Lac Champlain et rivière Richelieu

Étude sur les inondations

Rapport Final

Étude internationale du lac Champlain et de la rivière Richelieu

RAPPORT À LA COMMISSION MIXTE INTERNATIONALE

août 2022

(mise à jour : janvier 2023)

Version anglaise rédigée par :

John F. Bratton, PhD, PG
Kathy Hall, QEP

Traduction par

Jean-Pierre Dany

Revue par

Jean-François Cantin
Michel Jean
Daniel Leblanc
Madeleine Papineau
Richard Turcotte
Serge Lepage

REMERCIEMENTS

Le travail du Groupe d'étude du lac Champlain et de la rivière Richelieu, qui est l'aboutissement de cinq années d'étude, représente un effort de collaboration qui a mobilisé plus de 100 personnes au Canada et aux États-Unis, et qui s'est échelonné sur cinq ans. Ce rapport final a bénéficié des contributions des membres actuels et des ex-membres du Groupe d'étude, des membres des groupes de travail technique, des gestionnaires de l'Étude et de nos équipes de rédaction et de traduction. Un examen approfondi du rapport a été effectué par le Groupe d'examen indépendant (GEI). La liste complète des membres de l'Étude figure à l'annexe C. Le Groupe d'étude tient à les remercier tous pour leur temps, leur expertise et leur dévouement.

De plus, le Groupe d'étude est reconnaissant des contributions des nombreuses personnes et organisations qui l'ont appuyé dans ses travaux et lui ont fait part de commentaires précieux pour améliorer les recommandations formulées et communiquer efficacement les résultats, notamment :

- Les membres du Groupe consultatif public qui ont appuyé de leurs conseils le Groupe d'étude tout au long du projet et contribué aux activités de sensibilisation

- Les membres du public qui ont assisté à des réunions publiques, à des ateliers et à des séances d'information, et qui ont fait part de leurs commentaires pendant la période de consultation publique

- Les membres des communautés de Premières Nations (côté canadien) et amérindiennes (côté américain) et de communautés autochtones, y compris, du côté canadien, du Grand Conseil de la Nation Waban-Aki et du Conseil des Mohawks de Kahnawà:ke. Aux États-Unis, de la bande de Nulhegan des Nations abénaquises de Cooksuk

- Les organismes œuvrant dans les domaines de l'environnement, du développement économique et de l'agriculture

- Les représentants des États, de la province, des municipalités et des services d'intervention d'urgence qui ont pris part aux activités de sensibilisation et ont répondu aux demandes de renseignements techniques

- Les organismes du gouvernement fédéral au Canada et les agences des États-Unis qui ont appuyé les travaux de l'étude, dont Parcs Canada, pour leur aide dans la conception des mesures de nature structurelle

- Les commissaires, les agents de liaison et le personnel de soutien de la Commission mixte internationale qui ont guidé et soutenu les travaux de l'Étude tout au long du projet.

Le présent rapport final a été rédigé et soumis par John F. Bratton, Ph.D., P.G., et par Kathy Hall, QEP, de LimnoTech.

GROUPE 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 Lepage

Cogestionnaire de l'étude, États-Unis

Mae Kate Campbell

NOTE DES COPRÉSIDENTS

À la suite des inondations catastrophiques sur les rives du lac Champlain et de la rivière Richelieu au printemps 2011, les gouvernements du Canada et des États-Unis ont demandé à la Commission mixte internationale (CMI) d'examiner les causes de ce phénomène et de proposer des mesures destinées à réduire au minimum les impacts des futures inondations sur les collectivités du bassin. Le Groupe d'étude international du lac Champlain et de la rivière Richelieu a été mis sur pied en 2016. Depuis, des groupes d'experts se sont penchés sur les aspects scientifiques, techniques, environnementaux et socioéconomiques de la question et ont formulé des recommandations qui devraient représenter des avantages réels en matière de réduction des inondations et de leurs impacts sur les collectivités du lac Champlain et de la rivière Richelieu.

Le Groupe d'étude a principalement cherché à tirer des enseignements des expériences passées et des points de vue actuels des résidents du bassin, ainsi que des discussions avec les dirigeants et les membres d'organisations communautaires au sujet des interventions d'urgence, des aspects économiques, des préoccupations sociales et environnementales, sans oublier le résultat des consultations menées auprès des décideurs des paliers fédéral, étatique et provincial. Ces considérations ont été intégrées à des modèles scientifiques modernes afin de permettre l'élaboration de mesures de réduction des inondations, l'amélioration de la prévision des crues, le renforcement de la gestion des plaines inondables et l'évaluation de nouvelles approches en matière d'assurance inondation. Il convenait, par-dessus tout, de viser la résilience face aux changements climatiques grâce aux mesures proposées. Cela étant, les recommandations de l'étude reflètent les préoccupations des collectivités des deux pays et appuient des approches réalisables en ce qui a trait à la réduction de l'ampleur des inondations et de leurs impacts. Il n'est pas pensable de parvenir à contrôler totalement les niveaux d'eau extrêmes, surtout pas dans la perspective du réchauffement climatique. Néanmoins, des approches réfléchies, de nature structurelle ou non structurelle, pourront être mises en œuvre au fil du temps en vue d'améliorer la résilience des collectivités et de réduire les risques pour la vie humaine et pour les biens.

Jean-François Cantin, coprésident pour le Canada

Deborah H. Lee, coprésidente pour les États-Unis

Les membres du Groupe d'étude ont été nommés par la Commission mixte internationale afin d'apporter l'expertise nécessaire à la préparation de ce rapport. Certains sont employés par des organismes gouvernementaux au Canada et aux États-Unis, mais tous servent la Commission à titre personnel et professionnel; les opinions qu'ils ont exprimées à la faveur de leur participation à l'étude ne représentent pas nécessairement celles de leurs organismes employeurs. Le rapport a été rédigé par le Groupe d'étude et son contenu ne doit pas être considéré comme un recueil d'opinions, de positions ou d'engagements officiels d'organismes, d'agences ou de ministères désignés.

crédit photo: Mr TG, CC BY-ND 2.0

RÉSUMÉ

L'étude devait porter sur les causes et les impacts des inondations dans le bassin international du lac Champlain et de la rivière Richelieu.

Les secteurs riverains du lac Champlain et de la rivière Richelieu ont subi des inondations dévastatrices au printemps 2011, qui ont nécessité une intervention binationale coordonnée en vue d'accroître la résilience des collectivités du bassin à de futures inondations et de réduire les risques pour la vie humaine et pour les biens. Après les inondations de 2011, les gouvernements ont confié deux premiers mandats à la Commission mixte internationale (CMI), soit : 1) élaborer un plan d'étude portant sur la mise en œuvre de solutions possibles à la gestion des inondations par le biais d'une série de mesures de nature structurelle ou non structurelle de prévention et d'atténuation des crues, et 2) élaborer des outils et des produits destinés à atténuer l'impact/l'ampleur des inondations. En 2016, les gouvernements du Canada et des États-Unis ont demandé à la CMI de mettre le plan d'étude en œuvre de sorte à examiner les causes et les impacts des inondations de 2011 et d'élaborer des mesures d'atténuation possibles. C'est alors que la CMI a mis sur pied le Groupe international d'étude du bassin du lac Champlain et de la rivière Richelieu qu'il a chargé de superviser l'étude sur les inondations dans le bassin LCRR (l'Étude) décrite dans le présent rapport. Cette dernière représente un effort de collaboration d'envergure internationale qui a mobilisé plus de 100 personnes possédant une expertise en génie, en hydrologie, en gestion, en planification et en atténuation des inondations, en gestion des urgences, en économie, en communications et en sensibilisation du public, en sciences sociales et en savoir autochtone. Le Groupe d'étude a été chargé de formuler des recommandations à la CMI sur ce qu'il conviendrait de faire pour atténuer le problème des inondations. Le présent rapport présente les recommandations découlant de l'étude, ainsi que la démarche empruntée, notamment pour ce qui est des éléments techniques et du dialogue ayant servi à formuler les recommandations. Un rapport plus court, présentant les « faits saillants » de l'étude, a été préparé par ailleurs pour résumer le présent document à l'intention du grand public.

L'étude devait donc porter sur les causes et les impacts des inondations dans le bassin international du lac Champlain et de la rivière Richelieu[1]. À cette fin, l'équipe a adopté un cadre d'atténuation des inondations tenant compte de diverses mesures de nature structurelle et non structurelle[2]. Celui-ci était axé sur les quatre grands thèmes d'intervention suivants qui sont représentés par des icônes dans le rapport.

Interventions de nature structurelle :

1. Abaisser les niveaux d'eau maximaux de la rivière Richelieu et du lac Champlain par l'accélération de l'écoulement.

2. Atténuer les apports d'eau dans le lac Champlain ou dans la rivière Richelieu grâce aux milieux humides et au stockage temporaire des eaux de crue en amont.

Interventions de nature non structurelle :

3. Améliorer les interventions en cas d'inondation (prévision des crues et préparation aux situations d'urgence).

4. Améliorer la gestion des plaines inondables (adaptation aux inondations).

[1] L'étude avait principalement pour objet de trouver des solutions en vue de réduire les répercussions des inondations dans le bassin de la rivière Richelieu et du lac Champlain et elle n'a pas directement porté sur les mesures de réduction des inondations et de leurs impacts dans le cas des tributaires, même s'il est acquis que les débordements plus localisés des tributaires sont relativement fréquents et souvent graves.

[2] Les mesures de nature non structurelle diffèrent des mesures de nature structurelle en ce sens qu'elles sont axées sur la réduction des conséquences des inondations plutôt que sur une atténuation de la probabilité que des inondations se produisent (elles n'impliquent généralement pas de modification des niveaux, des débits ni de la durée des événements, et n'ont pas d'effet sur l'environnement).Les mesures de nature non structurelle peuvent être temporaires (contingentes) ou permanentes.

Des experts ont élaboré et évalué un ensemble de mesures potentielles d'atténuation des inondations en fonction de chacun des quatre thèmes. Le thème 1 touchait à l'aménagement de structures d'envergure modérée visant à abaisser les pics de crue, tandis que le thème 2 avait pour objet d'évaluer la formule de stockage des eaux de crue dans le bassin versant. Le thème 3, consistait à élaborer de nouveaux modèles de prévision des crues, et le thème 4 à explorer des approches novatrices en matière de gestion des plaines inondables, de communication des risques d'inondation et d'assurance inondation. L'évaluation des formules d'atténuation des inondations et de leurs impacts dans le bassin LCRR a englobé l'élaboration et l'utilisation de modèles informatiques sophistiqués qui ont permis de comprendre et de simuler les inondations et leurs impacts, d'élaborer les mesures d'atténuation proposées et d'évaluer la faisabilité des approches d'atténuation potentielles. L'étude s'est appuyée sur un outil puissant, le système intégré social, économique et environnemental (ISEE), destiné à mieux comprendre les risques d'inondation et à évaluer les solutions possibles. L'ISEE a ainsi servi à produire tout un éventail de cartes d'impacts des inondations dont l'objet était de permettre l'évaluation des mesures d'atténuation envisageables. Les experts ont eu recours à d'autres méthodes et modèles propres à leur discipline afin de trouver des réponses à des questions précises, comme celles concernant la capacité de stockage dans des terres en amont ou les effets potentiels de la variabilité climatique sur les stratégies d'adaptation aux inondations.

Afin d'intégrer les considérations d'ordre social, politique et économique, les spécialistes des sciences sociales ont eu recours à différentes méthodes d'évaluation de la perception du risque, des sources de communication des risques et des comportements relatifs à l'atténuation des inondations. Ils ont organisé des groupes de discussion et des sondages auxquels ont participé le public, des gestionnaires et des planificateurs de mesures d'urgence, ainsi que des fonctionnaires et des élus des États, de la province et des gouvernements fédéraux. Des questions telles que la faisabilité technique, les coûts, les impacts environnementaux, l'acceptabilité, la faisabilité d'un point de vue politique et les préférences du public à l'égard de certaines mesures structurelles ont été prises en compte. Grâce à ces activités, les experts ont pu comprendre la façon dont les parties prenantes de chaque région du bassin percevaient le risque de débordement du lac et de la rivière, les impacts anticipés sur leurs moyens de subsistance et leur volonté d'adopter certaines mesures et politiques en matière d'atténuation des risques, ainsi que la façon dont ils avaient reçu les messages de communication des risques.

Pour les peuples autochtones, le bassin du lac Champlain et de la rivière Richelieu est, depuis toujours, une source de nourriture et d'eau, un moteur économique et le siège de pratiques spirituelles. La chasse, la cueillette, la pêche, la navigation de plaisance et les loisirs sont des activités importantes. Le bassin comporte des sites culturels et archéologiques (campements, villages, lieux de rencontre, lieux de sépulture) d'importance traditionnelle et sacrée pour les peuples autochtones. À cet égard, le Groupe d'étude a communiqué avec les communautés autochtones qui s'intéressent à l'atténuation des inondations dans le bassin et a entamé avec elles un dialogue pour s'assurer que leurs préoccupations avaient été bien entendues, au sujet des ressources et des pratiques culturelles perturbées par les inondations survenues dans le bassin, tant dans un passé lointain que plus récent. De nouvelles connaissances ont également été intégrées à l'élaboration et à l'utilisation d'indicateurs de performance, ce qui a permis de faire en sorte que l'évaluation des mesures d'atténuation des inondations tienne compte des répercussions potentielles sur les collectivités autochtones et leurs importants sites culturels.

Les activités de dialogue avec le public et les intervenants ont été des composantes essentielles de l'étude sur le bassin LCRR; elles ont reposé à la fois sur la participation directe du Groupe d'étude (par exemple, par le biais de réunions publiques et de webinaires interactifs) et sur une étroite collaboration avec le Groupe consultatif public (GCP). Le GCP binational a représenté divers secteurs d'intérêt dans le bassin du lac Champlain et de la rivière Richelieu. Ses membres ont mis à profit leurs connaissances, leurs réseaux de contacts et leur expérience pour fournir des conseils et stimuler la participation du public à l'étude.

Se fondant sur les données recueillies, les modèles et les outils développés, ainsi que sur le résultat des consultations poussées auprès des experts de l'étude, des parties prenantes et du public, le Groupe d'étude a formulé des recommandations pour chaque thème de l'étude et d'autres, plus générales, en lien avec les changements climatiques, le renforcement des

capacités, le transfert des données et des outils de modélisation existants. Il a ainsi recommandé : l'étude des mesures de nature structurelle visant à réduire les niveaux d'eau; la protection des milieux humides; l'amélioration de la prévision des crues et la mise en œuvre de stratégies améliorées de gestion des risques d'inondation. À elles seules, les mesures structurelles d'envergure modérée ne permettraient pas d'éviter le débordement du lac Champlain et de la rivière Richelieu, dans toutes les conditions envisageables, mais elles permettraient d'abaisser quelque peu les débits élevés. Toutefois, pour conférer le maximum d'efficacité à ces mesures, il faudrait les déployer en combinaison avec des approches destinées à réduire l'exposition aux inondations, comme la modification, avec le temps, des zones constructibles et des normes de construction des bâtiments et des autres structures directement riveraines ou situées non loin des berges, de même que la préservation des milieux humides actuels et l'amélioration de la façon dont les risques humains et financiers sont communiqués, compris et diffusés auprès des collectivités et des particuliers. Cela revient à dire qu'il n'existe pas de solution unique au problème des inondations dans le bassin LCRR, mais bien une série d'approches qui se complètent et peuvent, ensemble, aider les collectivités du bassin LCRR à mieux se préparer aux inondations futures.

LA COMMISSION MIXTE INTERNATIONALE

En vertu du Traité relatif aux 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.

POUR EN SAVOIR PLUS SUR L'ÉTUDE

Vous souhaitez en savoir plus sur l'Étude du bassin du lac Champlain et de la rivière Richelieu? Vous avez une question au sujet de l'étude?

Courriel : lcrr@ijc.org

Consultez les nombreux rapports techniques, fiches d'information et vidéos du Groupe d'étude sur le site Web de l'étude : https://www.ijc.org/fr/lcrr .

Suivez la CMI sur les médias sociaux

@IJCsharedwaters

www.facebook.com/commissionmixteinternationale/

www.linkedin.com/company/international-joint-commission/

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements i

Résumé vi

Pour en savoir plus sur l'Étude xi

1 INTRODUCTION AU RAPPORT 1

2 CONTEXTE NATUREL ET HISTORIQUE 3

2.1 LE MILIEU NATUREL DU BASSIN LCRR 3

2.1.1 Hydrologie du bassin LCRR 4

2.1.2 Couvert végétal 6

2.1.3 Écosystèmes 6

2.2 ACTIVITÉS HUMAINES DANS LE BASSIN 7

2.2.1 Autochtones 7

2.2.2 Croissance et répartition démographiques 8

2.2.3 Modifications anthropiques dans le bassin LCRR 8

2.3 HISTORIQUE DES INONDATIONS DANS LE BASSIN LCRR 11

2.3.1 La crue printanière de 2011 13

2.4 CONTEXTES SOCIAL, POLITIQUE ET ÉCONOMIQUE DES INONDATIONS 15

2.5 HISTORIQUE DE LA PARTICIPATION DE LA CMI DANS LE BASSIN LCRR 18

3 APPROCHE RETENUE POUR L'ÉTUDE SUR LE BASSIN LCRR 20

3.1 OBJECTIFS ET ORGANISATION DE L'ÉTUDE SUR LE BASSIN LCRR 20

3.2 ÉLABORATION ET UTILISATION DES OUTILS, DES PARAMÈTRES ET DES CRITÈRES DE L'ÉTUDE 23

3.2.1 Modèle altimétrique numérique (MAN) 23

3.2.2 Modélisation hydrologique des apports d'eau 25

3.2.3 Modèle hydrodynamique bidimensionnel (H2D2) 25

3.2.4 Modèle de bilan hydrologique 26
3.2.5 Système intégré, social, économique et environnemental (ISEE) 28
3.2.6 Modèle intégré de résilience aux inondations 31
3.2.7 Indicateurs de performance 32
3.2.8 Outil collaboratif d'aide à la décision 36
3.2.9 Analyses bénéfices-coûts 36
3.2.10 Critères de décision 37

3.3 STRATÉGIE RELATIVE AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES 39

3.4 CONSIDÉRATIONS SOCIALES, POLITIQUES ET ÉCONOMIQUES 41

3.5 COLLABORATION ET DIALOGUE AVEC LES PEUPLES AUTOCHTONES DU BASSIN 41

3.6 POINTS DE VUE DU GROUPE CONSULTATIF PUBLIC ET DES PARTIES PRENANTES 45

4 ANALYSE ET CONSTATATIONS DE L'ÉTUDE 46

4.1 VARIABILITÉ ESCOMPTÉE DES FUTURS APPORTS D'EAU 47

4.1.1 Résultats de l'approche ascendante (Decision Scaling) 48
4.1.2 Recommandations 51

4.2 MESURES DE NATURE STRUCTURELLE VISANT À RÉDUIRE LES INONDATIONS (THÈME 1) 52

4.2.1 Excavation sélective du haut-fond de Saint-Jean-sur-Richelieu et construction d'un seuil submergé (mesure structurelle 1) 55
4.2.2 Dérivation optimisée du canal de Chambly (mesure structurelle 2) 61
4.2.3 Dérivation d'un débit modeste par le canal de Chambly, excavation sélective du haut-fond de Saint-Jean-sur-Richelieu, et construction d'un seuil submergé (mesure structurelle 3) 62
4.2.4 Évaluation des mesures de nature structurelle 65
4.2.5 Niveau d'eau à la frontière internationale 74
4.2.6 Recommandations 76

4.3 STOCKAGE EN AMONT (BASSIN VERSANT) POUR ENTRAVER LES DÉBITS ET RÉDUIRE L'AMPLEUR DES CRUES (THÈME 2) 77

4.3.1 Évaluation des mesures de stockage dans le bassin hydrographique 82
4.3.2 Recommandations 89

4.4 AMÉLIORATION DES INTERVENTIONS EN CAS D'INONDATION (THÈME 3) 89

4.4.1 Prévision des crues 90
4.4.2 Vulnérabilité sociale 93
4.4.3 Évaluation des mesures d'intervention en cas d'inondation 96
4.4.4 Recommandations 97

4.5 PRATIQUES DE GESTION DES PLAINES INONDABLES (THÈME 4) 97

4.5.1 Outils de gouvernance 98
4.5.2 Mise en œuvre 101
4.5.3 Évaluation des pratiques de gestion des plaines inondables 101
4.5.4 Changements climatiques 101
4.5.5 Recommandations 102

4.6 RENFORCEMENT DES CAPACITÉS 103

4.6.1 Recommandations 103

4.7 PRODUITS DÉRIVÉS DE L'ÉTUDE À L'APPUI DE LA GESTION DES INONDATIONS DANS LE BASSIN LCRR ET AILLEURS 104

4.7.1 Recommandations 105

4.8 OCCASIONS DE COMBINER DES MESURES 106

4.9 COLLABORATION BINATIONALE POUR FAIRE FACE AUX INONDATIONS DANS LE BASSIN 106

5 CONCLUSION 107

ANNEXE A – Recommandations du Groupe d'étude à la CMI

ANNEXE B – Bibliographie

ANNEXE C – Participants à l'Étude

ANNEXE D – Sigles

ANNEXE E – Facteurs de conversion

Liste des Figures

Figure 1. Bassin versant du lac Champlain et de la rivière Richelieu. 1

Figure 2. Niveaux d'eau moyen et de pointe du lac Champlain (selon le rapport MGAI/HHC, 2021). 5

Figure 3. Apports maximaux annuels dans le lac Champlain (ligne bleue) et débit sortant du lac (ligne rouge), démontrant l'effet d'autorégulateur du lac. 5

Figure 4. Vestiges de pièges à anguilles sur le haut-fond de Saint-Jean-sur-Richelieu..... 10

Figure 5. Profil longitudinal de la rivière Richelieu avec illustration des points caractéristiques, l'extrémité nord étant à gauche et l'extrémité sud à droite. 10

Figure 6. Crues majeures et crues modérées du lac Champlain, 1990-2019. (MGAI et HHC, 2021) 12

Figure 7. Pertes économiques sectorielles dues aux inondations de 2011; pourcentage des dommages totaux estimés (selon Roy et al., 2022). 16

Figure 8. Organisation de l'étude..... 21

Figure 9. Cadre d'atténuation des inondations de l'étude sur le bassin LCRR. 22

Figure 10. Liens entre les données et les modèles utilisés pour déterminer les débits et les niveaux d'eau dans le cadre de l'évaluation des mesures d'atténuation possibles des inondations..... 24

Figure 11. Modèle altimétrique numérique (MAN) actuel (2021) (à gauche) et MAN de l'état naturel (1887) (à droite) pour le secteur des rapides de Saint-Jean. Les altitudes sont indiquées en mètres. 24

Figure 12. Illustration des facteurs qui ont contribué à l'inondation de 2011, à l'aide du modèle du bilan hydrologique (François et Brown, 2022). 27

Figure 13. Cadre du système intégré social, économique et environnemental (ISEE) (MGAI et HHC, 2022). 30

Figure 14. Exemple de visualisation d'une inondation selon le système ISEE en fonction de différentes mesures d'atténuation possibles (indiquées en rouge et en jaune). 30

Figure 15. Application du système ISEE à l'évaluation des indicateurs de performance et des ratios bénéfices-coûts. 32

Figure 16. Fréquence des crues (à gauche), vulnérabilité totale (au centre) et niveau de risque (à droite) dans la vallée du Richelieu; selon le modèle ISEE (Thomas et Gagnon, 2020). 35

Figure 17. Combinaison de modèles utilisés pour évaluer la vulnérabilité du réseau LCRR au réchauffement des températures et à l'augmentation des précipitations (François et Brown, 2022). 40

Figure 18. Sites archéologiques autochtones près des rives du lac et de la rivière, et impacts des inondations de 2011. Les sites inondés en 2011 sont en jaune (Lecompte, 2021)..... 44

Figure 19. Représentation statistique des futurs niveaux maximaux du lac pour toutes les combinaisons prévues de changements de température et de précipitations..... 48

Figure 20. Graphique de coordonnées parallèles établissant le lien entre un ensemble de conditions antérieures (c.-à-d., de gauche à droite : le niveau du lac, l'EEN, les précipitations de mars et d'avril) et des variables qui décrivent la crue à SJsR (date, débit et niveau d'eau) (François et Brown, 2022). 50

Figure 21. Vue aérienne de la rivière Richelieu à Saint-Jean-sur-Richelieu, vue vers l'aval. 52

Figure 22. Excavation proposée et seuil submergé (mesure structurelle 1). 56

Figure 23. Comparaison des niveaux d'eau de la mesure 1 avec l'état naturel (Moin et al., 2022). 56

Figure 24. Impacts de la mesure 1 sur le niveau d'eau en période de débit extrêmement faible (1964/1965). 58

Figure 25. Profondeur de l'eau sur le seuil submergé pour la mesure 1. 58

Figure 26. Baisses de niveau d'eau au droit du seuil submergé proposé en fonction de divers débits de la rivière (Moin et al., 2022). 60

Figure 27. Changements des niveaux d'eau près de la frontière canado-américaine associés à la mesure 1. 60

Figure 28. Dérivation proposée d'une partie des eaux de la rivière en vertu de la mesure structurelle 2. 61

Figure 29. Mesure structurelle 3 - Seuil submergé avec dérivation à débit limitée. 64

Figure 30. Comparaison des niveaux d'eau de la mesure 3 à ceux de l'état naturel (Moin et al., 2022). 64

