suffisamment l'évapotranspiration pour aller au-delà de l'augmentation du niveau de précipitations, ce qui entraînera une diminution des apports nets du bassin et des risques d'inondation dans le temps. La réduction du risque d'inondation serait équilibrée, et peut-être compensée par les effets négatifs des faibles niveaux d'eau, qui seraient plus fréquents et toucheraient un plus grand nombre de personnes. L'équipe chargée de l'approche Decision Scaling examinera si l'évapotranspiration dans le bassin peut être surveillée, et si oui comment, et si elle peut être corrélée avec la température. Elle envisagera en outre ce que les gouvernements pourraient faire pour réduire l'incertitude à ce sujet.

### 9.3 MÉGA-CRUES

---

Des simulations fondées sur les trois méthodes stochastiques, à partir de l'étude des données du générateur météorologique et sur le climat et, vraisemblablement, de l'analyse de la CMP, donnent des niveaux d'eau beaucoup plus élevés que ceux de 2011. Les dommages augmentent de façon non linéaire lors d'inondations supérieures au niveau des crues centennales, car l'eau atteint les bâtiments en dehors des limites de la plaine inondable. La confluence des accumulations de neige, des précipitations printanières et des températures de janvier à mai est à l'origine du débordement du lac Champlain. Les simulations de niveau du lac au-dessus des niveaux de 2011 donnent à penser que les niveaux d'eau élevés en avril et en mai ne sont pas nécessairement précédés de niveaux d'eau inhabituellement élevés en janvier et en février (voir la figure 8, page 15, par exemple). Les experts espèrent étudier des alternatives en vertu du thème 3 qui pourraient réduire les dommages causés par les méga-crues, mais cela n'est actuellement pas prévu. Le Groupe d'étude devra déterminer s'il doit recommander des investissements en fonction d'événements peu probables. Une partie de cette analyse sera effectuée avec les gouvernements au cours des derniers mois de l'étude, mais à la fin de l'étude sur le bassin LCRR, il se peut qu'il y ait

encore beaucoup d'incertitude quant à savoir si la probabilité de telles inondations est suffisante pour justifier un investissement important dans ces efforts.

Au cours de cette étude, l'équipe chargée de l'approche Decision Scaling tentera de déterminer quelles accumulations de neige, précipitations printanières et quels profils de température de janvier à mai sont nécessaires pour engendrer ces inondations de grande envergure. Elle tiendra compte des probabilités que ces trois conditions se réalisent, individuellement et conjointement. Elle évaluera dans quelle mesure on peut estimer la probabilité qu'une inondation majeure se produise à certaines conditions en début d'année, tandis que : 1) le volume de neige équivalent en eau s'accumule et persiste au sol; 2) que le régime des températures en hiver et au printemps maintient le couvert neigeux; et 3) que les pluies printanières commencent. La question fondamentale sera la suivante : dans quelle mesure chacun de ces trois facteurs doit-il être extrême pour produire des niveaux d'eau de 104, 105, 106 ou 107 pieds dans le lac Champlain?

Dans la mesure où l'on peut établir les fondations de cette analyse au cours de cette étude, il pourrait être souhaitable de surveiller les statistiques météorologiques pour au moins définir une fourchette de probabilités de ces inondations. Par exemple, la plus forte précipitation d'une journée à Burlington (Vermont), le 6 octobre 1932, n'a été que de 4,19 pouces. À Buffalo, dans l'État de New York, le record est de 5 pouces, en Alabama, il est de 32,52 pouces. Les pluies fortes et persistantes nécessaires à une méga-crue sont-elles inhabituelles au vu du climat de cette partie du continent? Les changements climatiques auront-ils un effet? Il serait peut-être possible d'élaborer un plan de surveillance tenant compte des tendances liées aux changements climatiques qui rendent les méga-crues plus probables et plus dignes d'investissements pour réduire les dommages qu'elles occasionnent.

# RÉFÉRENCES

---

Brown, C., Ghile, Y., Laverty, M., et Li, K. (2012). Decision scaling: Linking bottom-up vulnerability analysis with climate projections in the water sector, *Water Resour. Res.*, 48, W09537, <https://doi.org/10.1029/2011WR011212>.

Ghile, Y.B., Taner, M.Ü., Brown, C. et al. (2014). Bottom-up climate risk assessment of infrastructure investment in the Niger River Basin. *Climatic Change* 122, 97–110 <https://doi.org/10.1007/s10584-013-1008-9>.

Lee, T., & Ouarda, T. (2020). Stochastic Simulation of Annual Net Basin Supply series for the Lake Champlain Richelieu River System. Montreal, QC: IJC LCRR Study.

Lucas-Picher, Philippe; Ricard, Simon; Arsenault, Richard; Lachance-Cloutier, Simon; Poulin, Annie; Brissette, François. (2020). Will Evolving Climate Conditions Increase the Risk of Floods of the Large U.S.-Canada Transboundary Richelieu River Basin?. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*. 57, <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12891>.

Moody, P., and Brown, C. (2012). Modeling stakeholder-defined climate risk on the Upper Great Lakes, *Water Resour. Res.*, 48, W10524, <https://doi.org/10.1029/2012WR012497>.

Poff, N., Brown, C., Grantham, T. et al. (2016). Sustainable water management under future uncertainty with eco-engineering Decision Scaling. *Nature Clim Change* 6, 25–34, <https://doi.org/10.1038/nclimate2765>.

Rousseau, A. N., Savary, S., & Bazinet, M.-L. (2021). Méthodes actives/passives de stockage des eaux de crue. Étude sur le bassin LCRR, CMI.

Steinschneider, Scott; McCrary, Rachel; Wi, Sungwook; Mulligan, Kevin; Mearns, Linda; Brown, Casey. (2015). Expanded Decision-Scaling Framework to Select Robust Long-Term Water-System Plans under Hydroclimatic Uncertainties. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 141, doi: [10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000536](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000536).