Figure 31. Comparaison entre les niveaux d'eau du lac Champlain correspondant aux conditions de référence, aux trois mesures d'atténuation et à l'état naturel de la rivière Richelieu (Moin et al, 2022). 67

Figure 32. Impacts des mesures 1 et 3 sur les niveaux d'eau à la frontière canado-américaine, dans les conditions d'inondation de 2011. 75

Figure 33. Impacts des mesures 1 et 3 sur les niveaux d'eau à la frontière canado-américaine, dans des conditions de débit moyen. 75

Figure 34. Incidence de l'absence de milieux humides sur les apports dans le lac Champlain (apports nets du bassin) et le niveau d'eau, ainsi que sur les débits et le niveau d'eau de la rivière Richelieu dans les conditions de 2011. 79

Figure 35. Zones de stockage potentiel en milieux humides (en bleu foncé). 81

Figure 36. Effets de l'ajout de 652 km^2 de milieux humides dans le bassin LCRR selon les conditions de 2011. 82

Figure 37. Effets de l'ajout de 1 493 km^2 de milieux humides dans le bassin LCRR en fonction des conditions de 2011. 83

Figure 38. Schéma de la structure actuelle et des liens entre les systèmes de prévision des crues des États-Unis et du Québec et du Canada. 91

Figure 39. Exemple d'améliorations apportées à la prévision des crues pour le lac Champlain 92

Figure 40. Cadre d'analyse des vulnérabilités. Adapté de SPE (2022). 94

Figure 41. Outil de cartographie du système intégré social, économique et environnemental (ISEE). 95

Liste des Tableaux

Tableau 1. Critère de classification des crues du US National Weather Service 12

Tableau 2. Critères de décision du Groupe d'étude. 38

Tableau 3. Indicateurs de performance environnementaux (IP) présentant un intérêt pour les Nations W8banaki et Mohawk (à gauche) et IP d'importance particulière pour les Nations W8banaki et Mohawk (à droite). 42

Tableau 4. Évaluation des mesures de nature structurelle. 66

Tableau 5. Évaluation des indicateurs de performance environnementaux au vu des mesures de nature structurelle (Roy et al., 2022). 70

Tableau 6. Évaluation des indicateurs de performance autochtones au vu des mesures de nature structurelle (Roy et al., 2022). 71

Tableau 7. Évaluation des mesures de nature structurelle au vu des critères de décision du Groupe d'étude. 73

Tableau 8. Atténuation des débits élevés grâce aux milieux humides actuels (Rousseau et al., 2021). 80

Tableau 9. Résumé des répercussions de l'absence de milieux humides sur les apports d'eau, les niveaux d'eau et le débit de la rivière selon les conditions du printemps 2011. 81

Tableau 10. Effet de l'ajout de 1 493 km^2 de milieux humides dans le bassin du lac Champlain sur les niveaux d'eau élevés du lac Champlain et de la rivière Richelieu. 84

Tableau 11. Estimation de la superficie supplémentaire de milieux humides ou de terres agricoles riveraines qu'il aurait fallu inonder afin de réduire le débit de pointe de la rivière Richelieu en 2011, aux rapides Fryer. 85

Tableau 12. Capacité de stockage des terres agricoles dans le bassin LCRR 85

Tableau 13. Résumé de l'effet du stockage d'eau sur des terres agricoles riveraines sur les apports dans le lac Champlain et sur son niveau d'eau, sur le débit de la rivière Richelieu aux rapides Fryer et sur le niveau de la rivière Richelieu (à la marina de Saint-Jean) pour les conditions de 2011. 86

Tableau 14. Évaluation des critères de décision du Groupe d'étude en regard des mesures de stockage dans le bassin hydrographique. 88

Tableau 15. Les trois paliers du cadre d'assurance inondation. 100

1 INTRODUCTION AU RAPPORT

Le présent rapport résume les évaluations menées dans le cadre de l'étude et présente les recommandations du Groupe d'étude. De plus amples détails sont fournis dans les différents rapports d'étude mentionnés dans ce document.

Le bassin du lac Champlain et de la rivière Richelieu (figure 1) est un bassin hydrographique international qui couvre le sud du Québec et le nord des États de New York et du Vermont. C'est une région à la géographie variée avec un lac profond encastré entre les Adirondacks à l'ouest et les Green Mountains à l'est, qui se déverse au nord dans des terres agricoles plates et fertiles traversées par la rivière qui se jette dans le fleuve Saint-Laurent.

C'est aussi, comme l'histoire récente l'a montré, une région très vulnérable aux inondations. Des inondations majeures sont survenues en 1927, 1976, 1983, 1993, 1998 et 2011. En outre, la combinaison de la topographie et du climat rend le bassin LCRR naturellement sujet à des inondations prolongées. En particulier, le bassin versant du lac Champlain représente plus de 18 fois la superficie du lac. Les pentes montagneuses abruptes de la partie haute du bassin, les fortes chutes de neige hivernales, le régime d'écoulement du cours supérieur de la rivière Richelieu, les vents forts et les grosses vagues, ainsi que la fréquence des pluies printanières abondantes sont autant de facteurs déterminants du régime des crues dans ce bassin. En cours d'année, l'événement hydrologique dominant est la fonte printanière lors de laquelle on peut enregistrer près de la moitié des apports d'eau annuels en huit semaines seulement. Des inondations de grande ampleur se produisent aussi en été et en automne, mais elles sont généralement de courte durée sous l'effet de tempêtes isolées ou successives, par opposition aux inondations printanières plus longues.

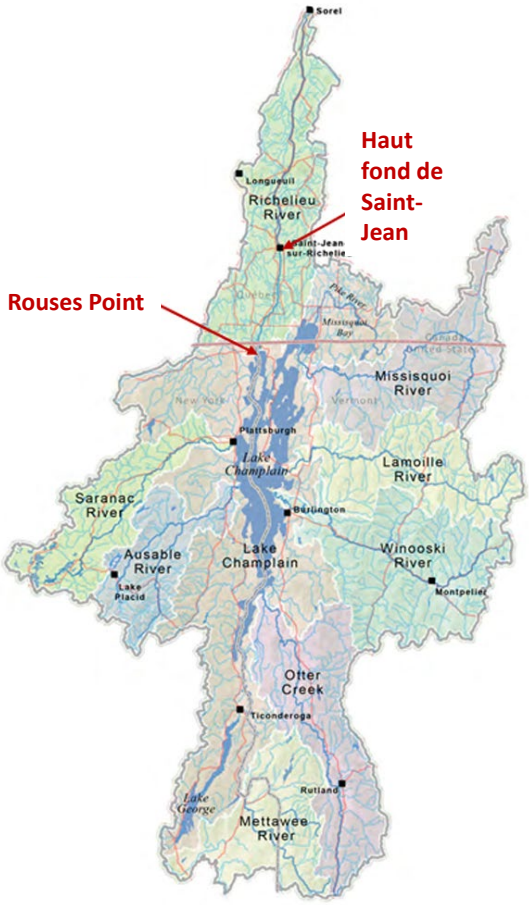


Figure 1. Bassin versant du lac Champlain et de la rivière Richelieu.

Au printemps 2011, la région a subi des inondations plus importantes que tout ce que l'on avait connu dans les 200 années pour lesquelles des données sont disponibles. Le niveau d'eau du lac Champlain a atteint 31,23 m (102,46 pi) NAVD88[3] au-dessus du niveau de la mer (MGAI et HHC, 2021), ce qui dépasse le précédent niveau maximal historique de 30,9 m (103,3 pi) (MGAI et HHC, 2021). La rivière Richelieu est demeurée pendant plus de deux mois au-dessus du niveau de crue. De nombreuses fermes et quelque 4 000 maisons le long de la rivière Richelieu au Québec et le long des rives du lac Champlain ont été endommagées. Plus de 40 collectivités ont été directement touchées et des milliers de résidents ont dû être évacués. Les dommages ont d'abord été estimés à plus de 104 millions de dollars canadiens (78 millions de dollars américains)[4] (GEILCRR, 2019); des estimations subséquentes plus complètes ont indiqué qu'ils avaient en fait été quelque 70 % plus élevés, pour atteindre près de 188 millions de dollars canadiens (141 millions de dollars américains) (Moin et al., 2022). Les dommages économiques causés par les inondations de 2011 ont davantage été constatés au Québec (79 %) que dans les États de New York (11 %) et du Vermont (10 %) (CMI, 2013). Il est à craindre que de telles inondations catastrophiques se reproduisent et que l'ampleur, la fréquence et la gravité économique des inondations n'augmentent avec le temps en raison des changements climatiques et du développement foncier continu dans la plaine inondable.

Les inondations catastrophiques de 2011 ont été ressenties comme un coup de semonce. Au printemps 2012, les gouvernements du Canada et des États-Unis ont demandé à la CMI de préparer un plan d'étude portant sur l'examen des causes et des répercussions des inondations de 2011, et d'envisager des mesures d'atténuation réalisables. À l'automne 2014, un deuxième mandat des gouvernements a demandé la collecte de données, l'élaboration d'outils et la création de cartes statiques des plaines inondables. En 2016, les gouvernements ont demandé à la CMI d'entreprendre les activités décrites dans le plan d'étude, ce qui a conduit la Commission à mettre sur pied le Groupe d'étude international sur le lac Champlain et la rivière Richelieu. Celui-ci a supervisé l'étude sur les inondations dans le bassin LCRR, laquelle est le fruit d'une collaboration internationale entre des spécialiste en génie, en météorologie et en hydrologie, en gestion des inondations, en planification et atténuation des inondations, en économie, en analyse environnementale et en sciences sociales. Le Groupe d'étude a été chargé de produire un ensemble de recommandations pour la CMI sur ce qui devrait être fait afin d'atténuer le problème des inondations (pour plus de détails, voir le site Web de l'étude : https://ijc.org/fr/lcrr). Le présent rapport résume les évaluations menées dans le cadre de l'étude et présente les recommandations du Groupe d'étude; de plus amples détails sont fournis dans les différents rapports d'étude mentionnés dans le présent document.

Étant donné que le bassin chevauche une frontière internationale, la lutte contre les risques d'inondation sous-entend nécessairement une approche binationale. Il est donc dans l'intérêt des deux pays d'imaginer et de mettre en œuvre des solutions efficaces, et de le faire de manière coordonnée pour résoudre les problèmes d'inondation; ces solutions devraient avoir pour effet de réduire les risques pour les deux pays, sans nuire à l'un ni à l'autre[5].

[3] Avant l'étude sur le bassin LCRR, le système de référence altimétrique pour la mesure et la déclaration des niveaux d'eau aux États-Unis et au Canada reposait sur des normes nationales différentes. Avant l'inondation de 2011, au Canada, le système de référence en vigueur était le Système canadien de référence altimétrique de 1928 (CGVD 28), tandis qu'aux États-Unis, il s'agissait du National Geodetic Vertical Datum 1929 (NGVD 29). Le Geological Survey des États-Unis (USGS) et la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) utilisent toujours le même référentiel pour indiquer les niveaux d'eau. Prenant acte des défis liés à la déclaration des niveaux d'eau et des prévisions lors de l'inondation de 2011, la CMI a financé un projet visant à harmoniser le système de référence pour le bassin LCRR en utilisant la norme établie de 1988 du Système de référence altimétrique nord-américain (NAVD 88). Les procédures et les tableaux de l'étude d'harmonisation qui saisissent les étapes et les résultats de l'analyse, y compris les tableaux de conversion pour divers emplacements clés du bassin, sont présentés dans Flynn, et al. (2016). Dans le cadre des travaux concertés de l'étude, tous les niveaux d'eau, la bathymétrie et les renseignements connexes ont été établis selon le système de référence NAVD 88. Quand les niveaux d'eau sont indiqués sur des figures ou d'autres références produites par des organismes ou des institutions de l'un ou l'autre des pays, et utilisés ou reproduits dans le présent rapport, les notes de bas de page appropriées indiquent le point de référence altimétrique correspondant.

[4] Les valeurs des devises citées dans le présent rapport reprennent celles employées dans les documents sources cités, et non les valeurs actuelles.

[5] Le Groupe d'étude s'est surtout intéressé aux moyens de réduire les impacts des inondations dans le bassin LCRR et il ne s'est pas directement penché sur l'atténuation des inondations et de leurs impacts dans les bassins des tributaires, même s'il est établi que ces inondations localisées ont des impacts souvent graves et relativement fréquents. Si le Groupe d'étude n'a pas directement tenu compte des débordements des tributaires, c'est parce que presque tous les bassins versants des cours d'eau en question se trouvent dans un pays ou dans l'autre, mais pas dans les deux. Cela signifie que la gestion des inondations dans les bassins des tributaires pourrait se faire entièrement au Canada ou entièrement aux États-Unis, sans l'intervention de la CMI.

2 CONTEXTE NATUREL ET HISTORIQUE

Pour faire en sorte que le bassin LCRR soit plus résiliant aux inondations, il faut d'abord en comprendre le contexte naturel et le développement humain au fil du temps. Les facteurs modernes à l'origine des conditions propices à l'instauration d'un risque continu pour la propriété et la sécurité humaine — sous l'effet de débits et de niveaux d'eau variables des lacs et des rivières qui ont un impact également marqué sur le milieu bâti — ne sont pas à négliger

2.1 LE MILIEU NATUREL DU BASSIN LCRR

Le bassin du lac Champlain et de la rivière Richelieu (figure 1) couvre une superficie de quelque 23 900 km^2 (9 277 mi^2). Environ 84 % du bassin se trouve dans le nord-est de l'État de New York et dans le nord-ouest du Vermont, et 16 % au Québec. La frontière internationale traverse le lac en son extrémité nord, à hauteur de son exutoire, près du point d'origine de la rivière Richelieu, ainsi que la baie Missisquoi située dans le lac lui-même. Le bassin présente deux régions à la topographie contrastée. Autour du lac lui-même, le bassin est accidenté et montagneux. Dans la partie nord du lac, le relief du bassin se caractérise par des plaines qui s'étendent au nord jusqu'au confluent de la rivière Richelieu et du fleuve Saint-Laurent.

Le lac Champlain (figure 1) est un lac relativement vaste d'une superficie de près de 1 130 km^2 (environ 436 mi^2) en surface (GEILCRR, 2019). Le lac, qui s'est formé dans une dépression créée par le rabotage des glaciers après la disparition de la mer de Champlain, a une longueur d'environ 193 km (121 mi) (GEILCRR, 2019) et s'étend de Whitehall, dans l'État de New York, vers le nord jusqu'à la naissance de la rivière Richelieu, près de Rouses Point, dans l'État de New York, non loin de la frontière canado-américaine. La rivière Richelieu est le seul cours d'eau dans lequel il se déverse. Il est à noter que le canal Champlain et ses écluses relient la partie sud du lac Champlain à la rivière Hudson qui s'écoule dans l'État de New York. Ce lien n'est pas naturel et n'a pas d'incidence importante sur l'écoulement global des eaux du bassin. Le lac a une profondeur moyenne de 19,5 m (64 pi) (GEILCRR, 2019) et, depuis 1971, le niveau d'eau moyen est de 29,26 m (96 pi) (MGAI et HHC). La rivière Richelieu se déroule sur environ 124 km (78 mi) (GEILCRR 2019) vers le nord, de son point d'origine (à l'exutoire du lac Champlain, à Rouses Point (New York)) jusqu'à la rive sud du fleuve Saint-Laurent, à Sorel-Tracy (Québec). Sur ses 37 premiers kilomètres (23 milles), la rivière est large (jusqu'à 1,5 km ou 0,9 mille) et aucun obstacle important n'entrave son cours. Près de Saint-Jean-sur-Richelieu, elle devient beaucoup plus étroite et suit une pente plus prononcée, car elle rencontre une longue barrière de till ferme. Ces hauts-fonds, larges d'environ 210 m (689 pi), s'étendent sur quelque 3,2 km (2 mi) et font office de principal régulateur hydraulique dans le bassin versant, puisqu'ils régulent le niveau et le débit sortant du lac Champlain, ainsi que le débit de la rivière Richelieu (MGAI et HHC, 2021). Les artefacts présents sur les hauts-fonds ont, jusqu'ici, modifié le régime hydraulique. Le débit moyen de la rivière est de 330 m^3/s (11 650 pi^3/s) (Roy et al., 2022). Le niveau d'eau du lac, normalement statique, peut être modifié sous l'effet de vents forts qui poussent l'eau vers l'extrémité nord du plan d'eau, causant ainsi une augmentation temporaire du débit d'eau sur les hauts-fonds et dans la rivière.

Le canal de Chambly, qui se déroule le long de la rive ouest de la rivière et débute à environ 48 km (30 mi) au nord de l'exutoire du lac Champlain, permet la navigation à hauteur des rapides de Saint-Jean-sur-Richelieu. À Chambly, la rivière s'élargit de nouveau et sa vitesse d'écoulement diminue; elle forme alors le bassin de Chambly, une zone de navigation de plaisance très prisée. Le niveau d'eau du chenal fluvial en aval du bassin de Chambly est influencé par un barrage situé à une cinquantaine de kilomètres (une trentaine de milles) en contre-bas, à Saint-Ours (Québec) (MGAI et HHC, 2021). La rivière se jette dans le Saint-Laurent à une

vingtaine de kilomètres (14 mi) en aval du barrage, soit à 40 km (25 mi) au nord-est et en aval de Montréal. Quand le débit du Saint-Laurent est élevé, l'effet de refoulement peut provoquer ou amplifier les inondations dans le cours inférieur de la rivière Richelieu. Comme la rivière Richelieu s'écoule vers le nord, la fonte printanière étant plus précoce dans la partie sud, soit la partie amont du bassin, peut également donner lieu à des conditions propices à des inondations causées par la formation d'embâcles dans la partie nord, soit la partie aval, de la rivière.

2.1.1 Hydrologie du bassin LCRR

La dynamique entre le niveau du lac Champlain et le débit de la rivière Richelieu est influencée par plusieurs facteurs dont les principaux sont : les apports d'eau dans le lac, tant en termes de volume que de distribution dans le temps; l'intensité maximale des apports d'eau; et le niveau du lac avant une crue nivale ou une tempête.

La figure 2 illustre deux caractéristiques essentielles des niveaux d'eau de pointe et moyens du lac Champlain pour la période de 1925 à 2017. Les barres verticales représentent les moyennes annuelles des niveaux d'eau et la courbe rouge les niveaux d'eau maximaux observés au cours de l'année. La figure indique également la cote de référence (seuil de crue) qui est de 30,35 m (99,57 pi) (MGAI et HHC 2021)[6]. Les évaluations approfondies réalisées dans le cadre de cette étude (Ouarda et Charron, 2019; MGAI et HHC, 2021) n'indiquent aucune tendance marquée à la hausse du débit de pointe, de l'écoulement ou des niveaux d'eau. Cependant, d'importantes tendances à la hausse apparaissent dans le cas du niveau d'eau moyen annuel, de l'écoulement et du débit du lac Champlain. Après 1971, le niveau moyen a augmenté d'environ 26 cm (10 po).

L'augmentation du niveau d'eau moyen annuel peut s'expliquer par :

1. les apports d'eau dus à des précipitations plus fréquentes dans les saisons intermédiaires[7];
2. l'élargissement du canal de Chambly (et le rétrécissement en cet endroit du lit de la rivière) au début des années 1970, ce qui a donné lieu à une hausse de niveau de 10 cm (4 po) dans lac Champlain et de 20 cm (8 po) dans la rivière Richelieu (Moin et al., 2022);
3. une végétation aquatique plus abondante, comme dans la rivière Richelieu, causant une friction supérieure associée à une augmentation du niveau d'eau de la fin du printemps à l'automne.

L'augmentation du niveau moyen est en grande partie attribuable à l'élargissement du canal de Chambly.

La figure 3 illustre le débit sortant annuel maximal du lac Champlain à la naissance de la rivière Richelieu. La figure présente également les apports dans le lac. Il convient de remarquer sur ce graphique le fait que le débit sortant de pointe est beaucoup plus faible que le débit entrant de pointe, ce qui démontre l'aspect autorégulateur du débit sortant de ce grand lac. La valeur de la diminution du débit de pointe de la rivière Richelieu, en l'absence de régularisation de nature anthropique, est fonction de l'importance du ruissellement printanier et du niveau d'eau initial du lac à la fin de l'hiver.

[6] Les seuils de crue varient d'un gouvernement et d'un organisme à l'autre; le seuil de 30,35 m (99,57 pi) NAVD 88 est considéré comme une cote de crue mineure par le National Weather Service (NWS) des États-Unis, assortie de dommages matériels minimes et éventuellement d'une certaine menace pour le public (MGAI/HHC 2021). Les seuils de crue du NWS sont présentés au tableau 1

[7] Aux fins du rapport, les saisons intermédiaires correspondent à des mois autres que les mois traditionnels de crue printanière. Depuis 1971, on constate que le lac Champlain demeure à des niveaux supérieurs à la moyenne pendant de plus longues périodes sous l'effet d'apports d'eau de ruissellement plus élevés causés par des tempêtes estivales et par la fonte des neiges à la fin de l'hiver

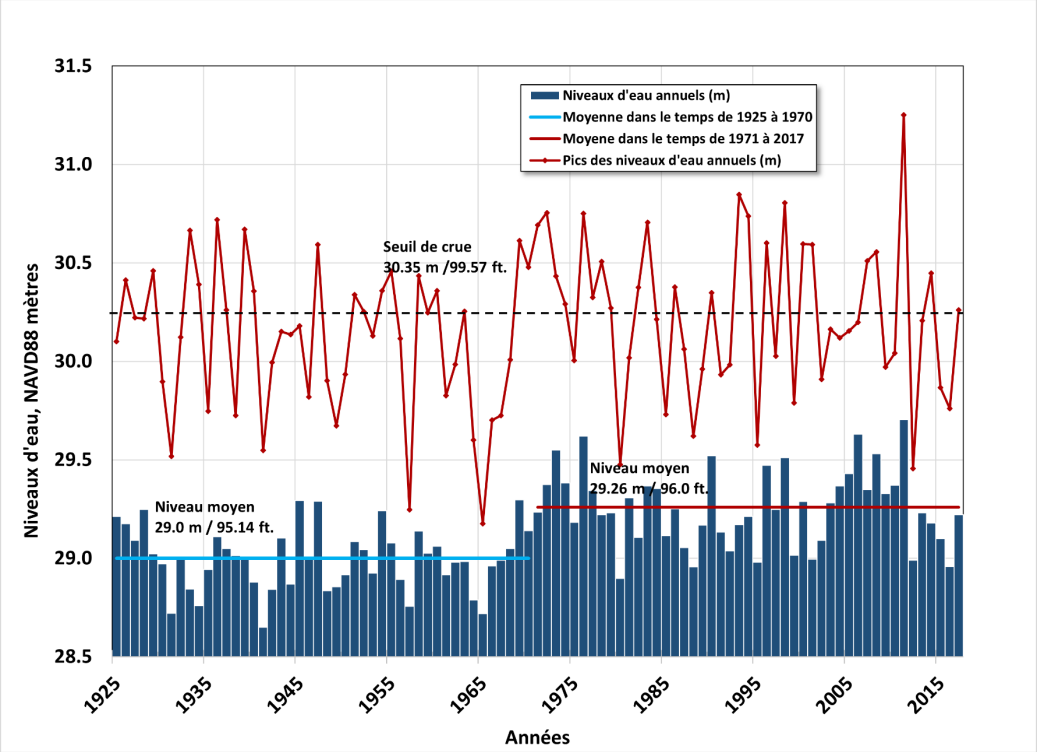


Figure 2. Niveaux d'eau moyen et de pointe du lac Champlain (selon le rapport MGAI/HHC, 2021).

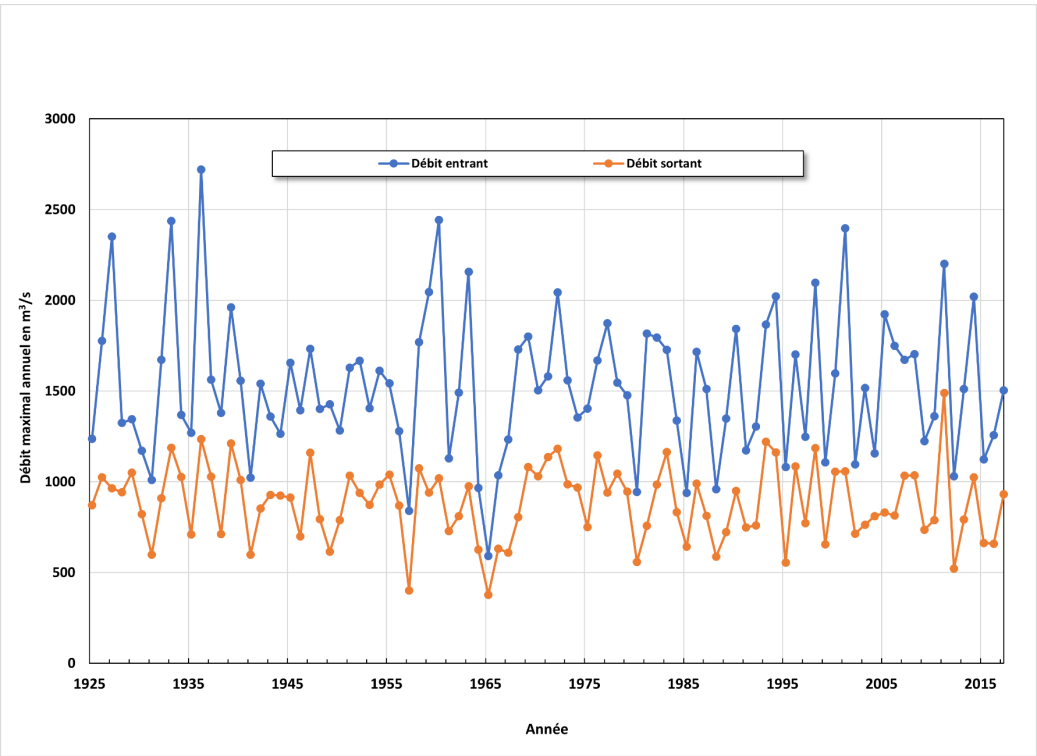


Figure 3. Apports maximaux annuels dans le lac Champlain (ligne bleue) et débit sortant du lac (ligne rouge), démontrant l'effet d'autorégulateur du lac.

Plus le niveau initial du lac à la fin de l'hiver est bas, plus il lui est possible d'absorber les apports d'eau sans produire un débit sortant d'ampleur équivalente. Les tendances de niveau ont donc une incidence indirecte sur le potentiel d'inondation. Cependant, le Groupe d'étude n'a pas mis au point ni analysé des façons d'exploiter l'effet tampon du lac pour réduire au minimum l'impact des inondations.

2.1.2 Couvert végétal

Près des deux tiers de la portion du bassin LCRR se trouvant aux États-Unis sont boisés. L'agriculture (près de 16 %), les milieux humides (près de 6 %) et les zones aménagées (environ 5 %) constituent les autres classes notoires d'utilisation du territoire dans la partie américaine du bassin. Le reste du bassin aux États-Unis est occupé par une proportion relativement faible de milieux arbustifs, de prairies et de végétation herbacée ainsi que de terres arides (Homer et al., 2015). Au Québec, l'agriculture occupe près de 70 % de la superficie du bassin, le reste (environ 8 %) étant du territoire urbain et d'autres terres aménagées, près de 16 % des forêts et environ 2,4 % des milieux humides (GEILCRR, 2019).

2.1.3 Écosystèmes

Le bassin LCRR abrite un éventail diversifié d'écosystèmes et d'espèces sauvages et comprend une forêt rare de plaine argileuse ainsi qu'une zone humide désignée d'importance internationale en vertu de la convention de Ramsar (La Convention de Ramsar est un traité international pour la conservation des zones humides signé en 1971). À chaque saison de migration, cette zone accueille des dizaines de milliers de sauvagines migratrices. Trois grands types d'écosystèmes sont les plus touchés par les variations hydrologiques, soit les milieux aquatiques du lac et de la rivière, les rives et les plaines inondables et les milieux humides. Certaines espèces et certains écosystèmes du bassin sont particulièrement sensibles aux variations des niveaux d'eau, c'est-à-dire qu'ils agissent comme indicateurs des conditions environnementales d'une région donnée. Les espèces et les écosystèmes indicateurs peuvent aider à prédire les effets de tout changement des conditions environnementales. Les indicateurs de l'étude ont été choisis pour évaluer les diverses mesures d'atténuation des inondations envisagées par le Groupe d'étude. Dans son travail de modélisation et d'évaluation des mesures possibles d'atténuation des inondations dans le bassin, le Groupe d'étude s'est concentré sur les impacts prévus et sur la réponse des indicateurs choisis. L'utilisation de ces indicateurs ne se voulait pas une évaluation exhaustive des impacts environnementaux, mais plutôt une évaluation préalable pour éclairer les recommandations du Groupe d'étude. Parmi les espèces indicatrices retenues pour l'étude, et sur lesquelles nous reviendrons plus loin dans le présent rapport — dont plusieurs sont en voie de disparition ou sont menacées — citons : la tortue molle à épine (Apalone spinifera); le chevalier cuivré (Moxostoma hubbsi); le rat musqué (Ondatra zibethicus); le grand brochet (Esox Lucius) et le petit blongios (Ixobrychus exilis). Les indicateurs écosystémiques utilisés dans l'étude comprennent les milieux humides et les haltes migratoires de la sauvagine. Les indicateurs ont été choisis de sorte à outiller le Groupe d'étude dans son évaluation de toute une gamme d'impacts potentiels en lien avec les variations de niveau d'eau. D'autres dimensions importantes pour les écosystèmes, comme la qualité de l'eau, n'ont pas été retenues parmi les indicateurs, précisément parce que leur lien avec les niveaux d'eau ne sont pas clairement établis.

2.2 ACTIVITÉS HUMAINES DANS LE BASSIN

2.2.1 Autochtones

La zone d'étude est située sur les territoires traditionnels des peuples Haudenosaunee (Iroquoien) et Algonquien, qui sont toujours présents et actifs sur les terres et les eaux de la région. Les terres et les eaux du bassin LCRR ont une importance capitale pour la culture et pour les moyens de subsistance de toutes ces communautés. Bien que la frontière entre le Canada et les États-Unis traverse des territoires ancestraux des Amérindiens et des Premières Nations, les peuples autochtones ont maintenu des activités traditionnelles sur place, des deux côtés de la frontière. Tout au long de l'étude, le Conseil a sollicité l'avis des peuples autochtones avec qui il a collaboré à la sélection et à l'élaboration des indicateurs de performance.

De façon générale, les Mohawks (Kanyen'kehà:ka - l'une des six nations membres de la Confédération des Haudenosaunee) sont situés à l'ouest de la rivière Richelieu et du lac Champlain de part et d'autre de la frontière canado-américaine, avec des terres de réserve en Ontario et au Québec et d'autres dans l'État de New York. Les communautés mohawks de Kahnawà:ke, Kanesatake et Akwesasne sont situées le plus près de la zone d'étude et en amont du confluent de la rivière Richelieu et du Saint-Laurent, dans la région frontalière de l'État de New York, du Québec et de l'Ontario, et près de Montréal sur la rivière des Outaouais. Les Mohawks de St. Regis ont une réserve désignée sur les bords du Saint-Laurent, dans le comté de Franklin (État de New York), qui jouxte la réserve d'Akwesasne (Québec).

La zone d'étude revêt une importance particulière pour la nation W8banaki, dont le territoire ancestral, le Ndakina, couvre des régions du Québec, du Nouveau-Brunswick, du Maine, du Vermont et du New Hampshire. Elle s'étend entre la rivière du Loup et la rivière Richelieu, et entre le Saint-Laurent et Boston.

Jadis, la bande Stockbridge-Munsee des Mohicans résidait dans la partie sud du bassin versant, mais elle se trouve maintenant principalement au Wisconsin.

Les preuves archéologiques confirment une présence continue des peuples autochtones au Canada et aux États-Unis (y compris dans la vallée du lac Champlain) depuis au moins 12 000 ans (GCNWA, 2021). Le lac Champlain et la rivière Richelieu ont servi et continuent de servir de ressources pour la nourriture, l'eau, les médicaments, les outils, l'économie et les pratiques spirituelles. Le lac et la rivière font partie d'un réseau de transport utilisé par les peuples autochtones depuis des milliers d'années. La chasse, la pêche et la cueillette d'espèces de plantes, de champignons et d'animaux ont été et demeurent des activités culturelles importantes. Au fil des millénaires, les peuples autochtones se sont adaptés à l'évolution du climat, de la faune et de la flore de la région, ainsi qu'aux modifications anthropiques de la vallée de la rivière Richelieu et du lac Champlain, et de la dynamique hydrographique.

Dans la vallée du lac Champlain, les peuples autochtones ont établi des colonies sur les plaines inondables du lac et des principaux cours d'eau. Depuis des milliers d'années, les peuples autochtones comptent sur l'agriculture et construisent des villages le long des plaines fertiles du lac Champlain et des rivières environnantes, où ils cultivent le maïs, la courge et le haricot.

Le bassin présente des sites archéologiques d'importance traditionnelle et sacrée pour les peuples autochtones. Des vestiges de leurs sites d'occupation (campements, villages, lieux de rencontre pour les échanges entre nations, ateliers et lieux de sépulture) ont été repérés dans toute la zone. Les sites archéologiques d'importance connue ou potentielle pour les communautés autochtones de la région, exposés à des inondations passées comme futures, ont été pris en compte dans l'étude, comme nous le verrons dans les

sections suivantes du présent rapport. Les indicateurs de performance de l'étude (dont il sera question plus loin dans le présent rapport) englobent des indicateurs importants pour les peuples autochtones, comme le frêne noir d'Amérique et le riz sauvage.

2.2.2 Croissance et répartition démographiques

Le bassin LCRR couvre en partie douze comtés au Vermont, quatre comtés dans l'État de New York et cinq MRC au Québec. La population totale du bassin est estimée à quelque 1 015 000 personnes dont 39 % environ vivent au Vermont (la moitié à peu près dans la région métropolitaine de Burlington), 38 % au Québec et près de 23 % à New York (GEILCRR, 2019).

La répartition des populations, des infrastructures et du milieu bâti (autant de facteurs-clés dans la prise en compte des impacts sociaux et économiques des inondations), varie considérablement dans le bassin. La plupart des régions de la partie américaine du bassin ont une densité de population inférieure à 85 habitants au mille carré (33 habitants/km^2). En revanche, la densité de population au nord de la frontière internationale est beaucoup plus élevée et elle augmente vers le nord, le long de la rivière Richelieu, pour atteindre près de 550 personnes par mille carré (212 habitants/km^2). Le seul comté des États-Unis dont la densité est comparable à celle de la partie canadienne du bassin est celui de Chittenden, au Vermont. Il abrite plus du quart de la population totale de l'État ainsi que la plus grande ville de l'État, Burlington (GEILCRR 2019).

La croissance démographique peut influer sur l'utilisation des terres quand les terres naturelles d'une région sont converties à tout un ensemble de nouveaux usages, comme l'agriculture, le logement (dans les zones urbaines et suburbaines) et le développement industriel et commercial. La croissance démographique peut entraîner une perte de couverture végétale, comme les milieux humides et les forêts. Les systèmes de drainage des champs, le redressement des cours d'eau agricoles et une augmentation de la superficie des surfaces imperméables, sous la forme de terrains de stationnement et de voies de circulation sont aussi synonymes de perte de territoire naturel. Bon nombre de ces changements peuvent accélérer le mouvement de l'eau dans un bassin hydrographique, particulièrement en cas d'inondation.

La population du bassin LCRR a connu une croissance constante au cours des 50 dernières années. Selon le Lake Champlain Basin Program (LCBP), depuis 2000, celle du bassin dans les États de New York et du Vermont a augmenté d'environ 6 %. Dans la partie du bassin de la rivière Richelieu, la population de Saint-Jean-sur-Richelieu et d'autres régions urbaines a connu une augmentation constante (par exemple, celle de Saint-Jean-sur-Richelieu a augmenté de 2,9 % entre 2016 et 2021 (Statistique Canada, 2022). Toujours dans la partie du bassin occupé par la rivière Richelieu, la croissance démographique a été concentrée dans les zones urbaines le long d'un étroit couloir, qui fait partie de la plaine inondable naturelle de la rivière.

2.2.3 Modifications anthropiques dans le bassin LCRR

En plus des facteurs géographiques et météorologiques naturels qui influent sur les inondations dans le bassin LCRR, toute une gamme d'activités humaines, passées et présentes, agit probablement aussi sur les niveaux du lac et de la rivière. La croissance démographique dans le bassin de la rivière Richelieu s'est accompagnée d'une augmentation proportionnelle du nombre de constructions en zone inondable. Comme le nombre de constructions résidentielles dans la plaine inondable a augmenté au fil des ans, la valeur des constructions et le coût des dommages causés par les inondations ont également augmenté (GEILCRR, 2019). Il faut noter que l'occupation de la plaine inondable a un effet important sur l'ampleur des impacts des inondations; quand de telles interventions humaines sont absentes de la plaine inondable, les inondations ont des effets moins fréquents et moins coûteux.

Au fil des ans, de nombreux milieux humides qui auraient pu contenir des eaux de crue ont été drainées pour l'agriculture ou comblés pour permettre la construction de bâtiments et de routes. Dans certains secteurs des digues et des pompes ont été mises en place pour protéger les terres agricoles contre les inondations. Les cours d'eau qui se déversaient dans le lac Champlain et la rivière Richelieu ont été redressés et dragués, ce qui a favorisé un écoulement plus rapide et plus puissant des eaux. Des bermes ont été construites le long des rivières pour les empêcher de déborder. Cela a éliminé de nombreuses plaines inondables qui contenaient les eaux de crue.

La rivière Richelieu elle-même a été modifiée par de multiples changements anthropiques (artefacts) et naturels depuis le début de la colonisation européenne, notamment par le dragage, le remblayage, l'installation de structures dans la rivière, l'érosion et le dépôt de sédiments (Thériault et al., 2022). Le canal de Chambly a été ouvert en 1843 le long de la rivière Richelieu pour permettre aux bateaux de contourner les rapides, notamment à hauteur de Saint-Jean-sur-Richelieu. Il a été élargi au début des années 1970. Les modifications apportées au lit de la rivière, comme la construction de pièges à anguilles (figure 4), des piliers du pont ferroviaire et du pont routier et l'élargissement du canal de Chambly (avec le rétrécissement de la rivière qui en a résulté) ont eu tendance à entraver le débit de la rivière et à provoquer une hausse de niveau du lac. Cela est particulièrement vrai dans certains tronçons de la rivière, comme le haut-fond de Saint-Jean-sur-Richelieu. En revanche, les activités de dragage ou d'enlèvement d'obstacles ont plutôt eu tendance à accélérer l'écoulement et à faire baisser les niveaux d'eau.

Le haut-fond de Saint-Jean, qui agit comme un régulateur naturel du niveau du lac Champlain, a fait l'objet de plusieurs modifications. Celui-ci se comporte comme une extension du lac Champlain en raison du contrôle hydraulique qu'il exerce. Le débit de la rivière Richelieu dépend principalement du niveau du lac Champlain et, dans une moindre mesure, des ondes de tempête. La rivière Richelieu s'écoule dans une vallée relativement plate entre Rouses Point et Sorel-Tracy, où elle rejoint le fleuve Saint-Laurent. La figure 5 (MGAI et HHC 2021) présente le profil longitudinal de la rivière assorti de photos des principaux points caractéristiques. Les caractéristiques hydrodynamiques du cours inférieur de la rivière sont complexes, le niveau d'eau dépendant non seulement du débit, mais aussi du niveau du fleuve Saint-Laurent à Sorel-Tracy.

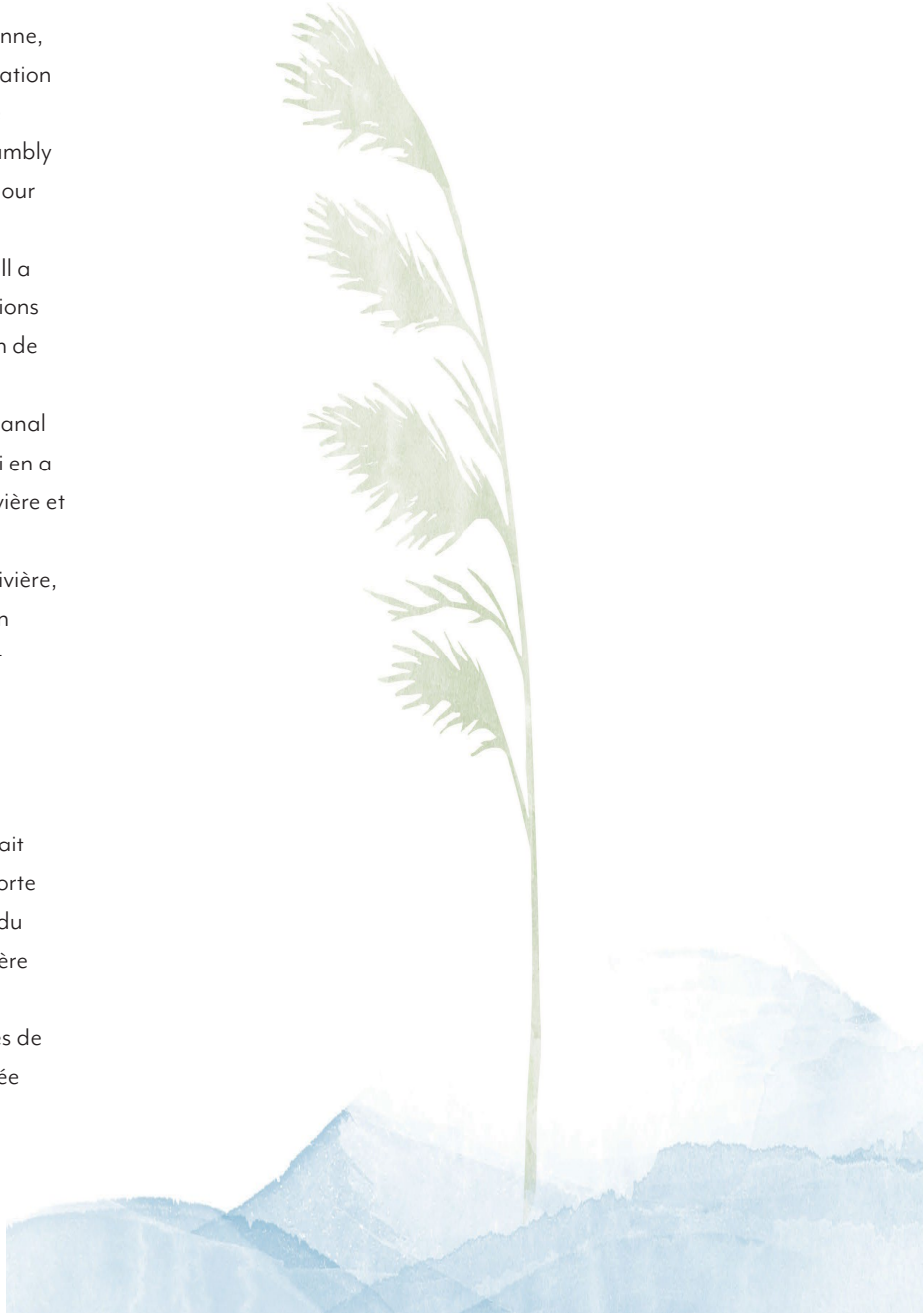


Figure 4. Vestiges de pièges à anguilles sur le haut-fond de Saint-Jean-sur-Richelieu.

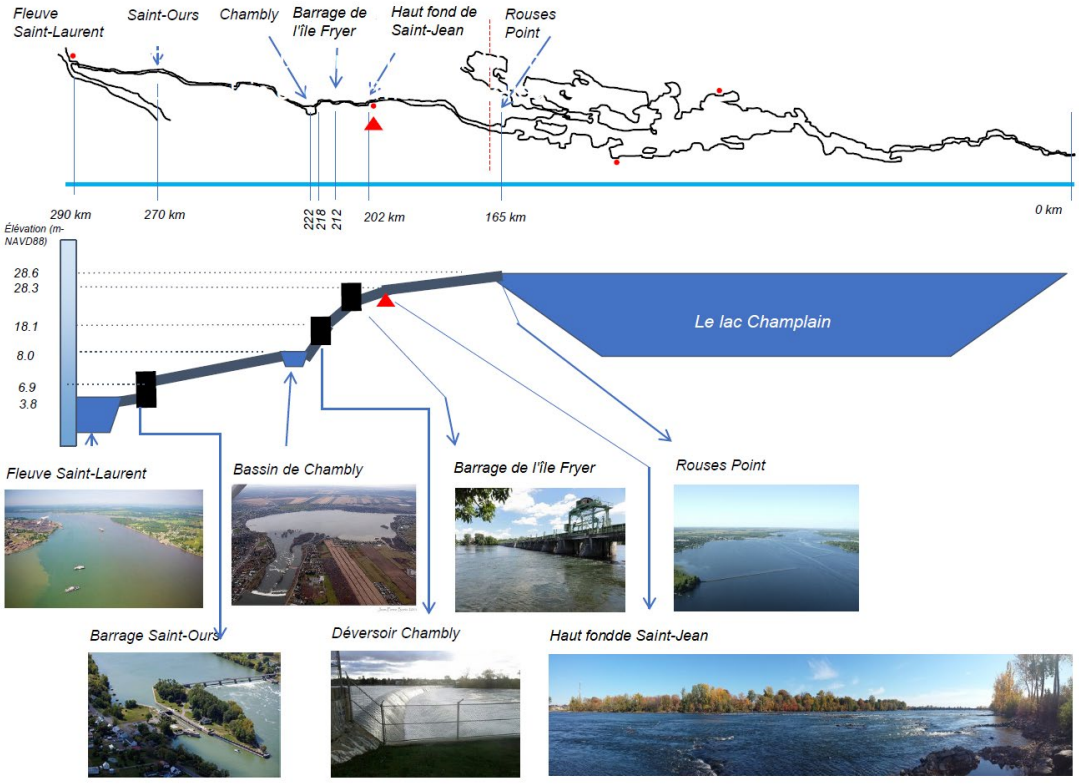


Figure 5. Profil longitudinal de la rivière Richelieu avec illustration des points caractéristiques, l'extrémité nord étant à gauche et l'extrémité sud à droite.

Remarque : l'échelle verticale de la coupe transversale n'est pas linéaire et la dimension verticale globale est exagérée par rapport à l'horizontale. Le panneau supérieur fournit une vue en plan du système pour orienter le lecteur. (MGAI et HHC 2021).

2.3 HISTORIQUE DES INONDATIONS DANS LE BASSIN LCRR

La combinaison de la topographie et du climat rend le bassin LCRR naturellement sujet aux inondations. Les pentes montagneuses abruptes du bassin supérieur, le régime d'écoulement du cours supérieur de la rivière Richelieu, la quantité élevée de neige en hiver, les températures printanières supérieures à la normale et la fréquence des fortes pluies printanières sont autant de facteurs-clés des inondations dans ce bassin, tout comme la taille du bassin versant qui alimente le lac Champlain et qui est plus de 18 fois supérieure à celle du lac dans son état normal. Dans la plupart des régions montagneuses du bassin, un pourcentage élevé des précipitations hivernales est stocké dans le manteau neigeux, qui peut rapidement fondre et se transformer en apport d'eau dans le lac au printemps, quand le débit annuel a tendance à atteindre un pic sur une période de plusieurs semaines. Il se trouve que le niveau du lac connaît lui aussi son pic annuel habituellement au printemps. Le débit dans le cours supérieur de la rivière Richelieu est directement fonction du niveau d'eau du lac Champlain. Ainsi, entre l'exutoire du lac et Saint-Jean-sur-Richelieu, les inondations se produisent en même temps que les crues du lac. En général, les inondations n'ont pas d'impacts aussi graves sur les rives du lac Champlain que le long des tributaires ou de la rivière Richelieu. Cependant, certains secteurs en bordure du lac peuvent être fortement touchés par les vagues et ont connu d'importantes inondations causées par le vent.

Au cours du dernier siècle, il y a eu de nombreuses inondations, dont plusieurs régionales qui furent désastreuses principalement au cours des 25 dernières années dans des secteurs riverains du lac Champlain et dans le cours supérieur de la rivière Richelieu (LCBP, 2013). La figure 6 met en évidence quatre crues survenues entre 1990 et 2019 qui, dans le lac Champlain, ont atteint des niveaux correspondant à des crues « modérées » ou « majeures » selon les critères du National Weather Service des États-Unis (tableau 1). La figure illustre les niveaux d'eau à Rouses Point de la mi-mars à juin ainsi que l'ampleur et la durée de ces événements. Plusieurs inondations notoires survenues dans le bassin au cours du dernier siècle sont abordées dans le Rapport de l'étude traitant des causes et des répercussions (GEILCRR, 2019).

Causes des inondations

Dans une évaluation de 2019 des causes des inondations dans le bassin, le Groupe d'étude a conclu ceci :

1. De graves inondations se sont produites à plusieurs reprises en bordure du lac Champlain et de la rivière Richelieu, notamment lors de la crue printanière extrême de 2011.
2. Les facteurs qui contribuent à ces inondations comprennent à la fois les forces naturelles, comme la géographie et les conditions météorologiques, ainsi que les changements anthropiques (d'origine humaine) dans le bassin, et les changements d'utilisation des terres, le régime de transit de l'eau dans les cours d'eau de même que la construction d'infrastructures.
3. Un épais manteau neigeux, combiné à des pluies printanières chaudes et abondantes, entraîne généralement les crues les plus importantes à cause d'un apport soudain de grands volumes d'eau dans le lac. Parmi les autres facteurs qui contribuent au débordement du lac Champlain, mentionnons la vitesse et la direction du vent et les ondes de seiche connexes.
4. Depuis le début des années 1970, le niveau maximal annuel moyen du lac Champlain a augmenté d'environ 0,30 m (0,98 pi). Cette augmentation est principalement attribuable à l'élargissement du canal de Chambly dans les années 1970.
5. Au fil des décennies, le bassin a subi des changements en raison de modifications anthropiques, comme : la conversion de milieux humides en zones agricoles; la perte d'utilisation naturelle des terres du fait de l'urbanisation et de l'expansion des surfaces imperméables, en particulier dans les plaines inondables.

Tableau 1. Critère de classification des crues du US National Weather Service .

Gravité	Niveau cible du lac Champlain		Répercussions prévues
	(m/pi) NGVD29	(m/pi) NAVD88	
Crue mineure	30,48/100	30,35/99,57	Dommages matériels minimes ou nuls, mais menace possible pour les personnes.
Crue modérée	30,78/101	30,65/100,57	Inondation partielle de structures et de routes riveraines. Évacuation de personnes et/ou surélévation nécessaire des biens.
Crue majeure	30,94/101,5	30,81/101,07	Inondation importante de structures et de routes. Évacuations massives de personnes et/ou surélévation nécessaire des biens.

Source: https://water.weather.gov/ahps2/hydrograph.php?gage=roun6&wfo=btv

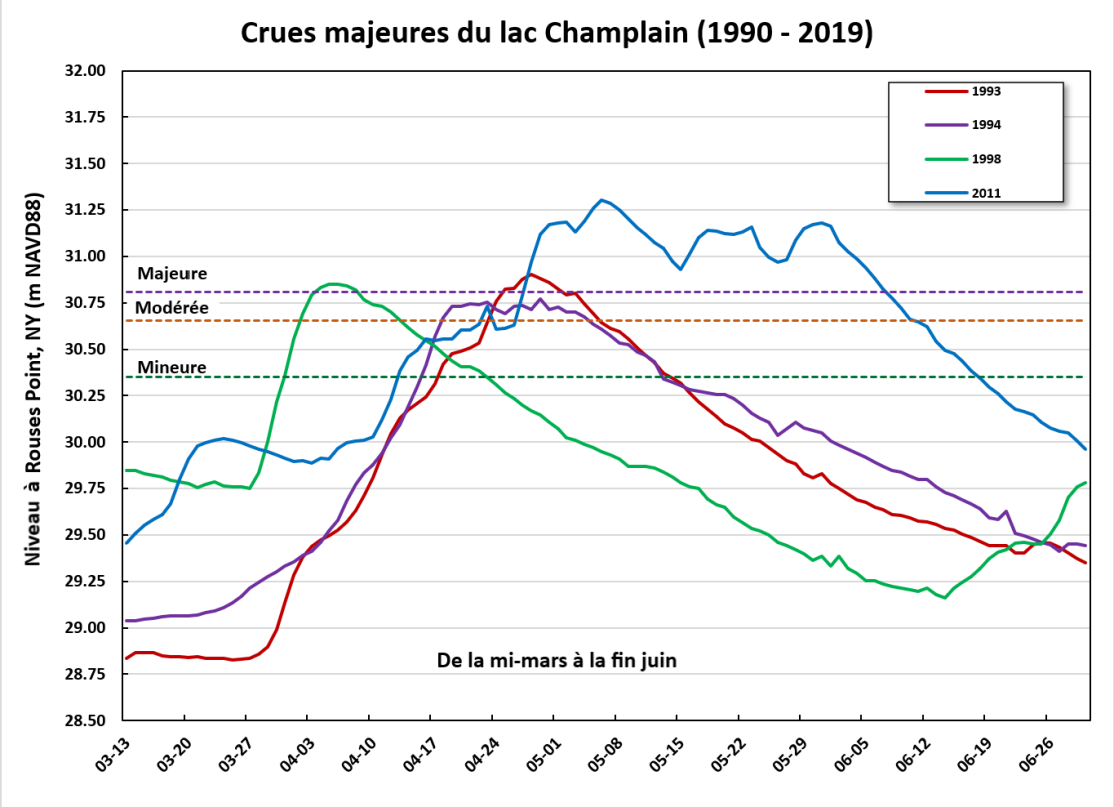
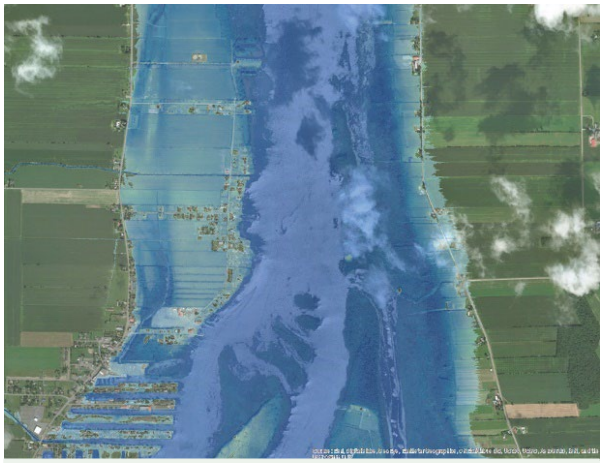


Figure 6. Crues majeures et crues modérées du lac Champlain, 1990-2019. (MGAI et HHC, 2021) .

Les crues survenues au cours du siècle dernier ont souvent été à l'origine d'études et de recommandations concernant des mesures d'atténuation. Ainsi, dans les années 1930, il avait été recommandé de construire un barrage dans la rivière Richelieu. La construction a débuté près de ce qui s'appelle maintenant le barrage de l'île Fryer, à environ 8 km (5 mi) en aval de Saint-Jean-sur-Richelieu (Québec), et des travaux d'excavation ont été entrepris en amont du haut-fond. Cependant, les travaux ont été interrompus au début de la Seconde Guerre mondiale, et le projet de barrage n'a jamais été mené à terme. Puis, dans les années 1970, il fut déterminé que la régularisation du lac Champlain au moyen d'une nouvelle structure permettrait de lutter efficacement contre les inondations (CMI, 1974), mais le projet suscitait d'importantes préoccupations de nature environnementale dans le cas du lac (Riboust et Brissette, 2016). Après l'élargissement du canal de Chambly au début des années 1970, qui a eu pour effet de réduire la largeur de la rivière et de hausser le niveau d'eau en période de débit élevé, le Conseil international du lac Champlain et de la rivière Richelieu a effectué des évaluations limitées portant sur la possibilité de faire passer encore plus d'eau par le canal en période de hauts débit (ICRB, 1979). Cependant, tous les projets de régularisation des débits se sont heurtés à une opposition importante, surtout aux États-Unis (MGAI et HHC 2021). À la suite de vastes consultations publiques, la CMI a renoncé à l'idée de régulariser le réseau LCRR (CMI, 1981). La Commission a toutefois recommandé de miser sur la prévision des crues (ce qui fut mis en œuvre aux États-Unis d'abord, puis au Canada beaucoup plus tard), et sur la cartographie des plaines inondables, ce que les deux pays ont réalisé. D'autres mesures stratégiques ont été prises pour réduire les dommages causés par les inondations. Malgré les études et les recommandations passées au sujet des inondations dans le bassin, le fait que les mesures proposées n'aient pas été mises en œuvre a limité la capacité à s'attaquer au problème.

2.3.1 La crue printanière de 2011

Les chutes de neige durant l'hiver 2010-2011 ont été abondantes, Burlington (Vermont) ayant même connu son troisième record d'enneigement de l'histoire depuis 1883 (NOAA, 2011). De plus, aucun dégel significatif n'avait provoqué la fonte de la neige. Avec des températures hivernales froides, l'importante accumulation de neige est demeurée pendant les mois d'hiver et jusqu'au printemps. Au printemps, les précipitations ont été bien supérieures à la moyenne (de 46 % de plus en mars à 213 % de plus en mai). Les températures chaudes du printemps et la pluie ont provoqué la fonte rapide des neiges en montagne qui se sont déversées sous forme d'eau dans le lac Champlain. Ce phénomène a donné lieu à une période (à partir de 1827) où le niveau d'eau maximal enregistré à tous les limnimètres du lac Champlain a battu des records. En raison de l'étroitesse et de la faible profondeur de la rivière Richelieu combinées à la persistance du niveau élevé du lac Champlain, les conditions étaient réunies pour causer des inondations de longue durée en aval.



Inondation près de Île-aux-Noix, 2011.
(Source: Garde côtière canadienne, 2018)

Bien que les inondations printanières soient fréquentes le long des rives du lac Champlain, celles de 2011 ont été d'une durée sans précédent. Le niveau du lac est demeuré supérieur au niveau de crue mineure de 30,35 m (99,57 pi) du National Weather Service (NWS) des États-Unis pendant 67 jours, à Rouses Point, du 13 avril 2011 au 19 juin 2011[8]. Selon une analyse effectuée en 2015, la période de retour de cette crue est supérieure à 700 ans (MGAI et HHC, 2021). Bien que l'évaluation de la période de retour des grandes crues présente une grande incertitude, les analyses indiquent que la crue printanière de 2011 a une période de retour statistique de 200 à 1 000 ans (Ouarda et Charron, 2019).

Inondation de 2011, Colchester Point (Vermont) (Photo : Matt Sutkoski).

La crue record du printemps 2011 a été exacerbée par des vents persistants du sud. Les observations historiques du niveau du lac Champlain au limnimètre de Rouses Point ont révélé des augmentations importantes du niveau des eaux pendant les épisodes de vent soutenu. L'élévation classique du niveau sous l'effet d'un vent fort soufflant du sud et repoussant l'eau vers la pointe nord du lac peut faire monter le niveau d'environ 15 à 25 cm (6 à 10 po) à Rouses Point, ce qui peut faire la différence entre une crue mineure et une crue majeure pour la rivière Richelieu en raison de l'augmentation du débit sortant du lac (Loiselle et al., 2021). Lors de la crue printanière de 2011, huit cas distincts de surélévation due au vent ont fait monter le niveau nominal du lac de 7,6 à 21,3 cm (3,0 à 8,4 po). Le plus dramatique de ces événements s'est produit le 23 avril 2011, lorsque le lac était en crue mineure, soit tout juste sous la cote de crue modérée de 30,65 m (100,5 pi)[9]. À cause de l'élévation de niveau de 21,3 cm (8,4 po) qui a suivi, le niveau de cote de crue modérée a été atteint à Rouses Point, avant de dépasser 30,81 m (101,07 pi), ce qui correspond à une crue majeure. L'épisode de vent fort s'est terminé le lendemain et les différents niveaux du lac sont revenus dans la plage de crue mineure.

La rivière Richelieu aux rapides Fryer a dépassé le débit de crue de 1 064 m^3/s (37 575 pi^3/s) du 20 avril au 28 juin, soit pendant 69 jours, et a atteint un débit maximal enregistré de 1 539 m^3/s (54 349 pi^3/s). L'augmentation du niveau du lac Champlain pendant la crue s'est répercutée en aval, dans la rivière dont le niveau a été amplifié par les mêmes vents du sud[10].

[8] Les cotes de crue du US National Weather Service sont présentées au tableau 1.
[9] Comme nous l'avons vu, sauf indication contraire, les niveaux d'eau indiqués dans le présent rapport sont basés sur la référence NAVD88. Il en est de même des niveaux de crue. Le tableau 1 présente les niveaux de crue à la fois selon la norme NGVD29 et selon la norme NAVD88; il convient de noter que certains organismes gouvernementaux, comme la NOAA, citent les niveaux de crues selon la norme NGVD29.
[10] Il convient de souligner que de grandes crues de fréquence statistique rare peuvent se produire plusieurs fois en peu de temps; par exemple, des inondations historiques le long de la rivière des Outaouais et dans la région métropolitaine de Montréal se sont produites en 2017 et en 2019.

2.4 CONTEXTES SOCIAL, POLITIQUE ET ÉCONOMIQUE DES INONDATIONS

Les inondations du printemps 2011 ont eu de graves répercussions. Dans les États de New York et du Vermont, 1 310 maisons ont été endommagées et plus de 2 500 autres ont subi le même sort au Québec. Au cours des inondations de 2011, on estime que plus de 100 ponts et routes ont été endommagés au Québec. Dans les deux pays, des routes trop basses ont été inondées, ce qui a perturbé les transports et isolé ou menacé d'isoler des personnes et des collectivités. Plus de 1 600 personnes ont dû être évacuées au Québec, elles faisaient face à de nombreux risques pour la santé échappant à la portée de la présente étude, comme la moisissure dans les bâtiments, les risques d'électrocution et la contamination de l'eau destinée à la consommation. De nombreuses entreprises ont été touchées, comme les campings et les marinas. Une grande partie de la région qui borde le lac Champlain et la rivière Richelieu est agricole. De nombreuses cultures ont été perdues directement en raison de la durée des inondations qui a eu une incidence sur les semailles; le rendement des cultures a aussi diminué en raison des fortes pluies. Toutes ces répercussions ont été à même d'affecter les communautés autochtones, notamment en ce qui a trait à la disponibilité des territoires de chasse et de pêche. Les pertes économiques totales dues aux inondations de 2011 ont d'abord été estimées à plus de 104 millions de dollars canadiens (82 millions de dollars américains), la plupart (86 millions de dollars canadiens; 67 millions de dollars américains) au Québec. Ces valeurs déclarées concernaient principalement les dommages résidentiels enregistrés et non un ensemble plus vaste d'impacts. Une évaluation subséquente plus complète a fait ressortir que les dommages étaient d'environ 70 % plus élevés, soit environ 188 millions de dollars canadiens (141 millions de dollars américains) (Moin et al., 2022).

« Il n'y avait pas grand-chose à faire, à part attendre la baisse des eaux. Il a fallu mettre la maison à nu jusqu'à la structure … »

— Terry Pomerlau, résident de Burlington-Sud (Vermont), se souvenant des inondations de 2011, quand il avait 22 ans, lors d'une entrevue en 2021

Remembering historic 2011 Lake Champlain flooding

https://www.wcax.com/2021/04/23/looking-back-10-years-ago-to-historic-lake-champlain-flooding/

La figure 7 illustre ces pertes par secteur et montre les graves impacts sur les zones résidentielles, avec 64 % des pertes totales (en valeur monétaire).

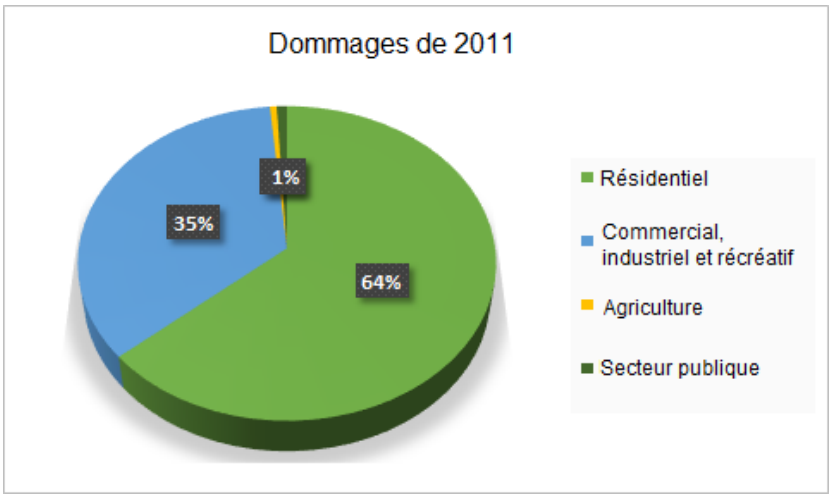


Figure 7. Pertes économiques sectorielles dues aux inondations de 2011; pourcentage des dommages totaux estimés (selon Roy et al., 2022).

Les graves inondations survenues dans le bassin du lac Champlain et de la rivière Richelieu en 2011 ont incité le gouvernement du Québec à réévaluer les politiques et les pratiques de gestion des crues à l'échelle de la province. En effet, peu après ces événements, le gouvernement provincial a établi des « zones d'intervention spéciale » (ZIS) dans toutes les municipalités situées le long de la rivière Richelieu. Dans une ZIS il est interdit de reconstruire dans toute zone inondable exposée à des inondations de récurrence 0 à 2 ans, mais cela est permis dans une zone sujet à des inondations de récurrence 2 à 20 ans, à condition que certaines mesures de protection soient adoptées (Henstra, 2021).La série de crues majeures qui a frappé plusieurs régions du Québec au printemps 2017 n'a fait que souligner l'urgence d'envisager des réformes politiques et a incité le ministère de la Sécurité publique à rédiger un Plan d'action en matière de sécurité civile axé sur le problème des inondations. Les mesures recommandées comprennent des plans de protection civile obligatoires pour toutes les municipalités, un soutien financier pour améliorer la préparation aux catastrophes d'envergure touchant les municipalités, un cadre d'aide mutuelle intermunicipale, une meilleure gestion des zones inondables et une meilleure communication au public des risques d'inondation. Le projet INFO-Crue, qui vise à recenser et à cartographier les zones inondables dans le sud du Québec, est une initiative majeure à laquelle le plan a donné lieu en 2018. Le projet tiendra compte des projections en matière de changements climatiques pour permettre l'élaboration d'outils et d'un système de prévision des crues destinés à appuyer la planification de l'utilisation des terres dans plusieurs bassins hydrographiques (Québec, 2018).

Après les graves inondations du printemps 2019 qui se sont de nouveau produites dans plusieurs régions du Québec, les restrictions d'aménagement dans les ZIS ont été renforcées et étendues. Ces dernières années, allant au-delà de cette application du pouvoir réglementaire de la province, le gouvernement du Québec a lancé un programme de rachat des propriétés gravement endommagées, a entrepris un effort global de remplacement des cartes de zones inondables désuètes par des photographies aériennes et par la télédétection par satellite, et a financé un réseau interdisciplinaire de chercheurs et de scientifiques, travaillant pour le gouvernement ou pour des universités (Réseau

Inondations intersectoriel du Québec, RIISQ) en vue d'améliorer la protection contre les inondations et la préparation aux inondations au Québec. Un nouveau cadre complet de gestion des inondations, le Plan de protection du territoire face aux inondations (Gouvernement du Québec, 2020) propose 23 mesures visant à renforcer la gestion des inondations. Ces changements comprennent des modifications de la politique provinciale sur l'utilisation des terres le long des cours d'eau et dans les plaines inondables connues, ainsi que la création de dix « bureaux de projet » sur la gestion des inondations qui dirigeront la planification à l'échelle du bassin versant (Therrien et al., 2021). Des changements ont aussi été apportés aux programmes de prévention et d'atténuation des catastrophes à l'échelon fédéral; par exemple, les Accords d'aide financière en cas de catastrophe ont été modifiés et un groupe de travail sur l'assurance inondation et la réinstallation a été mis sur pied.

Du côté américain, des changements ont été apportés aux politiques et aux programmes, tant à l'échelon national qu'étatique, changements qui sont en rapport avec les constatations et les conclusions du Groupe d'étude. Notamment, d'importants changements au National Flood Insurance Program (NFIP) (Programme national d'assurance inondation), entrepris il y a plusieurs années, ont commencé à entrer en vigueur en 2021. Baptisé « Risk Rating 2.0 » (Cote de risque 2.0), ce changement de cap vise à imposer des primes d'assurance inondation reflétant le risque de chaque propriété plutôt que d'imposer un taux unique, comme le prévoyait l'approche précédente. Avant, un système de cotation national servait à calculer les pertes prévues pour des ensembles de structures présentant des risques d'inondation et ayant des caractéristiques structurelles semblables. Le même taux était appliqué à toutes les polices de ces ensembles.

En 2018, des représentants de l'État de New York ont lancé le programme Resilient NY destiné à améliorer la résilience des collectivités aux conditions météorologiques extrêmes qui sont cause d'inondations (New York, 2021). Administré par le Department of Environmental Conservation, le programme modélise les risques d'inondation dans l'ensemble de l'État et détermine les bassins versants à cibler en toute priorité pour les mesures d'atténuation des inondations. Les collectivités devant bénéficier en priorité des mesures de réduction des risques (ce qui s'entend de la restauration des plaines inondables, du stockage des eaux d'inondation, de mesures simples de protection structurale comme les digues, et des programmes de rachat pour déplacer les personnes et les propriétés hors des zones exposées) sont désignées en fonction des résultats d'une série d'analyses. La liste des bassins versants hautement prioritaires comprend plusieurs tributaires du lac Champlain.

Entre 2010 et 2014, l'assemblée législative du Vermont a adopté plusieurs lois à l'appui d'un programme de gestion du corridor fluvial et de la plaine inondable destiné à protéger la santé, la sécurité et le bien-être du public contre les risques d'inondation (Vermont Agency of Natural Resources, 2017). En collaboration avec la FEMA (l'Agence fédérale de gestion des urgences) et les municipalités locales, le Department of Environmental Conservation a été chargé de cartographier les zones voisines des chenaux fluviaux où des phénomènes d'érosion fluviale et l'évolution de la morphologie des chenaux sont les plus susceptibles de se produire. Depuis, les gestionnaires des plaines inondables de l'États servent de ces cartes pour encourager les municipalités à adopter des règlements visant à protéger les couloirs fluviaux en vertu d'une approche « d'adaptation » destinée à donner à la rivière l'espace nécessaire pour évoluer dans le temps. Il s'agit donc bien de mesures d'adaptation conçues pour assurer l'utilisation continue

des plaines inondables, tout en réduisant la vulnérabilité ou l'exposition des utilisateurs par la sélection des modes d'utilisation les moins sensibles aux inondations (Alberti-Dufort, 2022b). De plus, l'État du Vermont a créé un fonds d'aide d'urgence (Emergency Relief Assistance Fund, ERAF) pour soutenir les municipalités qui adoptent des mesures en vue d'améliorer leur résilience aux inondations à la suite d'une catastrophe déclarée par le gouvernement fédéral (Vermont, 2021). Ce programme semble avoir permis de réduire efficacement les risques d'inondation : entre 2014 et 2017, le nombre de municipalités disposant de tels plans de gestion des urgences a presque triplé, et celui des municipalités ayant des plans d'atténuation des risques a presque doublé (Pew Charitable Trusts, 2019).

2.5 HISTORIQUE DE LA PARTICIPATION DE LA CMI DANS LE BASSIN LCRR

En réponse aux multiples inondations survenues au cours du siècle dernier, les gouvernements du Canada et des États-Unis ont présenté une série de demandes ou de « renvois » à la CMI pour qu'elle étudie la question et formule des recommandations en vue d'atténuer les inondations.

Les années 1930 : Le premier renvoi des gouvernements à la CMI sur le thème des inondations a été émis dans les années 1930 à la suite d'inondations majeures dans le bassin. Au cours de cette période, la CMI a déterminé que les ouvrages de protection contre les inondations seraient le moyen le plus efficace de lutter contre ce phénomène. La question des impacts environnementaux d'une telle solution a été soulevée par les partenaires américains et canadiens, bien que peu de mesures aient été prises à cet égard. Le renvoi a conduit à la construction du barrage de l'île Fryer, situé à environ 8 km (5 mi) en aval de Saint-Jean-sur-Richelieu, qui a été achevée en 1939 (GEILCRR, 2019). Les travaux de remise en état nécessaires pour rendre le barrage fonctionnel ont toutefois été retardés en raison du déclenchement de la Seconde Guerre mondiale, et ils n'ont jamais été menés à terme.

> En 2012, les gouvernements du Canada et des États-Unis ont demandé à la CMI « d'examiner plus à fond les causes, les répercussions, les risques et les solutions en ce qui a trait aux crues dans le bassin du lac Champlain et de la rivière Richelieu »

Les années 1970 : Une deuxième étude sur les inondations dans le bassin LCRR a été commandée en 1973, après d'importantes inondations régionales. Les résultats de l'étude ont incité la CMI à proposer la construction d'une structure à vannes à hauteur de Saint-Jean-sur-Richelieu pour réguler le débit, mais il revenait aux deux gouvernements fédéraux de déterminer si cette solution structurelle était acceptable du point de vue politique. La structure proposée n'a finalement pas reçu l'appui des États du Vermont et de New York. Bien que les gouvernements fédéraux ne se soient pas entendus sur la mise en œuvre d'une solution structurelle au problème des inondations, chacun a appuyé la recommandation de la CMI d'opter pour un système binational de prévision des crues et d'avertissement des inondations, ainsi que pour d'autres

mesures de nature non structurelle afin de lutter contre les inondations. Un système de prévision des crues a depuis été mis en place aux États-Unis, et la cartographie des plaines inondables a été adoptée pour le bassin LCRR. La cartographie des plaines inondables a été réalisée pour certains tronçons de la rivière dans les années 1970, puis pour le tronçon du lac à Chambly en 2005 et le tronçon de Chambly à Sorel en 2013.

Les années 2010 : Un troisième renvoi concernant les crues a été émis pour le bassin LCRR en 2017, à la suite des inondations printanières catastrophiques de 2011. En prévision de l'étude de 2017, la CMI a mis sur pied le Groupe de travail international du plan d'étude du lac Champlain et de la rivière Richelieu qui, en 2013, a déposé un plan d'étude pour explorer les risques et les causes des inondations, ainsi que leurs impacts dans le bassin, de même que les solutions qui pourraient y être apportées. L'année suivante, en 2014, pour donner suite au plan d'étude, la CMI a créé le Groupe de travail technique international du lac Champlain et de la rivière Richelieu qui a déterminé quelles données il convenait de recueillir pour élaborer à la fois un système de prévision des crues et des cartes statiques susceptibles d'indiquer là où des inondations se produiraient en fonction de différents niveaux du lac. En réponse à une autre recommandation des gouvernements canadien et américain de poursuivre l'étude sur les inondations dans le bassin, en 2016, la CMI a créé le Groupe d'étude international du lac Champlain et de la rivière Richelieu afin d'entreprendre une étude de cinq ans sur les moyens d'atténuer les inondations dans le bassin.

3 APPROCHE RETENUE POUR L'ÉTUDE SUR LE BASSIN LCRR

L'étude sur les inondations dans le bassin LCRR est une collaboration internationale reposant sur la contribution de différentes personnes (tant locales qu'extérieures au bassin) qui possèdent une expertise dans des disciplines complémentaires. Les travaux ont porté sur les causes et les impacts des inondations dans le bassin international du lac Champlain et de la rivière Richelieu ainsi que sur les risques d'inondation et les solutions possibles. L'inclusion d'une équipe pour étudier, dès le début, les facteurs sociaux, politiques et économiques associés à toute mesure d'atténuation des inondations est une nouveauté dans les études réalisées par la CMI et cette formule est un modèle de la façon dont les connaissances de ces disciplines pourront améliorer les futurs travaux sur les bassins hydrographiques.

Cette section du rapport décrit les objectifs et l'organisation de l'étude, ainsi que l'approche technique et les méthodes d'évaluation des aspects sociaux, politiques et économiques ayant servi à formuler les conclusions et les recommandations de l'étude.

3.1 OBJECTIFS ET ORGANISATION DE L'ÉTUDE SUR LE BASSIN LCRR

L'étude a reposé sur la collaboration internationale de plus de 100 personnes[11] ayant une expertise en gestion des inondations, en génie, en planification et en atténuation des inondations, en analyse environnementale, en économie, en sciences sociales et en savoirs autochtones. L'étude a été dirigée par le Groupe d'étude composé de représentants du Canada et des États-Unis. Ce dernier était épaulé par des groupes binationaux chargés des principales tâches d'analyse, de communication, de sensibilisation et de gestion de l'information (figure 8), ainsi que d'examinateurs indépendants. Les groupes en question sont les suivants :

- *Groupe d'examen indépendant (GEI)* composé d'experts de disciplines connexes; le GEI a soumis les produits et les rapports de l'étude à un examen technique indépendant.

- *Groupe consultatif public (GCP)* qui représentait divers secteurs d'intérêt et diverses régions du bassin LCRR. Ses membres ont mis à profit leurs connaissances, leurs contacts et leur expérience pour fournir des conseils et encourager la participation du public à l'étude.

- *Groupe de soutien en gestion de l'information et en technologie de l'information (GI/TI)* qui a fourni des outils et de l'espace en ligne pour faciliter la communication et l'échange de données entre les membres de l'étude, ainsi que la gestion des données. Il a aussi assuré d'autres formes de soutien technologique à l'étude.

- *Groupe de travail sur les communications* chargé d'organiser des réunions publiques et d'élaborer divers outils de communication, y compris des bulletins, des fiches d'information et d'autres documents distribués aux parties prenantes et au public.

[11] Ces personnes ont été sollicitées pour leur expertise et les points de vue qu'elles ont exprimés dans le cadre de leur participation à l'étude ne représentent pas nécessairement ceux de leur organisation.

- *Groupe d'analyse sociale, politique et économique (SPE).* Il a conseillé le Groupe d'étude sur les questions sociales, politiques et économiques complexes qui constituent un élément important du défi que posent l'atténuation et la gestion des inondations.

- *Groupe de travail technique (GTT) sur l'hydrologie, l'hydraulique et la cartographie (HHC).* Celui-ci a créé des modèles hydrologiques, hydrauliques et des bilans hydrologiques tenant compte de l'impact des changements climatiques futurs et d'autres facteurs, et il a élaboré plusieurs outils de prise de décisions, comme des modèles de prévision des crues et de cartographie des inondations.

- *Groupe de travail technique (GTT) sur l'impact sur les ressources (IR)* était chargé d'élaborer les indicateurs nécessaires pour évaluer les diverses options de gestion et d'atténuation des inondations en regard des répercussions sur l'environnement, sur les personnes et sur l'économie, ainsi que le système d'intégration de ces indicateurs.

- *Groupe de travail technique (GTT) sur les mesures de gestion et d'atténuation des inondations (MGAI).* Il a conçu et évalué les options de gestion et d'atténuation des inondations.

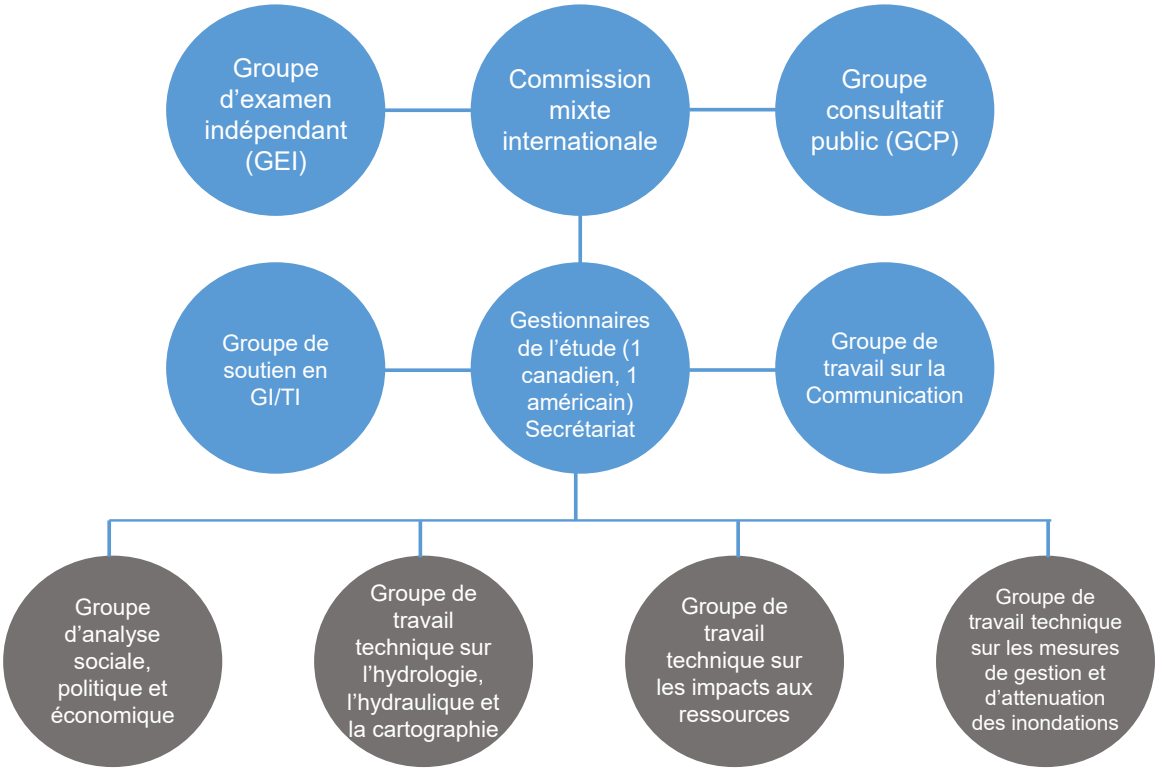


Figure 8. Organisation de l'étude.

D'autres renseignements sur le Groupe d'étude et ses groupes techniques et consultatifs sont disponibles sur le site Web de l'étude (https://ijc.org/fr/lcrr) et dans le plan de travail de l'étude (GEILCRR, 2017). Une liste complète des participants à l'étude figure à l'annexe C du présent rapport.

Conformément aux lettres de renvoi des gouvernements du Canada et des États-Unis à la CMI, le Groupe d'étude a entrepris de réaliser sept tâches correspondant aux objectifs de l'Étude (https://ijc.org/fr/lcrr) :

1. Évaluer les **causes et les répercussions** des inondations passées et, en particulier, des événements de 2011

2. Évaluer les possibilités offertes par les **pratiques exemplaires de gestion des plaines inondables**

3. Évaluer les **stratégies d'adaptation** possibles pour tenir compte de la variabilité escomptée des futurs apports d'eau

4. Formuler des recommandations relatives à la mise en œuvre d'un **système de prévision des crues et de cartographie des inondations en temps réel** pour le bassin

5. Renforcer la compréhension **des perceptions sociales et politiques actuelles** associées aux mesures structurelles et autres mesures d'atténuation proposées afin de soutenir l'évaluation de mesures d'atténuation potentielles

6. Réaliser une évaluation exhaustive **du potentiel des mesures de gestion et d'atténuation des inondations** et des impacts de ces mesures sur le milieu naturel, les usages de l'eau, l'environnement bâti et l'agriculture

7. Élaborer **des modèles d'impacts sur les ressources** comportant des indicateurs de base qui permettent d'évaluer les impacts associés aux fluctuations du niveau d'eau, afin de soutenir la planification, l'évaluation et le classement des solutions possibles pour atténuer les inondations.

Le Groupe d'étude a regroupé ces sept tâches en deux objectifs principaux et quatre thèmes (figure 9) qui ont orienté les travaux de l'étude. Le premier objectif concernait la réduction des impacts des crues grâce à un abaissement des niveaux d'eau élevés en utilisant des solutions de nature structurelle modérées (thème 1), ou à des options de stockage dans le bassin versant (au titre, par exemple, de l'accroissement de la superficie de milieux humides) pour restreindre les écoulements vers le lac (thème 2). Le deuxième objectif était axé sur la réduction de la vulnérabilité aux niveaux d'eau élevés et sur le renforcement de la résilience aux inondations, par l'amélioration de la réaction aux inondations (thème 3) et de la gestion des plaines inondables (thème 4). Les questions de changements climatiques et l'évaluation de l'acceptabilité sociale, économique et politique des recommandations potentielles sont des principes primordiaux dans tous les thèmes. Les activités menées dans le cadre de ces tâches ont appuyé l'élaboration de recommandations sur la réduction des impacts dus aux inondations, qui sont décrites plus loin dans le présent rapport.

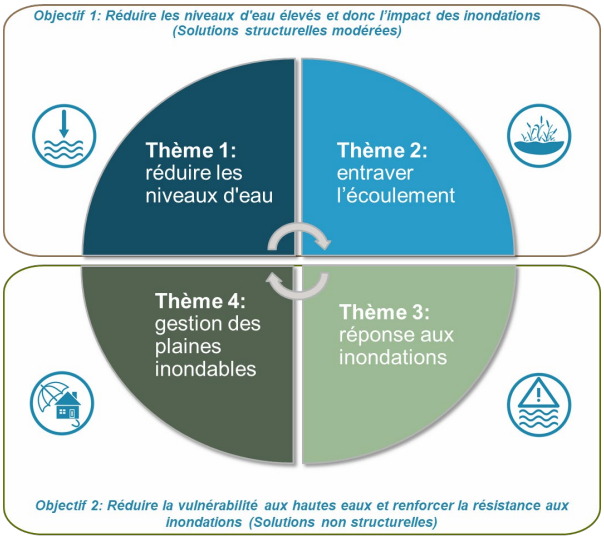


Figure 9. Cadre d'atténuation des inondations de l'étude sur le bassin LCRR.

Les mesures de nature structurelle sont conçues pour faciliter le passage de l'eau dans la rivière Richelieu ou pour la retenir en amont. Les gouvernements du Canada et des États-Unis ont demandé à la CMI d'évaluer des mesures d'atténuation structurelles « modérées ». Or, les mesures de nature non structurelle diffèrent des mesures de nature structurelle en ce sens qu'elles sont axées sur la réduction des conséquences des inondations plutôt que

sur une atténuation des inondations (elles n'occasionnent généralement pas un abaissement du niveau et du débit des eaux, ni une diminution de la durée des inondations. Les mesures non structurelles peuvent être temporaires (contingentes) ou permanentes.

3.2 ÉLABORATION ET UTILISATION DES OUTILS, DES PARAMÈTRES ET DES CRITÈRES DE L'ÉTUDE

Le Groupe d'étude a élaboré et appliqué plusieurs approches et outils novateurs dans le cadre de son évaluation, comme une modélisation à haute résolution et une technologie de l'information de pointe (figure 10). Ces outils ont appuyé les évaluations de l'étude et seront utiles à la conduite des futures études sur le bassin LCRR, ainsi qu'aux études concernant d'autres bassins hydrographiques. Les outils, paramètres ou indicateurs, approches ou ensembles de critères utilisés sont décrits ci-après.

3.2.1 Modèle altimétrique numérique (MAN)

La caractérisation précise du terrain est au cœur du système ISEE. Le modèle hydrodynamique nécessite des données d'altitude pour chaque nœud de la grille des éléments finis afin d'assurer la précision des niveaux et des débits d'eau. Le système ISEE exploite également les données d'altitude pour estimer la profondeur de l'eau dans la zone d'étude à tout moment de la période de référence. Les données altimétriques servent ensuite à déterminer différents attributs de terrain qui influent sur les indicateurs de performance environnementaux traités plus en détail, plus loin dans le présent rapport.

Afin de profiler le terrain comme il se doit, un modèle altimétrique numérique à haute définition a été créé à partir d'une vaste collection d'ensembles de données topographiques LiDAR et bathymétriques provenant d'une multitude de sources gouvernementales américaines et canadiennes. En certains endroits critiques, des relevés sur le terrain ont été effectués pour recueillir des données supplémentaires sur l'altitude. En particulier, un relevé bathymétrique précis du haut-fond de Saint-Jean-sur-Richelieu a été effectué par ECCC lors d'un épisode d'étiage exceptionnel à l'automne 2016.

Au besoin, le système de référence altimétrique a été modifié de sorte que tous les ensembles de données puissent être fusionnés à un système de référence commun[12], le système de référence altimétrique nord-américain de 1988 (NAVD88). Une évaluation a été nécessaire pour chaque mesure d'atténuation des inondations proposée qui nécessitait des modifications de la bathymétrie du secteur du haut-fond Saint-Jean. Par conséquent, des MAN distincts de cette zone ont été créés pour chacune des mesures du thème 1 (ECCC, 2022).

Un MAN du cours supérieur de la rivière Richelieu a été conçu pour reproduire l'état naturel du cours d'eau avant que les changements de nature anthropique ne soient apportés et pour évaluer cette condition. Le MAN de reconstitution a été établi à partir de la bathymétrie des anciennes cartes topographiques et d'après une comparaison avec le MAN actuel. La figure 11 illustre les différences entre les conditions historiques (1887) et les conditions actuelles (2021) dans le secteur des rapides de Saint-Jean (Thériault et al., 2021). Ces évaluations ont permis de recenser de nombreuses interventions humaines et modifications apportées au lit de la rivière : digues submergées canalisant le débit vers des moulins depuis disparus; vestiges de pièges à anguilles; île artificielle modifiée à différents moments dans le temps; et construction du canal de Chambly lui-même, du côté ouest du haut-fond de la rivière Richelieu.

[12] Comme nous l'avons vu, dans le présent rapport, les niveaux d'eau sont donnés par rapport au North American Vertical Datum de 1988 (NAVD88)

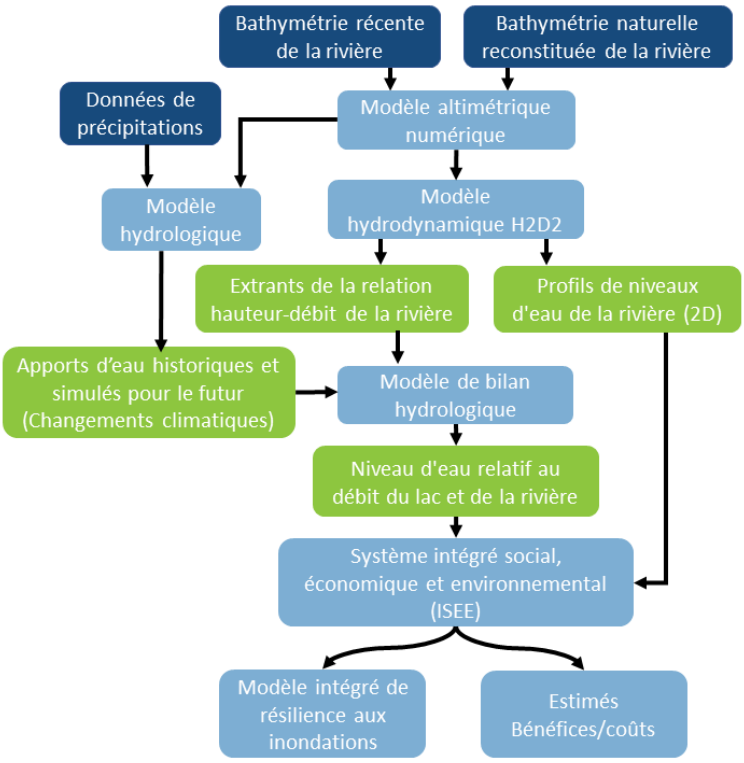


Figure 10. Liens entre les données et les modèles utilisés pour déterminer les débits et les niveaux d'eau dans le cadre de l'évaluation des mesures d'atténuation possibles des inondations.

Les boîtes en bleu foncé représentent les intrants du modèle, les boîtes en bleu clair représentent les modèles ou les outils, et les boîtes en vert clair représentent les extrants du modèle intermédiaire. Les flèches illustrent le sens du flux des données ou des extrants dans le réseau. La largeur ou la longueur des flèches ne sont pas indicatives de l'ampleur relative des données ou des résultats d'une boîte à l'autre.

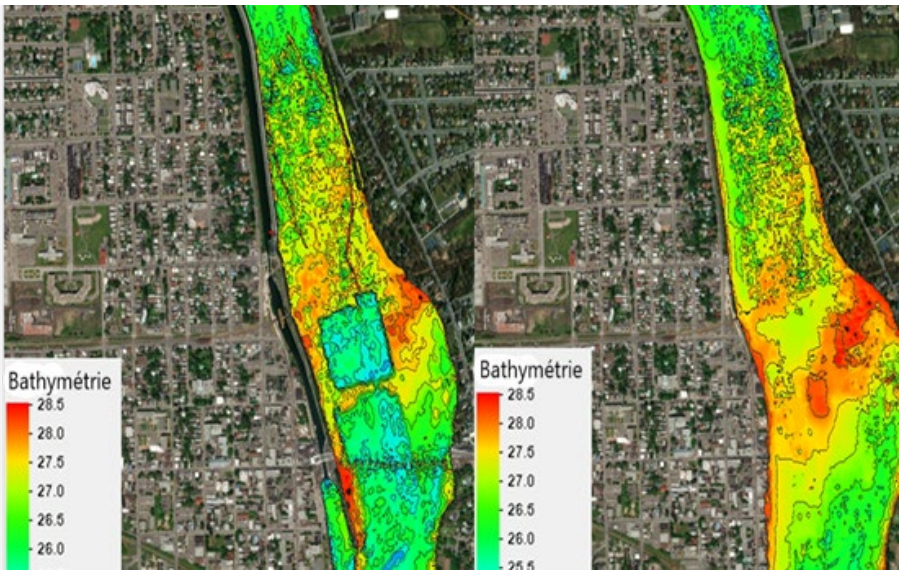


Figure 11. Modèle altimétrique numérique (MAN) actuel (2021) (à gauche) et MAN de l'état naturel (1887) (à droite) pour le secteur des rapides de Saint-Jean. Les altitudes sont indiquées en mètres.

3.2.2 Modélisation hydrologique des apports d'eau

Le Groupe d'étude s'est servi de la plateforme de modélisation hydrologique PHYSITEL/HYDROTEL (Fortin et al., 1995) en tant que modèle hydrologique directeur pour représenter la dynamique du réseau. La plateforme HYDROTEL est un modèle opérationnel de simulation hydrologique utilisé pour de nombreuses applications au sein du gouvernement du Québec. La plateforme PHYSITEL/HYDROTEL est destinée à représenter les bassins versants qu'elle subdivise en sections de cours d'eau et de pentes, elle simule l'effet de la couverture terrestre sur les débits et fournit les valeurs d'apports d'eau d'un bassin à un modèle de bilan hydrologique d'un lac ou d'un réservoir ou à un modèle hydrodynamique pour prédire les niveaux d'eau d'un lac ou d'une rivière.

PHYSITEL est un système d'information géographique (SIG) spécialisé (Turcotte et al., 2001; Rousseau et al., 2011; Royer et al., 2006) qui a été élaboré pour déterminer la structure de drainage complète d'un bassin hydrographique à l'aide d'un modèle altimétrique numérique (MAN) et de réseaux de rivières et de lacs numérisés. HYDROTEL est un modèle hydrologique distribué qui simule le débit des cours d'eau ainsi que des variables comme l'équivalent en eau de la neige (EEN) et la saturation de l'eau à l'aide de variables météorologiques de base. Deux instances d'HYDROTEL ont été utilisées pour l'étude. La première pour l'analyse des changements climatiques (Lucas-Picher et al., 2020) et la deuxième pour l'étude du stockage dans le bassin hydrographique. Les données de 25 stations hydrométriques et 64 années de données météorologiques maillées ont été utilisées dans l'élaboration et l'étalonnage des modèles.

HYDROTEL superpose un réseau de cellules rectangulaires sur le bassin versant du lac Champlain; les processus hydrologiques dans chaque cellule sont calculés, puis appliqués aux cellules avoisinantes. L'eau se déplace dans le temps sur la grille, produisant les débits des affluents du lac Champlain. Les intrants peuvent être historiques ou projetés, ce qui permet d'estimer les apports au bassin du lac Champlain à l'aide de projections de distributions de précipitations et de températures. HYDROTEL calcule les conditions météorologiques, l'évapotranspiration, l'accumulation/la fonte de neige, l'infiltration, la recharge, l'écoulement de surface, l'écoulement de subsurface et le transit de l'eau dans les cours d'eau pour chaque unité de calcul et section de cours d'eau. Ceux-ci ont été calculés pour un pas de temps journalier dans la présente étude.

3.2.3 Modèle hydrodynamique bidimensionnel (H2D2)

Le Groupe d'étude a utilisé le modèle hydrodynamique bidimensionnel, le H2D2, pour générer les niveaux et les débits d'eau dans le réseau lacustre et fluvial de sorte à alimenter le modèle de bilan hydrologique ainsi que le système intégré social, économique et environnemental intégré (ISEE) décrit plus loin dans le présent rapport. L'équipe chargée de l'étude a mis à jour le modèle hydrodynamique élaboré en 2015 dans le cadre de la démonstration d'une trousse de prévisions opérationnelles par le Groupe de travail technique international sur le lac Champlain et la rivière Richelieu (Boudreau et al., 2015a, 2015b). Le modèle hydrodynamique H2D2 a été élaboré par l'INRS-Eau (maintenant l'INRS-ETE), avec l'aide d'Environnement et Changement climatique Canada. Le modèle repose sur les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement, les pertes dues au frottement étant attribuées à la présence de substrats variables, de végétation aquatique, de glace, etc. Les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement sont résolues à l'aide de la méthode des éléments finis. Le modèle H2D2 a été utilisé dans nombre d'études, dont plusieurs de la CMI. Plusieurs modèles hydrodynamiques ont été élaborés pour couvrir l'ensemble de la zone d'étude, de Whitehall (New York) à l'extrémité sud du Lac Champlain, à Sorel-Tracy (Québec), soit à l'extrémité nord de la rivière Richelieu. Ce découpage en sections distinctes est permis par la présence de structures géomorphologiques le long de la

rivière, comme les rapides de Chambly ou le barrage de l'île Fryer.

La rivière Richelieu a été subdivisée en deux tronçons aux fins de la modélisation hydrodynamique : 1) de Rouses Point (New York) au barrage de Chambly, à environ 16 km (10 mi.) au nord de Saint-Jean-sur-Richelieu, soit une distance totale d'environ 53 km (33 mi); et 2) la section aval de la rivière Richelieu jusqu'à son embouchure au fleuve Saint-Laurent près de Sorel-Tracy (environ 72 km ou 45 mi.). Le tronçon en question a été subdivisé en sections triangulaires formant un « maillage » ou une « grille d'éléments finis ». La forme et la taille des sections peuvent être modifiées pour représenter la forme et la complexité du terrain, du substrat, de la végétation aquatique et de toute autre variable. Plus le terrain est complexe, plus le maillage est fin et plus il y a d'éléments. La bathymétrie et la topographie ont été projetées sur le maillage hydrodynamique à l'aide d'un modèle altimétrique numérique combinant des relevés bathymétriques et des ensembles de données altimétriques LiDAR[13]. La friction au fond du chenal, caractérisée par le coefficient de Manning, a été calibré en fonction d'une hydraulique unidimensionnelle stable et d'après la géomorphologie de la rivière, des observations sur le terrain et des photos aériennes prises en période d'étiage.

Le modèle hydrodynamique utilisé à l'appui de cette étude avait pour principal objet de quadriller les niveaux d'eau afin de faciliter le calcul de la valeur des indicateurs de performance et donc d'évaluer les mesures d'atténuation. À cette fin, de multiples simulations de conditions stationnaires ont été effectuées pour une plage de débits donnée au barrage de l'île Fryer et une plage de niveaux d'eau à Rouses Point. On a constaté que le niveau du fleuve Saint-Laurent influence le niveau d'eau jusqu'au bassin de Chambly. De plus, les extrants hydrodynamiques ont permis d'établir les relations de niveau-débit à Saint-Jean-sur-Richelieu utilisées par le modèle du bilan hydrologique (décrit à la section suivante), dans le cadre des différentes mesures d'atténuation des inondations de l'étude.

3.2.4 Modèle de bilan hydrologique

Le modèle de bilan hydrologique (MBH) du lac Champlain devait permettre d'obtenir des valeurs de niveau et de débit d'eau d'après les apports d'eau, ainsi que les configurations actuelles et potentielles du haut fond de Saint-Jean-sur-Richelieu pour une période donnée. Le modèle est alimenté par des apports nets du bassin, par un débit unique pour chaque pas de temps tenant compte des précipitations et par les données d'évaporation à la surface du lac, ainsi que par des apports dus au ruissellement et par des apports de tributaires. La série historique des apports d'eau quotidiens moyens dans le lac Champlain, fondée sur les données historiques de débit et de niveau, est le principal intrant du modèle. Le modèle est fondé sur l'équilibre des variations de volume du lac et de débit sortant de la rivière Richelieu, ainsi que sur les apports durant la journée en cours. Le débit sortant du lac Champlain à chaque pas de temps est estimé à l'aide d'une relation niveau-débit (fonction qui définit le débit sortant en fonction du niveau du lac) et d'une estimation de la rugosité du chenal. Ces valeurs ont été tirées d'analyses effectuées à l'aide d'un modèle hydrodynamique bidimensionnel, tandis que la variation saisonnière du frottement dans le cours supérieur de la rivière provient de l'analyse de mesures historiques du niveau d'eau.

Le MBH du bassin LCRR a été calibré de façon à reproduire l'effet actuel de contrôle hydraulique (« goulot d'étranglement ») à Saint-Jean-sur-Richelieu sur le débit sortant du lac Champlain. Il s'agit de l'état « de référence » du chenal, qui reflète l'empiétement du canal de Chambly sur la rivière Richelieu (rétrécissement du chenal de la rivière après l'élargissement du canal). Le MBH permet de reproduire des niveaux d'eau historiques en des endroits-clés le long d'un cours d'eau ou d'un plan d'eau en fonction du débit entrant. Le MBH a ainsi

[13] Méthode LiDAR employée en cartographie

permis d'associer des paires de données altimétriques du lac et de la rivière à Saint-Jean-sur-Richelieu. Le système ISEE réalise une interpolation entre les différents scénarios hydrodynamiques, en fonction des niveaux et des débits produits par le MBH. Le débit sortant de la rivière Richelieu est fondé sur la relation niveau-débit présentée par Champoux et al. (2018) et par Gosselin et al. (2022). Le MBH a été calibré par le biais d'un processus itératif; les résultats et les observations historiques sont comparables (Boudreau et al., 2022).

Les modèles de l'étude donnent un aperçu de la dynamique de la crue printanière de 2011. La figure 12 (François et Brown, 2022) montre les conditions météorologiques, les débits et les niveaux d'eau pour la période des crues printanières et estivales. Ces données sont extraites d'un ensemble de données météorologiques distribuées sur une grille pouvant servir d'intrant à HYDROTEL (François et Brown, 2022). Le volet du haut indique les températures maximales et minimales (courbes en rouge et en bleu clair) ainsi que les chutes de neige et de pluie quotidiennes (barres en jaune et en bleu). Le volet du milieu montre la contribution au ruissellement de surface, la courbe orange représentant l'équivalent en eau de la neige (EEN) qui indique la quantité d'eau emmagasinée sous forme de neige dans le bassin versant, tandis que la courbe en bleu exprime la contribution de la pluie et de la fonte des neiges au ruissellement. On constatera que le pic de ruissellement est intervenu vers la mi-mars, malgré le peu de pluie à cette période, alors que les températures sont passées au-dessus du point de congélation et que l'EEN a diminué, transformant la neige en ruissellement. Le volet du bas montre les débits entrants et sortants du lac Champlain, ainsi que les niveaux d'eau du lac et de la rivière Richelieu à Saint-Jean-sur-Richelieu. La fonte des neiges a provoqué une crue modérée du lac à la mi-avril, avec une succession de pluies intenses en avril et en mai qui ont donné lieu à des apports et à des débits records dans la rivière.

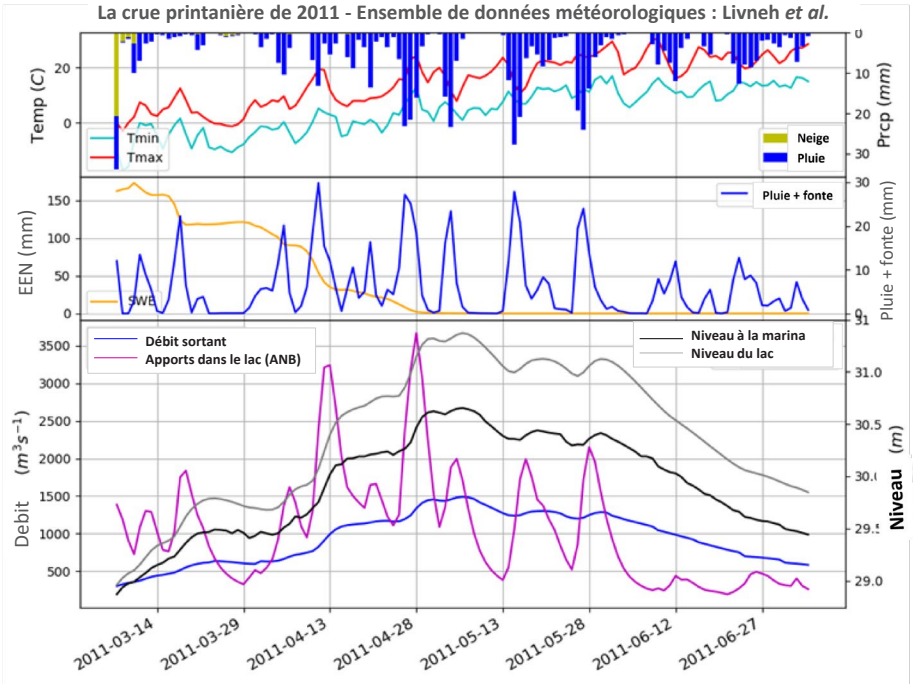


Figure 12. Illustration des facteurs qui ont contribué à l'inondation de 2011, à l'aide du modèle du bilan hydrologique (François et Brown, 2022).

Les courbes rouge et cyan correspondent respectivement aux températures maximales et minimales quotidiennes (ordonnée de gauche). Les barres jaunes et bleues indiquent les précipitations quotidiennes liquides (pluie) et solides (neige) (ordonnée de droite).

La courbe orange correspond à l'équivalent d'eau en neige (EEN), qui est la variable utilisée pour suivre l'accumulation de neige dans le bassin hydrographique. La courbe bleue illustre la contribution des précipitations et de la fonte des neiges au ruissellement.

Le volet du bas indique le débit entrant ou les apports nets du bassin (ANB, violet) du lac Champlain, le débit sortant du lac (bleu), le niveau du lac (gris) et le niveau d'eau à la marina de Saint-Jean-sur-Richelieu (noir).

Le MBH a d'abord été calibré pour le scénario de référence (représentant les conditions à l'époque de l'étude en l'absence de mesures d'atténuation ou d'impacts dus aux changements climatiques). La relation niveau-débit qui en a résulté a ensuite été modifiée pour simuler l'effet de différentes mesures d'atténuation des inondations de nature structurelle. Le haut-fond de Saint-Jean a un effet régulateur sur le niveau et le débit sortant du lac Champlain, et toute modification de ce haut-fond entraîne des changements dans ces variables. Donc, si l'on change la relation niveau-débit pour tenir compte d'une éventuelle modification de ce tronçon de la rivière à Saint-Jean-sur-Richelieu qui régule le débit, il devient possible d'évaluer les répercussions d'un tel changement sur le niveau d'eau pendant toute la période de référence.

3.2.5 Système intégré, social, économique et environnemental (ISEE)

Afin d'évaluer les coûts, les bénéfices et la faisabilité des différentes mesures d'atténuation des inondations, le Groupe d'étude sur le bassin LCRR a mis au point un puissant outil d'intégration permettant de quantifier les impacts des inondations, à savoir le Système intégré économique, social et environnemental (ISEE). Cette plateforme est en fait une base de données géoréférencée optimisée pour modéliser les zones aquatiques et riveraines. Elle permet de simuler les inondations et d'estimer les répercussions des variations de niveau d'eau sur des décennies. Les impacts peuvent être quantifiés à l'aide de divers indicateurs de performance (IP), qui décrivent les relations entre les variations de niveau et des déterminants sociétaux, économiques et environnementaux.

Le système ISEE a été conçu pour atteindre les objectifs suivants :

- Recréer les niveaux d'eau sur une année complète pour chaque année d'une période de référence (1925-2017) afin de quantifier la variabilité naturelle de référence du système, soit les inondations printanières et les faibles débits estivaux.
- Quantifier les effets des mesures d'atténuation d'un point de vue hydraulique tout au long de l'année, en mettant particulièrement l'accent sur l'atténuation des inondations et les variations en période de faible débit.
- Analyser l'ensemble de la zone d'étude en fonction d'IP et d'algorithmes semblables, si possible, ce qui s'entend de la rivière Richelieu et du lac Champlain, des deux côtés de la frontière canado-américaine.
- Intégrer des ensembles de données géospatiales à haute résolution sur un vaste territoire (jusqu'à 250 000 hectares), y compris le débit et la profondeur d'eau, la vitesse du courant, la pente, l'utilisation des terres et des renseignements détaillés comme les bâtiments et les cultures.
- Modéliser les avantages des mesures d'atténuation des inondations sur la vulnérabilité de la population et le risque social.
- Quantifier la réduction des effets économiques découlant des mesures d'atténuation des inondations à l'aide d'indicateurs de performance des dommages structurels et des pertes de revenu pour les secteurs résidentiels, commerciaux, industriels, récréatifs, agricoles et gouvernementaux.
- Modéliser les bénéfices et les impacts sur le milieu naturel attribuables aux changements de niveaux d'eau associés aux mesures d'atténuation des inondations, cela à l'aide d'IP sélectionnés pour représenter les milieux humides et les habitats du poisson et de la faune, notamment pour ce qui est des espèces-clés et en voie de disparition.
- Évaluer les effets des mesures potentielles d'atténuation des inondations sur les communautés autochtones à l'aide d'indicateurs d'importance culturelle.

Le système ISEE permet d'appliquer de nombreuses strates d'informations (intrants) sur une même grille (de 10 m sur 10). L'ensemble de ces informations décrit le régime hydraulique, l'utilisation des terres, les infrastructures, les variables socioéconomiques et le milieu naturel, en particulier la répartition des milieux humides (figure 13). Par conséquent, toutes les variables physiques pertinentes, comme la profondeur, la vitesse du courant et le débit d'eau, sont disponibles à chaque point de la grille ISEE. Toutes ces variables peuvent être utilisées pour créer des IP simples, comme des courbes de dommages ou des modèles plus complexes sur différentes périodes.

Le modèle ISEE a permis de calculer un niveau d'eau pour chaque propriété à partir des données altimétriques de la surface de l'eau à chacun des nœuds de la grille. Ce niveau a ensuite servi de base aux diverses fonctions des indicateurs de performance. Le principal exemple est l'indicateur performance « niveau-dommage ». Pour chaque bien matériel, les dommages commencent à un certain niveau d'eau (valeur altimétrique), puis augmentent selon une relation profondeur-dommage propre à chaque bien.

Les IP qui expriment les impacts potentiels des mesures d'atténuation des inondations ont ensuite été calculés pour évaluer toute une combinaison de mesures en regard des quatre thèmes. Les valeurs des IP pour chaque scénario (extrants) ont ensuite été comparées à un scénario de référence représentant les conditions de gestion actuelles.

La figure 14 présente un exemple de visualisation du niveau d'eau du système ISEE illustrant l'inondation de bâtiments riverains.

Les extrants du modèle ISEE ont servi à estimer les ratios bénéfices-coûts pour différentes mesures d'atténuation au moyen de deux méthodes distinctes. D'une part, les données ont été intégrées et analysées dans l'Outil collaboratif d'aide à la décision (OCAD) décrit ci-dessous. D'autre part, une autre méthode (Bouchard St-Amant et Dumais, 2022) a consisté à incorporer un générateur de niveau et de débit d'eau utilisant les niveaux d'eau de la série 1924-2017 produite par le système ISEE pour chaque bâtiment de la grille afin de générer un ensemble synthétique de niveaux d'eau, beaucoup plus étendu. Le but visé était de fournir une gamme plus large de niveaux d'eau que le système ISEE pour représenter la distribution à long terme des niveaux élevés et des niveaux bas. Les deux méthodes intégraient les résultats du système ISEE relativement aux indicateurs de performance.

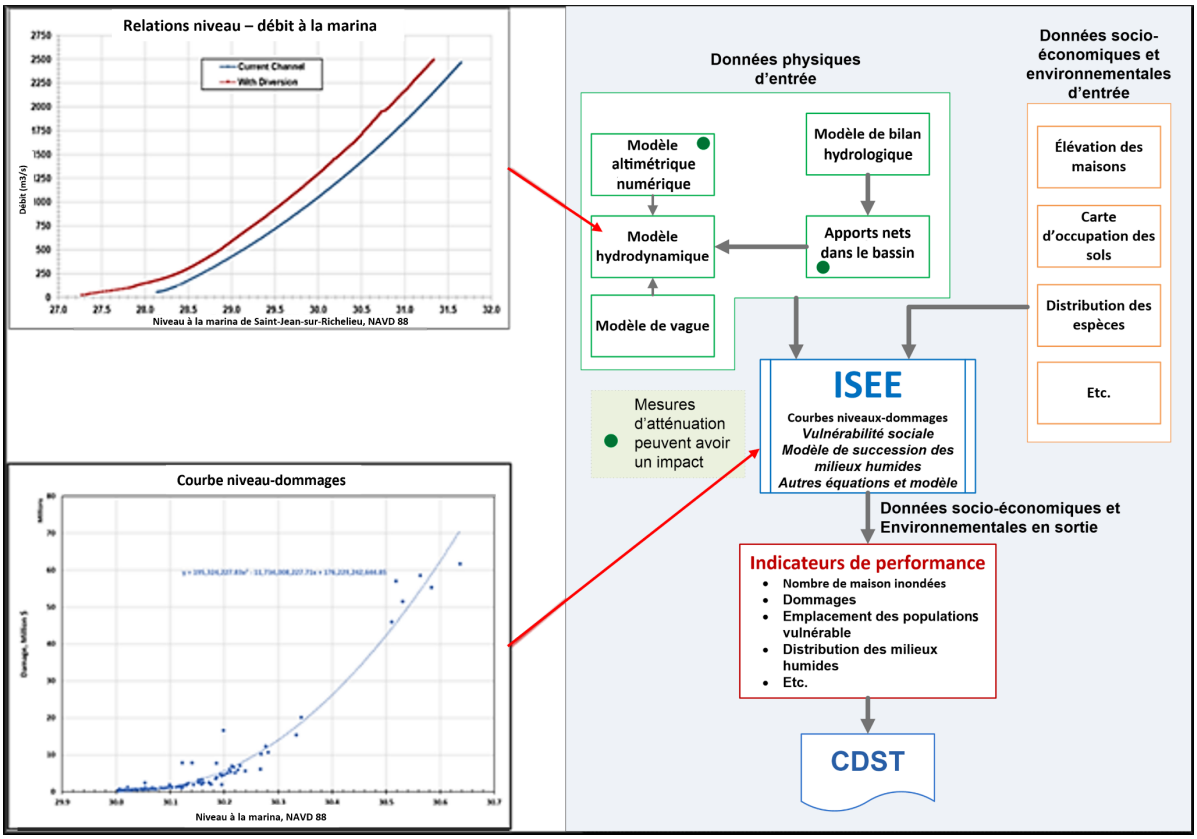


Figure 13. Cadre du système intégré social, économique et environnemental (ISEE) (MGAI et HHC, 2022).

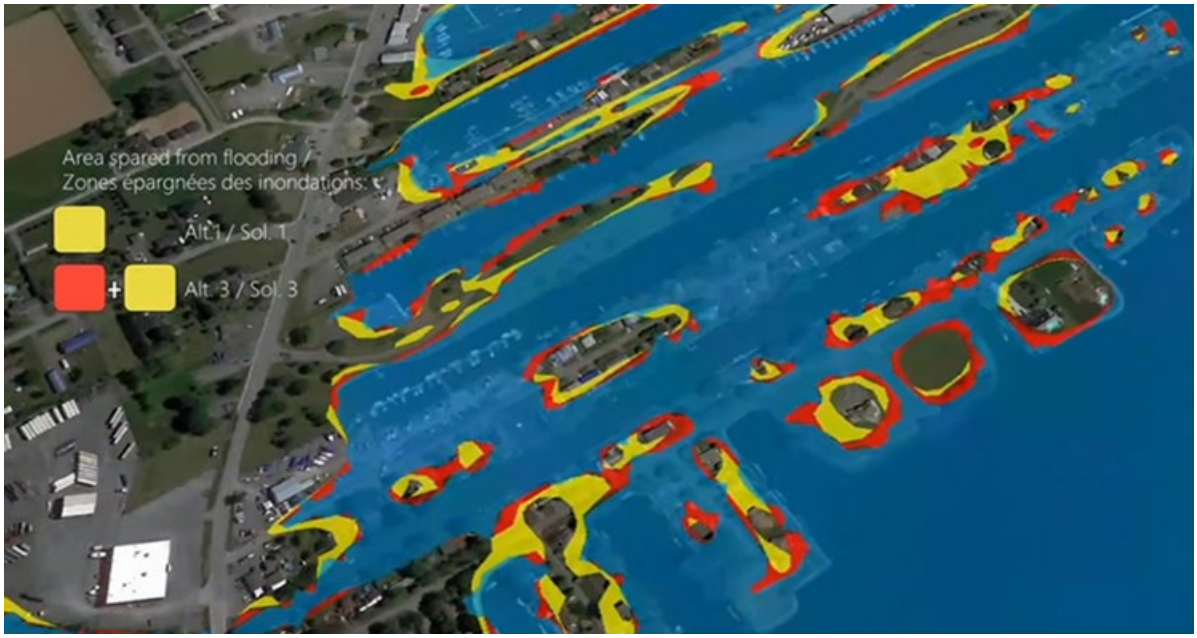


Figure 14. Exemple de visualisation d'une inondation selon le système ISEE en fonction de différentes mesures d'atténuation possibles (indiquées en rouge et en jaune).

3.2.6 Modèle intégré de résilience aux inondations

Le modèle intégré de résilience aux inondations (MIRI) a été élaboré pour comparer deux façons d'atténuer les dommages financiers que les propriétaires peuvent subir à cause d'inondations : 1) par le biais d'un programme d'aide en cas de catastrophe semblable à celui offert au Québec et 2) grâce à un programme d'assurance inondation à trois niveaux. Le modèle d'assurance a calculé les dommages estimés au fil du temps pour le gouvernement, pour les propriétaires fonciers et pour les fournisseurs d'assurance dans le cadre d'un éventail de futurs scénarios possibles d'inondation. Le modèle a été alimenté par les données provenant de tableaux d'analyse fréquentielle des dommages dérivés du modèle ISEE, mais seulement pour le cours supérieur de la rivière Richelieu en tant que preuve de concept. Les paiements maximums devant être effectués par chacune des trois parties (gouvernement, propriétaires fonciers et assureurs) pourraient être modifiés afin d'analyser l'impact sur les primes d'assurance inondation, après quoi la répartition des coûts pourrait être déterminée.

L'assurance ne peut être une méthode efficace de réduction du risque financier si les gens ne souscrivent pas aux polices proposées parce qu'ils jugent les primes prohibitives. C'est pour cette raison qu'il a été prévu d'accorder une réduction de prime aux propriétaires à faible revenu, selon certaines règles, le gouvernement versant la différence aux compagnies d'assurance. Le modèle calcule les primes d'assurance estimées pour des milliers de propriétés individuelles ainsi qu'un ratio bénéfices-coûts pour la protection de chaque maison contre les inondations, ce qui permet d'évaluer quelles constructions seraient protégées le plus efficacement contre les inondations.

Est également intégré dans l'équation, un deuxième ensemble de tableaux de fréquence des dommages représentant le profil de risque dans le Haut-Richelieu après la construction d'une structure d'atténuation, ce qui permet aux usagers du modèle de combiner la mesure structurelle appliquée avec les mesures de protection contre les inondations et les dispositions de réinstallation de sorte à en arriver à une solution reposant sur plusieurs thèmes. Le modèle permet de calculer les interactions dynamiques des coûts et des risques du programme, notamment pour ce qui est des réductions de coûts offertes par le programme gouvernemental et destinées à rendre l'assurance abordable. Le modèle donne ainsi la possibilité unique d'analyser les interactions entre les mesures proposées suivant les différents thèmes de l'étude.

Les évaluations des mesures d'atténuation possibles comprennent l'utilisation d'indicateurs de performance (IP) et de ratios bénéfices-coûts qui sont décrits ci-dessous. Les analyses ISEE ont permis de dresser des cartes de zones inondables, de produire des données sur les dommages causés par les inondations et d'attribuer une valeur aux autres indicateurs de performance ayant servi à la fois à évaluer les répercussions potentielles des mesures d'atténuation et à élaborer des ratios bénéfices-coûts (figure 15).

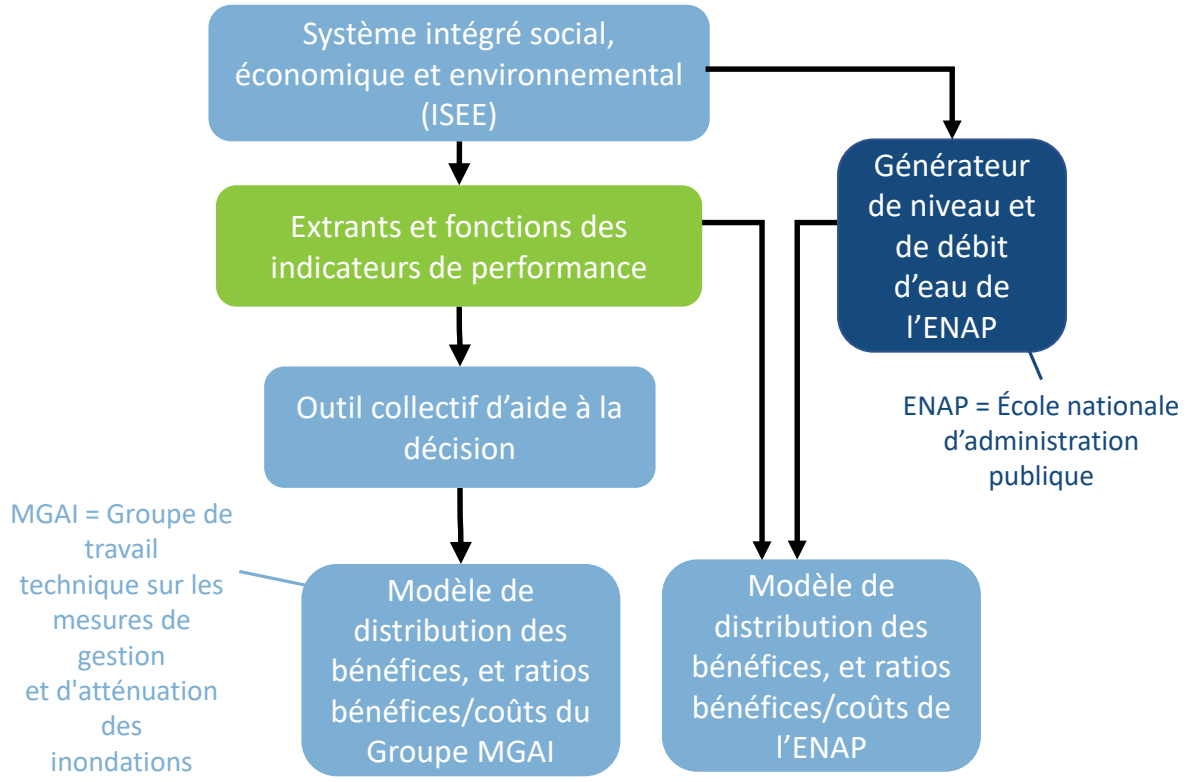


Figure 15. Application du système ISEE à l'évaluation des indicateurs de performance et des ratios bénéfices-coûts.

Les boîtes en bleu foncé représentent les intrants du modèle, les boîtes en bleu clair représentent les modèles ou les outils, et les boîtes en vert clair représentent les extrants du modèle intermédiaire. Les flèches illustrent le sens du flux de données ou des extrants dans le réseau. L'épaisseur ou la longueur des flèches ne sont pas indicatives de l'ampleur relative des données ou des résultats d'une boîte à l'autre.

3.2.7 Indicateurs de performance

Les indicateurs de performance (IP) sont des mesures quantitatives qui ont été élaborées pour refléter la façon dont la société, l'économie et l'environnement sont touchés par les inondations au regard de différentes mesures d'atténuation. Les IP ont été élaborés en collaboration avec plus de 40 experts de divers domaines, comme pour la quantification des dommages causés par les inondations, la vulnérabilité sociale, l'économie, l'écologie et les communautés autochtones. Les IP ont été choisis de manière à englober les répercussions prévues de divers types de mesures d'atténuation et à permettre la comparaison de ces mesures.

Objectifs des critères de sélection :

- être sensibles aux fluctuations des niveaux d'eau,
- être représentatifs des espèces sensibles,
- englober le lac, la rivières et les plaines inondables au Canada et aux États-Unis,
- inclure toutes les saisons et toutes les conditions de débit correspondantes à ces saisons (faibles débits, crues printanières, etc.),
- permettre que les données soient disponibles pour le calibrage et la validation.

Les **indicateurs économiques** permettent de comparer les coûts de mise en œuvre des mesures d'atténuation avec les bénéfices économiques de ces mesures. Voici les indicateurs économiques utilisés dans l'étude :

- Dommages structurels résidentiels
- Dommages matériels résidentiels
- Frais d'hébergement temporaire
- Coûts des opérations de nettoyage
- Dommages structuraux commerciaux, industriels et récréatifs
- Dommages matériels commerciaux, industriels et récréatifs
- Perte de revenus commerciaux
- Perte de revenus pour le secteur récréo-touristique
- Perte de rendement agricole
- Dommages aux bâtiments agricoles
- Perte de rendement agricole
- Dommages structurels aux bâtiments publics
- Dommages matériels aux bâtiments publics

Ensemble, ces IP visent à couvrir la majorité des impacts économiques attribuables à des inondations. Les dommages ont été modélisés pour chaque année d'une période de référence historique s'étendant de 1925 à 2017, en fonction des valeurs du parc immobilier et des bâtiments de 2018. Il était question de décrire et de quantifier les conditions pour l'ensemble du régime hydrologique, ce qui s'entend des crues passées bien connues. Les processus de validation et d'étalonnage ont été réalisés par ajustement des paramètres du modèle afin de maximiser la concordance avec les ensembles de données d'observation. Dans la mesure du possible, et pour faire en sorte que le modèle soit le plus exact possible, le calibrage a été effectué à l'aide de données empiriques locales (Roy et al., 2022). En ce qui concerne les dommages structuraux, les données sur la valeur des propriétés, l'élévation des maisons et d'autres caractéristiques des maisons ont été utilisées pour estimer le coût des dommages aux bâtiments en fonction du niveau d'eau de crue. L'IP « perte de revenu » a servi à évaluer, par exemple, les pertes de rendement agricole par superposition des cartes des zones inondables sur des cartes des cultures afin de délimiter les parcelles en culture qui seraient inondées. Les dommages économiques peuvent ensuite être estimés en fonction de la superficie inondée, de la valeur commerciale des cultures et du rendement annuel. Les dommages moyens annuels et les dommages évités lors de crues mineures, de crues modérées ou de crues majeures permettent d'évaluer les avantages potentiels des mesures d'atténuation dans un large éventail de conditions hydrologiques. Les cartes montrant la répartition spatiale des dommages dans le bassin LCRR permettent de visualiser là où se produiraient les dommages et là où ils seraient évités.

Les **indicateurs environnementaux** représentent les effets potentiels de tout changement du régime hydrologique sur le milieu naturel, notamment sur les espèces particulièrement préoccupantes, sur les habitats et les zones critiques comme les milieux humides. Les IP environnementaux ont été sélectionnés d'après des informations extraites de la littérature scientifique, des savoirs autochtones, des données de terrain et des connaissances spécialisées. Ils ont été choisis pour évaluer l'impact des variations du régime hydrologique sur des composantes particulières de l'écosystème (Roy et al., 2022). Une liste initiale des IP potentiels a été dressée et peaufinée par les chercheurs de l'étude et les experts du domaine, à partir des critères de sélection décidés par le Groupe d'étude pour éclairer l'évaluation des mesures d'atténuation. Parmi ces critères de sélection, mentionnons : la sensibilité aux fluctuations des niveaux d'eau; la pertinence écologique; la situation des espèces menacées ou endémiques et la considération du cycle de vie des organismes (Roy et al., 2022). Les indicateurs de performance environnementaux ont

été expressément conçus pour évaluer les mesures d'atténuation au regard des impacts de la modification du régime hydrologique et ne tiennent pas nécessairement compte de toutes les répercussions environnementales potentielles. Voici les indicateurs environnementaux qui ont été sélectionnés pour l'étude :

- Viabilité de l'habitat hivernal du rat musqué
- Survie des œufs de tortue-molle à épine
- Superficie des classes de milieux humides
- Potentiel reproductif du petit blongios
- Habitat de halte migratoire de la sauvagine pendant la migration printanière
- Habitat propice au frai et aux premiers stades de développement larvaire du chevalier cuivré
- Aire de frai du grand brochet et probabilité de survie de ses œufs et larves.

Les espèces sélectionnées sont importantes pour l'écosystème et l'économie. Par exemple, le chevalier cuivré est une espèce que l'on retrouve seulement dans quelques rivières du Québec et qui fraie dans les eaux vives de la rivière Richelieu. Il est considéré comme une espèce en voie de disparition au Canada et une espèce menacée au Québec. Le grand brochet, prisé par les pêcheurs sportifs, est considéré comme une « espèce parapluie », ce qui veut dire que son habitat de frai est semblable à celui de nombreuses autres espèces de poissons. La tortue-molle à épines est une espèce en danger au Canada et menacée au Québec et au Vermont. Le petit blongios est désigné espèce vulnérable au Québec, menacée au Canada et dans l'État de New York et préoccupante au Vermont. Il convient de souligner que l'objet de ces IP est de permettre la comparaison des impacts potentiels des différentes mesures d'atténuation; toutefois, l'évaluation de ces IP ne constitue pas une évaluation des impacts environnementaux incorporant tous les impacts dus à la mise en œuvre de chaque mesure. Cette liste d'IP n'est pas exhaustive, mais il faut savoir que les indicateurs sélectionnés répondaient aux critères décrits ci-dessus, notamment en matière de sensibilité aux fluctuations du niveau d'eau. Les mesures potentielles d'atténuation des inondations peuvent avoir une incidence sur la qualité de l'eau, mais les relations entre le niveau et la qualité de l'eau ne sont pas bien documentées en fonction de l'échelle évaluée pour cette étude. Les espèces sélectionnées fournissent une base pour l'évaluation des effets potentiels des mesures d'atténuation; une évaluation environnementale plus complète serait toutefois entreprise avant la mise en œuvre d'une mesure d'atténuation de nature structurelle.

Les **indicateurs de performance en lien avec les intérêts autochtones** reflètent les composantes valorisées de l'environnement pour les collectivités autochtones. Voici quels IP en lien avec les intérêts autochtones ont été choisis pour l'étude en collaboration avec les communautés :

- Survie du riz sauvage entre la germination et la flottaison
- Habitat du frêne noir et collecte de son bois pour la vannerie
- Vulnérabilité des sites archéologiques

Le riz sauvage est une plante annuelle aquatique sauvage qui constitue un aliment de base de grande valeur culturelle pour les peuples autochtones. Bien que son importance culturelle ait été le principal facteur dans la sélection du riz sauvage en tant qu'IP, celui-ci offre des avantages écologiques secondaires, comme un habitat de nidification du canard et d'élevage de ses canardeaux, des aires d'alevinage pour les poissons et les amphibiens, et une source de nourriture pour les herbivores (Roy et al., 2022). Le frêne noir est un feuillu qu'on rencontre fréquemment dans les milieux humides et qui a une importance écologique, ethnobotanique et culturelle, puisqu'il est notamment au cœur de l'identité et de la culture des nations W8banaki et Kanien'kehà:ka (Mohawk). Les peuples autochtones du Canada et des

États-Unis utilisent son bois depuis des siècles pour fabriquer des produits de vannerie et autres (Roy et al., 2022). Les sites archéologiques représentent des zones d'importance culturelle ou spirituelle[14] qui sont menacés par l'anthropisation, l'industrialisation des berges, et qui peuvent être dégradés par les phénomènes d'érosion. Au nombre des IP sélectionnés se trouvent des caractéristiques culturelles et ethnobotaniques qui doivent être prises en compte pour appuyer l'exercice des droits autochtones tant pour les générations actuelles que futures.

En plus des trois indicateurs énumérés ci-dessus, d'autres IP environnementaux sont importants pour les Autochtones du bassin. Il s'agit notamment des milieux humides, de l'habitat de frai du grand brochet, de l'habitat de frai du chevalier cuivré, de l'habitat de migration de la sauvagine et de la zone de survie hivernale du rat musqué (Roy et al., 2022).

Les indicateurs sociaux[15] visent à décrire la vulnérabilité de la population aux inondations. La vulnérabilité ne se limite pas à l'exposition aux inondations, mais dépend aussi des caractéristiques de la population, des ressources disponibles et des infrastructures dont elle dispose. Les facteurs pris en compte comprennent les populations vulnérables, comme les personnes âgées ou à faible revenu; la capacité d'adaptation; l'emplacement des logements, des infrastructures et des services essentiels, et l'accessibilité, y compris la question de savoir si les routes deviennent impraticables ou si les logements deviennent inaccessibles aux premiers intervenants en cas d'inondation. Le risque social s'entend de l'aléa d'inondation, qui est la probabilité qu'une inondation se produise à un endroit donné (dans le volet de gauche de la figure 16, les zones en rouge sont susceptibles d'être inondées) et de la vulnérabilité totale, compte tenu des divers facteurs décrits ci-dessus (volet du centre de la figure 16 : plus la couleur rouge est foncée, plus la vulnérabilité est élevée). La combinaison de ces deux cartes donne la carte des risques d'inondation (volet droit de la figure 16; les zones rouges indiquent les endroits où les populations vulnérables sont les plus susceptibles de subir des inondations).

Les IP sélectionnés ont fourni un cadre d'évaluation des avantages et des inconvénients associés aux diverses mesures d'atténuation des inondations envisagées par le Groupe d'étude.

Figure 16. Fréquence des crues (à gauche), vulnérabilité totale (au centre) et niveau de risque (à droite) dans la vallée du Richelieu; selon le modèle ISEE (Thomas et Gagnon, 2020).

[14] En plus de ces trois IP, il avait été envisagé d'ajouter le foin d'odeur comme quatrième indicateur. Le foin d'odeur est une ressource sacrée pour la Nation W8banaki. Toutefois, en raison de l'absence de données sur l'emplacement des espèces dans la zone d'étude et du manque d'information permettant d'établir un lien direct entre les niveaux d'eau et la qualité des zones de croissance du foin d'odeur, aucun indicateur de performance n'a été élaboré pour le foin d'odeur (Roy et al., 2022).

[15] Le Groupe d'étude a inclus des considérations sociales dans ses évaluations, mais au moment de la rédaction du présent rapport, les aspects sociaux n'avaient pas été formellement évalués de façon quantitative à l'aide des IP.

3.2.8 Outil collaboratif d'aide à la décision

Le Groupe d'étude a élaboré un outil collaboratif d'aide à la décision (OCAD) pour l'appuyer dans sa prise de décisions, particulièrement en ce qui a trait aux mesures d'atténuation structurelles (thème 1). L'OCAD est un tableur Excel qui rassemble et traite l'information produite par le système ISEE. Au cours de l'étude, l'OCAD est passé d'un modèle de bilan hydrologique et d'un outil de visualisation servant à évaluer les tendances en matière de niveaux d'eau à un outil de prévision des niveaux et des dommages utile aux premiers intervenants. L'OCAD est essentiellement une « fenêtre » sur le système ISEE qui permet de saisir et de présenter les extrants ISEE de manière qu'il soit plus facile pour le Groupe d'étude de visualiser les extrants et de les utiliser pour formuler ses constatations et recommandations.

Les données d'extrant types du système ISEE étaient constituées de plusieurs centaines de milliers d'unités. L'OCAD a révélé les aspects significatifs de ces données en réponse aux questions du Groupe d'étude. Par exemple, l'OCAD a évalué si certaines mesures structurelles augmenteraient le niveau du lac Champlain dans les années de sécheresse et pendant quelles parties de l'année de telles augmentations se produiraient. L'OCAD a tenu compte de la réduction des dommages structuraux causés par les inondations selon le système ISEE et a montré, par exemple, combien de propriétés au Canada et aux États-Unis ne seraient pas endommagées si l'inondation de 2011 se reproduisait. On constate une congruence entre ces simulations et les dommages réels. Selon les simulations du CDST, 3 839 résidences auraient été endommagées dans les conditions de 2011; le nombre réel signalé étant d'environ 4 000 maisons au Canada et aux États-Unis combinés (PBLC, 2013).

3.2.9 Analyses bénéfices-coûts

Pour le Groupe d'étude, l'un des principaux éléments à prendre en considération est la viabilité économique des mesures potentielles d'atténuation des inondations. Dans ce rapport, le Groupe d'étude a adopté les principes standard de l'analyse bénéfices-coûts (B-C) pour évaluer la viabilité économique des mesures envisagées. Les résultats de l'analyse B-C dépendent des coûts de l'infrastructure, de l'évaluation des dommages, de la période considérée, de la probabilité que se produisent des épisodes de crue par rapport à la période de retour établie et des taux d'intérêt considérés. Les ratios bénéfices-coûts des mesures d'atténuation structurelles ont été calculés en divisant la valeur actuelle des bénéfices annuels attendus de chaque mesure par la valeur actuelle correspondante des coûts totaux annualisés prévus. Si les bénéfices nets attendus étaient supérieurs aux coûts, le rapport B-C était supérieur à un, soit au seuil d'évaluation de l'efficacité d'une solution structurelle proposée.

Deux ratios B-C ont été élaborés. Le premier à partir des niveaux d'eau de 1925 à 2017, produits par le système ISEE, en vue de générer un ensemble de niveaux d'eau synthétiques et de fournir une gamme plus large de niveaux d'eau représentant la distribution à long terme des niveaux hauts et bas (Bouchard St-Amant et Dumais, 2022). Le deuxième ratio B-C a été élaboré à l'aide de l'OCAD (Moin et al., 2022). L'OCAD a produit un ratio B-C interne fondé sur un échantillon des dommages historiques attribuables aux inondations générées par le système ISEE. Les deux approches fournissent des informations utiles sur les ratios bénéfices-coûts. Toutefois, il peut être approprié, avant la mise en œuvre de mesures structurelles particulières destinées à réduire le risque d'inondation dans le bassin LCRR, de procéder à une étude supplémentaire des approches bénéfices-coûts et de discuter des hypothèses sous-jacentes.

3.2.10 Critères de décision

Pour évaluer les mesures structurelles potentielles d'atténuation et de gestion des inondations, le Groupe d'étude a défini un ensemble de critères de décision (tableau 2). Ces critères visaient à comparer les diverses mesures possibles et à évaluer le risque que ces mesures aient des impacts majeurs, cela afin d'aider le Groupe d'étude à formuler des recommandations. (Il convient de noter que les évaluations exhaustives de l'impact des recommandations dépassent la portée de la présente étude et qu'il faudra procéder à d'autres évaluations avant de mettre en œuvre les mesures recommandées.)

Les critères de décision de l'étude ont évolué au fil du temps en réponse aux commentaires des parties prenantes. Le fait de tenir compte de la façon dont les parties prenantes établissent l'ordre de priorité des critères décisionnels donne une idée de ce à quoi elles accordent de la valeur. La compréhension de ces valeurs aux yeux des parties prenantes se répercute sur les recommandations formulées en matière de mesures d'atténuation parce qu'elle permet d'envisager ce qui est susceptible ou peu susceptible d'être appuyé.

Les chercheurs ont mené des enquêtes auprès des ménages sur la perception des risques, ils ont effectué des analyses des réseaux sociaux et mené des sondages auprès des intervenants d'urgence afin d'évaluer les priorités des parties prenantes (SPE, 2022). Dans l'ensemble, une certaine cohérence est ressortie dans les priorités mentionnées au Québec et dans les États de New York et du Vermont, la santé et la sécurité humaines (dont celle des résidents vulnérables), se posant en priorités absolues pour la plupart des parties prenantes. En général la protection de l'environnement et la prévention des dommages structurels se sont retrouvées parmi les priorités de niveau intermédiaire. Une priorité moindre a généralement été accordée à la prévention des dommages économiques, à la protection des sites historiques et culturels et à la réduction des répercussions découlant de la fermeture de rues (SPE, 2022).

Les critères de décision présentés au tableau 2 ont guidé le Groupe d'étude dans l'évaluation des mesures d'atténuation des inondations structurelles éventuelles décrites plus loin dans le présent rapport et dans l'élaboration de ses recommandations. En règle générale, le Groupe d'étude a examiné ces critères de façon séquentielle en commençant, par exemple, par déterminer si une mesure d'atténuation potentielle correspondait à la portée et au mandat de l'étude. Dans la négative, elle était retirée de l'examen et il devenait inutile d'évaluer les autres critères.

Tableau 2. Critères de décision du Groupe d'étude.

#	Critère pour la mesure	Contexte	Évaluation
1	**Dans les limites de la portée et du mandat de l'étude**	Une étude internationale a porté sur des solutions qui réduisent les dommages causés par les inondations aux abords du lac Champlain et de la rivière Richelieu dans une perspective transfrontalière, et non sur des problèmes d'inondation locaux.	D'après le renvoi des gouvernements et la directive de la CMI et les conseils continus à l'étude, qui stipulaient que seules des solutions structurelles modérées et non structurelles seraient étudiées.
2	**Techniquement viable**	La mesure repose sur des principes d'ingénierie éprouvés et elle est efficace pour réduire les dommages causés par les inondations.	D'après l'évaluation technique et scientifique et les commentaires des experts de l'étude, y compris les estimations de la réduction du niveau d'inondation.
3	**Économiquement viable**	Les bénéfices sont supérieurs aux coûts.	Fondé sur l'application de saines pratiques d'évaluation économique.
4	**Équitable et juste**	Les responsables de la mise en œuvre peuvent financer les travaux requis, sans que les coûts soient potentiellement prohibitifs.	D'après les analyses bénéfices-coûts réalisées dans le cadre de l'étude.
5	**Respectueux de l'environnement**	Durable - ne nécessitera pas de subvention pour son exploitation continue.	Fondé sur l'application des principes établis par le Groupe d'étude.
6	**Résilience aux changements climatiques**	La solution profite largement à la société et pas seulement à un groupe ou à un secteur d'intérêt particulier (p. ex., secteur urbain ou secteur rural).	D'après l'évaluation des effets sur certaines espèces et certains habitats indicateurs.
7	**Réalisable**	N'entraîne pas le transfert d'effets négatifs disproportionnés vers un autre secteur d'intérêt.	Fondé sur l'approche ascendante dite « Decision Scaling » qui est au cœur du Cadre d'orientation sur les changements climatiques de la CMI.

3.3 STRATÉGIE RELATIVE AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Le Groupe d'étude a été chargé d'examiner l'impact des changements climatiques sur les inondations futures dans le bassin. Afin de satisfaire à cette exigence, le Groupe d'étude a adopté le Cadre d'orientation sur les changements climatiques (cadre de la CMI)[16] qui prévoit l'utilisation d'un large éventail d'approches pour déterminer l'origine des apports d'eau potentiels dans l'avenir. Une question déterminante pour le Groupe d'étude a été de savoir comment se préparer aux inondations qui se produiront le long des rives du lac Champlain et de la rivière Richelieu. La stratégie adoptée par l'étude a été conçue pour appuyer la meilleure réponse possible à cette question malgré l'incertitude irréductible des estimations de la gravité et du risque d'inondations dans l'avenir.

Le Groupe d'étude s'est appuyé sur les approches récemment examinées par des pairs afin de tenir compte, dans les décisions concernant les mesures d'atténuation proposées, de ce que l'on sait des inondations du futur. Les scientifiques savent que les changements climatiques amplifieront les phénomènes météorologiques extrêmes, mais les effets sur les périodes de crue et d'étiage sont incertains. Des températures plus élevées peuvent réduire les chutes de neige et accroître l'évapotranspiration dans le bassin versant et pourraient, à l'avenir, entraîner une baisse des niveaux d'eau en été. Toutefois, l'augmentation des précipitations au printemps pourrait accroître le risque d'inondation, mais la diminution des accumulations de neige en raison de la température plus élevée en hiver pourrait avoir l'effet contraire. Cependant, l'augmentation de la pluviométrie en hiver pourrait exacerber les inondations. Si les inondations futures sont d'ampleur nettement plus grande que les inondations historiques, les zones aménagées à l'extérieur de la plaine inondable réglementaire actuelle (délimitée par les conditions hydrologiques existantes) seront inondées. Par ailleurs, si les changements climatiques réduisent l'ampleur des crues printanières, les mesures de nature structurelle destinées à réduire les niveaux d'eau pourraient ne pas être un investissement souhaitable. Les mesures structurelles proposées dans le cadre de cette étude ont été évaluées selon des apports d'eau futurs plausibles de sorte à en déterminer la robustesse. Compte tenu des progrès de la climatologie et de l'évolution du climat, ces évaluations devraient continuer d'être menées à l'avenir.

Afin de dégager une perspective générale sur les futurs apports d'eau dans la perspective des changements climatiques, une méthode dite « Decision Scaling » (approche ascendante) a été adoptée. Elle consiste à perturber le système en le soumettant à des « stress-tests climatiques » pour voir comment il réagirait à une hydrologie de plus en plus extrême, puis à tenir compte globalement de l'hydrologie plausible, de l'ampleur des impacts et des stratégies d'atténuation comme point de départ de la planification. Ici, le mot « plausible » signifie qu'il existe des preuves que des inondations d'une certaine ampleur pourraient se produire. Les ingénieurs testent les structures en procédant de la même façon, soit en déterminant les charges qui causent une défaillance, puis en évaluant si les mêmes charges s'exerceront sur la structure en exploitation. L'utilisation par le Groupe d'étude de l'approche ascendante (Decision Scaling) améliore la confiance à l'égard de ses recommandations malgré l'incertitude des prévisions concernant les inondations.

[16] Cadre d'orientation sur les changements climatiques | Commission mixte internationale (https://ijc.org/fr/quoi/climat/cadre); l'objectif du cadre est de fournir une orientation aux divers conseils de la CMI dans la lutte contre les changements climatiques grâce aux meilleures données scientifiques institutionnelles et organisationnelles disponibles et aux commentaires des parties prenantes.

Une première approche, présentée à la figure 17, a reposé sur l'emploi de séries chronologiques météorologiques historiques qui, à l'aide d'un outil appelé générateur climatique/météorologique stochastique, ont permis de créer des scénarios stochastiques (déterminés au hasard) de précipitations et de températures. Ces scénarios ont ensuite été utilisés pour alimenter le modèle HYDROTEL qui simule les apports nets du bassin ou ANB dans le lac Champlain. Des séries temporelles de simulation des débits entrants ont été chargées dans le modèle de bilan hydrologique et dans le modèle hydraulique bidimensionnel qui simule les niveaux d'eau du lac Champlain et de la rivière à Saint-Jean-sur-Richelieu, ainsi que le débit sortant du lac et le débit de la rivière. Les résultats du modèle du bilan hydrologique ont été utilisés pour créer une série de scénarios de profil de la surface de l'eau, et le modèle hydraulique bidimensionnel a calculé les niveaux d'eau pour chaque pas de temps et chaque cellule dans le système ISEE. Les fonctions intégrées dans le système ISEE ont produit des estimations des impacts, y compris des dommages aux bâtiments inondés (Werick, 2022).

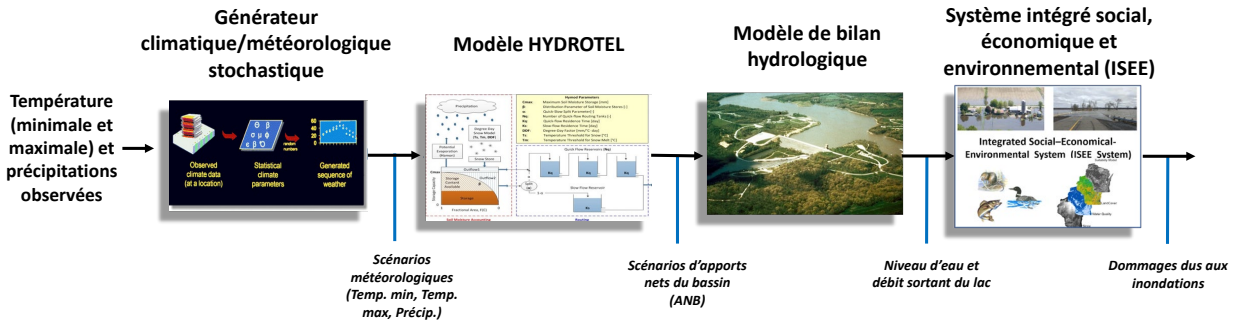


Figure 17. Combinaison de modèles utilisés pour évaluer la vulnérabilité du réseau LCRR au réchauffement des températures et à l'augmentation des précipitations (François et Brown, 2022).

En plus des entrées stochastiques présentées ci-dessus, le Groupe d'étude a évalué les impacts potentiels des changements climatiques par le biais d'une évaluation statistique des données climatiques historiques afin de déterminer la probabilité d'inondations futures. Un scénario de crue maximale probable (CMP) a également été élaboré selon une possibilité de forte accumulation de neige, de températures propices à une fonte rapide de la neige et d'épisodes de précipitations abondantes menant à des inondations encore plus importantes que celles de 2011. Des projetions de modèles climatiques globaux et régionaux ont également été appliquées pour générer des scénarios d'avenir possibles. Ensemble, ces quatre approches ont donné lieu à une évaluation rigoureuse des impacts des changements climatiques.

3.4 CONSIDÉRATIONS SOCIALES, POLITIQUES ET ÉCONOMIQUES

Le bassin LCRR est un système socio-écologique complexe et adaptatif où les aléas d'inondation découlent d'une combinaison de facteurs naturels et anthropiques. Les changements climatiques, les phénomènes météorologiques extrêmes et la composition naturelle des systèmes aquatiques et terrestres de la région sont influencés par un large éventail de comportements individuels et institutionnels sur lesquels ils agissent en retour. L'étude sur le bassin LCRR a analysé l'acceptabilité sociale et la faisabilité économique et politique des mesures d'atténuation des inondations proposées. Historiquement, ce sont des analyses techniques et économiques qui ont été utilisées pour recommander les mesures à adopter (Jordan et Turnpenny, 2015). Cependant, des études antérieures de la CMI ont démontré la nécessité d'analyser la désirabilité sociale des mesures avant de formuler des recommandations. Quatre questions d'orientation ont dressé le contexte des nombreuses études réalisées. Ces questions visaient à mieux cerner l'impact que les mesures et les recommandations potentielles d'atténuation des inondations pourraient avoir sur les collectivités, ainsi que la faisabilité politique et l'acceptabilité sociale de ces mesures. Les voici :

1. Quelle priorité les inondations représentent-elles pour les parties prenantes?
2. Suivant quel ordre de priorité les parties prenantes classent-elles les critères décisionnels?
3. Que savons-nous de la vulnérabilité sociale?
4. Quelles sont les réactions et les préférences des parties prenantes à l'égard des mesures d'atténuation selon chaque thème, et quels facteurs entravent ou favorisent la mise en œuvre des mesures proposées?

Chacune de ces questions a été traitée par le truchement d'une combinaison d'activités de recherche, d'approches analytiques et de collecte de données menées au Québec et dans les États de New York et du Vermont à la faveur de la présente étude (SPE, 2022). Voici les méthodes et les outils de collecte de données qui ont été utilisés pour répondre à ces questions : études économiques; analyses historiques; analyses médiatiques; groupes de discussion avec des parties prenantes; analyses de la vulnérabilité sociale; enquêtes auprès des ménages sur la perception des risques; analyse des médias sociaux; enquêtes auprès des intervenants d'urgence; analyse du plan d'atténuation des risques; rencontres avec les parties prenantes et les entités politiques, et ateliers d'experts. Le travail était multidisciplinaire. Une analyse statistique multicritères fondée sur des données quantitatives et qualitatives appuyant des résultats semblables a permis d'améliorer la validité et l'exactitude de cette démarche.

La constitution, dès le départ, d'une équipe chargée d'étudier les facteurs sociaux, politiques et économiques associés à l'atténuation des inondations a représenté une nouveauté pour les études de la CMI et cette approche sera riche d'enseignement pour de futures études.

3.5 COLLABORATION ET DIALOGUE AVEC LES PEUPLES AUTOCHTONES DU BASSIN

Pour les peuples autochtones, le bassin du lac Champlain et de la rivière Richelieu est, depuis toujours, une source de nourriture et d'eau, un moteur économique et le siège de pratiques spirituelles. La chasse, la cueillette, la pêche, la navigation de plaisance et les loisirs sont des activités importantes. Le bassin comporte des sites culturels et archéologiques (campements, villages, lieux de rencontre, lieux de sépulture) d'importance traditionnelle et sacrée pour les peuples autochtones. Le Groupe d'étude a communiqué avec des organisations autochtones ayant des intérêts dans le bassin afin de prendre note de leurs préoccupations au sujet des ressources et des pratiques culturelles touchées par des inondations, passées ou

actuelles. Les nouvelles connaissances recueillies à l'occasion de ce dialogue ont également été intégrées aux travaux sur les indicateurs de performance, ce qui a contribué à faire en sorte que les diverses mesures d'atténuation des inondations tiennent compte des répercussions potentielles sur les intérêts autochtones dans le bassin.

Dans le cadre de ses activités de communication-sensibilisation auprès des groupes autochtones du bassin, le Groupe d'étude a envoyé une lettre aux quatre tribus reconnues du Vermont et à la bande des Mohicans de la Stockbridge Munsee Community reconnue par le gouvernement fédéral pour les inviter à participer à l'étude. Le Groupe d'étude a été en mesure de communiquer régulièrement des mises à jour sur l'étude aux tribus du Vermont par l'entremise du chef de la bande Nulhegan de la Nation abénaquise de Coosuk.

L'étude a également fait appel au bureau de Ndakina du Grand Conseil de la Nation Waban-Aki (GCNWA) et au Conseil des Mohawks de Kahnawà:ke (CMK) pour produire un rapport décrivant leurs intérêts dans le bassin. Le rapport comporte deux parties. La première caractérise l'utilisation et l'occupation traditionnelle du territoire (UOT) de la zone d'étude par les W8banakiak et les Kanien'kehà:ka à des fins de subsistance, de revenus et d'activités spirituelles ou sociales. La deuxième partie évalue le potentiel archéologique, les sédiments archéologiques et la vulnérabilité des sites archéologiques aux répercussions des futures inondations, de l'érosion et des mesures de gestion des inondations.

Le GCNWA et le CMK ont utilisé les données d'UOT qu'ils avaient obtenues d'études antérieures et ont complété ce travail en réalisant des entrevues semi-dirigées spécifiquement destinées à recueillir des données propres au bassin à l'aide d'un protocole élaboré par le bureau du Ndakina. De plus, ils ont recueilli les points de vue des participants sur la gestion de la dynamique hydrologique de la rivière Richelieu. Les données résultant de ces entrevues et de l'examen des données antérieures dont disposait la réserve ont servi à déterminer la présence de lieux présentant un intérêt culturel, historique ou patrimonial pour les autochtones. Ceux-ci ont été inclus dans l'étude des domaines potentiels d'intérêt archéologique. Les aspects suscitant un intérêt, qui ont été recensés dans le rapport, ont par ailleurs été utilisés pour contribuer à élaborer l'ensemble des indicateurs de performance de l'étude, soit ceux des espèces prélevées dans la zone d'étude susceptibles d'être touchées par tout changement du régime hydrologique du réseau. Les trois indicateurs propres aux nations autochtones sont énumérés dans le tableau 3. De plus amples renseignements sur chacun de ces indicateurs de performance sont disponibles dans le rapport intitulé : Évaluations de mesures structurelles d'atténuation des inondations à l'aide d'indicateurs de performance (Roy, et al., 2022).

Tableau 3. Indicateurs de performance environnementaux (IP) présentant un intérêt pour les Nations W8banaki et Mohawk (à gauche) et IP d'importance particulière pour les Nations W8banaki et Mohawk (à droite).

Indicateurs de performance environnementale présentant un intérêt pour les groupes autochtones	Indicateurs de performance propres aux groupes autochtones
Milieu humide	**Habitat du frêne noir**
Habitat de frai du grand brochet	**Survie du riz sauvage**
Habitat de frai du chevalier cuivré	**Vulnérabilité des sites archéologiques**
Habitat de migration de la sauvagine	
Survie du rat musqué en hiver	

Les résultats de cette étude sont donnés dans le rapport du GCNWA (GCNWA, 2021). Les auteurs du rapport reconnaissent les limites et les distorsions de l'étude, en ce sens que l'absence de données sur les activités/intérêts déclarés dans certaines régions du bassin ne doit pas être interprétée comme un manque d'intérêt envers ces régions. L'information contenue dans le rapport ne doit pas non plus être extrapolée ou utilisée à d'autres fins que l'étude sur le bassin LCRR.

Le volet archéologique de l'étude du GCNWA et du CMK s'inscrit dans la continuité de la gestion et de la protection du patrimoine archéologique des W8banakiak et des Mohawks de la rivière Richelieu et du lac Champlain, en particulier de la baie Missisquoi. La recherche a permis de recenser des sites et des zones potentiellement vulnérables à l'érosion dans la zone d'étude et de comprendre la mécanique des différents sols composant les sites archéologiques.

Des recherches additionnelles ont été menées d'après les données archéologiques autochtones dans la partie américaine du bassin. L'étude a mobilisé les agences de préservation historique du Vermont (Vermont Division for Historic Preservation) et l'agence de préservation des parcs, des loisirs et des lieux historiques de l'État de New York (New York State Parks, Recreation and Historic Preservation Agency) pour obtenir des renseignements sur les zones d'intérêt archéologique dans la partie sud du bassin. L'information sur l'emplacement des sites étant confidentielle, elle ne peut être rendue publique, et le Groupe d'étude a dû conclure une entente avec les organismes concernés pour accéder aux données dans le seul et unique but de repérer les sites risquant d'être touchés par les inondations.

Pour cette composante de l'étude, les chercheurs se sont servi des données recueillies auprès d'organismes des États du Vermont et de New York sur des sites présentant un intérêt archéologique, qu'ils ont combinées aux données sur les sites archéologiques fournies par le GCNWA et le CMK avant d'y superposer une carte des zones inondées en 2011 (figure 18). Les données contenues dans ce rapport ont ensuite été communiquées aux fins d'examen aux nations autochtones qui avaient transmis des données au départ, ainsi qu'au chef de la bande Nulhegan de la Nation abénaquise de Coosuk. Sur les 330 sites cartographiés sur l'ensemble du bassin, 147 auraient été touchés par les inondations printanières de 2011.

Le Groupe d'étude apprécie énormément la contribution à l'étude du bureau Ndakina du GCNWA, ainsi que du CMK et du chef de la bande Nulhegan de la Nation abénaquise de Coosuk. Il est en outre important de reconnaître les différentes structures politiques et organisationnelles qui façonnent la collaboration avec les peuples autochtones des deux côtés de la frontière. Dans la partie canadienne du bassin, le Groupe d'étude a instauré une relation officielle avec les nations autochtones reconnues par le gouvernement fédéral, tandis qu'aux États-Unis, le Groupe d'étude a souvent fait appel à des citoyens ordinaires considérés comme des leaders de tribus reconnues par les États. Ne disposant pas des ressources administratives et financières d'une tribu reconnue par le gouvernement fédéral américain, les membres de ce dernier groupe n'ont pu participer que de façon limitée.

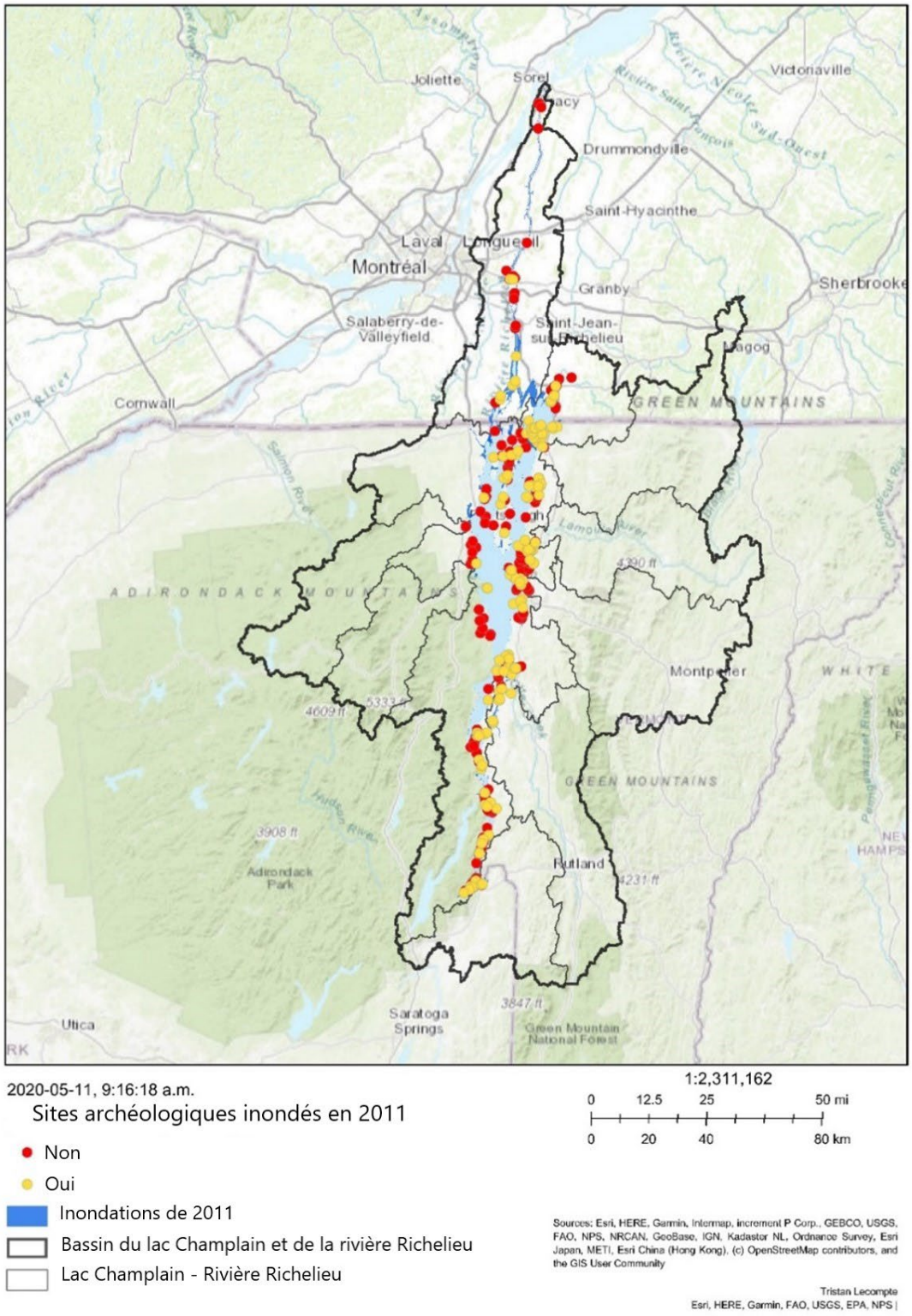


Figure 18. Sites archéologiques autochtones près des rives du lac et de la rivière, et impacts des inondations de 2011. Les sites inondés en 2011 sont en jaune (Lecompte, 2021).

S'agissant de l'examen des indicateurs de performance de cette étude, il est important de faire la distinction entre les activités alimentaires, rituelles et sociales des Premières Nations (Canada) et des Amérindiens (États-Unis) qui sont protégées par la Constitution, et les activités de pêche sportive et récréative, de chasse et de piégeage des populations non autochtone. Les activités autochtones traditionnelles revêtent également une valeur culturelle, émotionnelle et spirituelle et sont importantes pour le bien-être général des individus et des communautés. Au Canada, ces activités sont protégées par l'article 35 de la Charte canadienne des droits et libertés qui reconnaît et confirme les droits ancestraux ou issus de traités. De plus, les activités de pêche et de chasse communautaires contribuent à la sécurité et la souveraineté alimentaire des membres de la nation, en particulier des aînés et des familles dans des situations socioéconomiques précaires. Enfin, la majorité de ces activités sont familiales et intergénérationnelles. Elles remplissent un rôle important dans la transmission de la culture et dans la consolidation des liens intergénérationnels et sociocommunautaires.

3.6 POINTS DE VUE DU GROUPE CONSULTATIF PUBLIC ET DES PARTIES PRENANTES

La participation du public et des parties prenantes a été un élément essentiel et continu de l'étude sur le bassin LCRR qui a reposé à la fois sur la participation directe du Groupe d'étude (par exemple, par des réunions publiques ou des efforts de sensibilisation) et sur la collaboration avec un groupe consultatif public (GCP). Le GCP binational représentait divers secteurs d'intérêt et comprenait des représentants régionaux de l'ensemble du bassin du lac Champlain et de la rivière Richelieu. Ses membres ont mis à profit leurs connaissances, leurs réseaux, leurs contacts et leurs expériences pour conseiller le Groupe d'étude et encourager le public à participer à l'étude. Dès le début de l'étude, les travaux ont obéi à la conviction qu'il était nécessaire de combiner des données scientifiques crédibles de bonne qualité à la participation du public et des parties prenantes afin de favoriser une compréhension commune de la relation entre les communautés du bassin et leur environnement dans le contexte des inondations, cela pour en arriver à terme à adopter des mesures viables d'atténuation des inondations. Le GCP a fourni des renseignements précieux pour orienter la prise de décisions par le Groupe d'étude; par exemple, en renforçant la recommandation du Groupe d'étude concernant la protection des milieux humides dans le bassin et en veillant à ce que soient déterminés et pris en compte les impacts en aval des mesures d'atténuation structurelles proposées.

Tout au long de l'étude, les principales constatations ont été communiquées sous la forme de rapports, de webinaires techniques, de vidéos, de fiches d'information et de livres blancs. Le tout a été publié sur le site Web de l'étude (https://www.ijc.org/fr/lcrr) et résumé dans un bulletin, Le courant, diffusé aux deux mois. Tout au long de l'étude, de multiples réunions ont été organisées, qu'il s'agisse du GCP, d'auditoires cibles ou du grand public, afin de recueillir toute une diversité de points de vue sur les recommandations éventuelles de l'étude. Des centaines de personnes représentant des intérêts publics, privés, sans but lucratif, gouvernementaux et commerciaux ont participé à des sondages, à des groupes de discussion, à des réunions et à des ateliers lors desquels elles ont fourni des renseignements essentiels qui ont influencé les orientations et les recommandations du Groupe d'étude.

Les réunions de sensibilisation du public au début de 2022 ont présenté des recommandations préliminaires. Ces réunions ont été accompagnées d'un rapport sommaire provisoire aux fins de consultation publique (GEILCRR, 2022). S'appuyant sur ces réunions et sur le rapport de consultation publique, le Groupe d'étude a sollicité les commentaires du public. Ses recommandations finales intègrent des révisions tenant compte de ces commentaires.

4 ANALYSE ET CONSTATATIONS DE L'ÉTUDE

Cette section présente un examen des mesures d'atténuation des inondations que le Groupe d'étude a examinées en regard de chacun des quatre thèmes de l'étude, du processus suivi pour les évaluer et d'une analyse des mesures les plus prometteuses. L'analyse démontre ce qu'ont donné les mesures de nature structurelle à l'étude lors d'évaluations menées au vu des divers indicateurs de performance sociaux, environnementaux et économiques, et à quel point elles étaient robustes en regard de la variabilité des apports d'eau, notamment en fonction des changements climatiques et du degré d'acceptabilité attendu des mesures des points de vue social et politique. Le Groupe d'étude a évalué les impacts à anticiper des changements climatiques sur les niveaux d'eau dans l'avenir. Ces renseignements sont présentés de façon séquentielle et sont suivis des recommandations qui en découlent pour le thème général des changements climatiques et pour chacun des quatre thèmes. Autrement dit, la sous-section sur les changements climatiques intervient en premier et se conclut par des recommandations, après quoi suivent les sous-sections concernant les thèmes 1, 2, 3 et 4 de l'étude, avec leurs recommandations correspondantes. La sous-section du thème 1 traite de tout un ensemble de mesures distinctes de nature structurelle. Celle-ci est assortie d'une analyse des mérites relatifs et de la viabilité des solutions proposées plutôt que de faire l'objet d'une seule recommandation. Suivent enfin des analyses et des recommandations sur le renforcement des capacités à l'appui des futurs efforts d'atténuation des inondations, ainsi que sur les produits hérités de l'étude à l'appui de la mise en œuvre des recommandations, de la gestion des inondations et des possibilités de collaboration.

4.1 VARIABILITÉ ESCOMPTÉE DES FUTURS APPORTS D'EAU

Le Groupe d'étude a été chargé d'examiner l'effet des changements climatiques sur les inondations. Deux questions primordiales se posaient : les inondations allaient-elles s'aggraver ou s'atténuer, et les mesures recommandées par le Groupe d'étude seraient-elles plus ou moins justifiables à l'avenir?

Le Groupe d'étude a appliqué des approches récemment examinées par des pairs pour tenir compte, dans les décisions relatives aux mesures d'atténuation proposées, de ce que l'on sait des inondations du futur. Le Groupe d'étude a examiné cette question sous quatre angles pour assurer la solidité de l'analyse.

1. La première perspective dont il est question dans des articles évalués par des pairs (Lucas-Picher et al., 2020), repose sur l'application de la méthode de descente d'échelle traditionnelle aux résultats du modèle de circulation générale (MCG) obtenus pour une trajectoire de concentration représentative (RCP) de 8,5, ce qui correspond à un scénario à fortes émissions. Selon un éventail de perspectives liées aux changements climatiques, les apports annuels nets moyens du bassin du lac Champlain devraient diminuer au fil du temps et réduire ainsi la fréquence des inondations, bien que la variabilité naturelle puisse produire des inondations encore plus importantes que celles de 2011, même si le niveau moyen du lac est abaissé.

2. Les analyses stochastiques ont fait ressortir la possibilité d'inondations potentiellement plus graves (plus étendues), mais aussi moins fréquentes que celles de 2011. L'une de ces analyses stochastiques a révélé une corrélation entre les apports nets annuels du bassin et l'indice d'oscillation arctique; elle prévoit un cycle semi-périodique qui, dans l'avenir, passerait de niveaux d'eau moyennement élevés à des niveaux bas. Si l'on définit une « crue » comme étant un pic annuel du niveau du lac Champlain de 30,35 m (99,57 pi) ou plus, les données historiques montrent de tels cycles sont bien réels. Il y a eu peu d'inondations dans les années 1960, par comparaison aux années 1970.

3. Une étude visant à estimer l'ampleur de la crue maximale probable (CMP) s'est penchée sur l'interaction entre l'accumulation de neige, la température et les précipitations printanières en tant que cause des inondations. Cette évaluation a permis de constater que les données disponibles étaient insuffisantes pour estimer la CMP d'après ce genre d'interaction. Il a plutôt fallu utiliser des méthodes évaluées par des pairs pour estimer la CMP à partir d'une analyse stochastique des niveaux ou des débits d'eau seulement. À l'aide de ces méthodes, le débit d'une crue maximale probable a été estimé à 5 449 m^3/s avec un niveau maximal probable du lac Champlain de 35,74 m (comparativement aux débits réels de 2011 d'environ 1 539 m^3/s et au niveau maximal du lac de 31,32 m). La probabilité de survenue d'une CMP ne peut pas être estimée à l'aide de méthodes statistiques, mais comme il s'agirait, selon toute vraisemblance, de la plus grande crue imaginable, il y a lieu de considérer que la CMP serait très improbable.

4. Pour appliquer l'approche ascendante, l'équipe a utilisé un générateur météorologique de sorte à générer un large éventail d'apports nets du bassin (ANB). Les ANB ont ensuite été chargés dans le modèle de bilan hydrologique pour dégager une fourchette de niveaux et de débits du lac dans l'avenir. L'ensemble de données ainsi créé a été utilisé pour répondre aux questions fondamentales, à partir des résultats de l'approche ascendante, mais compte tenu des résultats des trois autres processus. Ces travaux ont confirmé les résultats de la première perspective, soit tout à la fois un abaissement du niveau moyen dans l'avenir et le risque persistant d'inondations pires que celles de 2011. Les inondations générées ont montré une variabilité semblable à celle constatée dans l'analyse stochastique. Il est également permis de penser que les inondations devraient être moins fréquentes et moins graves à l'avenir, comme le montrent la prépondérance des modèles.

4.1.1 Résultats de l'approche ascendante (Decision Scaling)

Les impacts possibles des changements climatiques sur les ANB et le niveau du lac sont attribuables à des tendances contradictoires :

- Le réchauffement des températures entraîne une réduction des ANB et, par conséquent, du niveau du lac. Cette réduction tient à une évapotranspiration plus importante sur le territoire du bassin et à l'évaporation du lac.

- La hausse des précipitations entraîne une augmentation du ruissellement, des ANB et du niveau du lac.

- Si les précipitations et la température augmentent, la variation des ANB et du niveau du lac dépend alors de l'importance relative des changements de précipitations et de température. Selon le modèle HYDROTEL calibré, une augmentation de 4 °C annulerait en grande partie l'effet d'une augmentation des précipitations de 10 %, ce qui entraînerait une diminution des ANB et donc du niveau du lac. Par ailleurs, une augmentation des précipitations de 20 % ou plus ferait davantage que contrebalancer un réchauffement de 4 °C et entraînerait une augmentation des ANB et du niveau du lac.

Le débit sortant du lac et le niveau d'eau à Saint-Jean-sur-Richelieu sont généralement fonction du niveau du lac (la rugosité du chenal, affectée de façon saisonnière par la croissance de la végétation et la couverture de glace, influe également sur le débit et le niveau d'eau), de sorte que des résultats semblables sont obtenus pour ces variables.

Recours à l'approche ascendante pour établir un lien entre les futures inondations et des changements précis de température et de précipitations.

La figure 19 illustre la répartition potentielle des futurs niveaux maximaux du lac pour diverses combinaisons de changements de température et de précipitations (François et Brown, 2022). La figure 19 est complexe parce qu'elle comporte un ensemble dense d'informations. L'axe des x (abscisses) représente la plage des changements de température traités par le générateur météorologique. L'axe des y (ordonnées) représente les augmentations en pourcentage des précipitations annuelles traitées par le générateur météorologique. Dans le graphique principal, à l'intersection de chaque association de températures et de précipitations, cinq pastilles de couleur (blanches, et dégradées de bleu et de rouge) illustrent différents niveaux de crue. Les niveaux correspondant à ces couleurs apparaissent dans la barre latérale de droite (en ordonnée). Le blanc représente le niveau de crue de 2011. Plus le bleu est foncé, plus le pic de crue est élevé, jusqu'à environ deux mètres au-dessus de la crue de 2011. Plus le rouge est foncé plus les pics de crue sont bas.

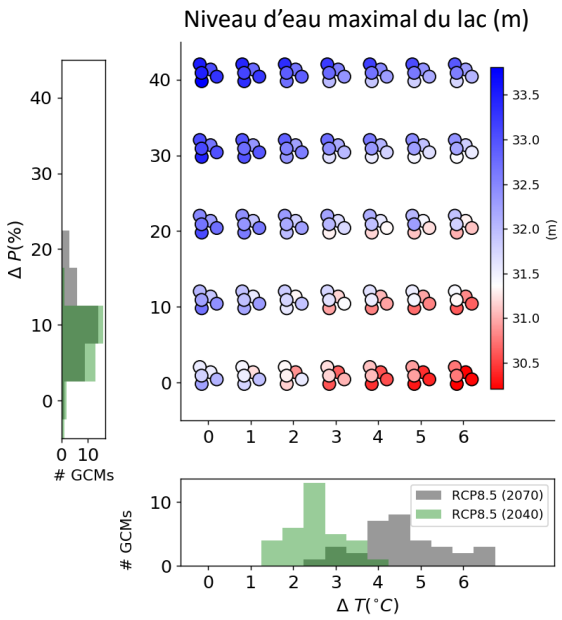


Figure 19. Représentation statistique des futurs niveaux maximaux du lac pour toutes les combinaisons prévues de changements de température et de précipitations.

Le groupe des cinq pastilles en bas à droite de couleurs rose foncé et rouge illustrent les niveaux beaucoup plus bas qui se produiraient à l'avenir avec des températures plus chaudes de 6 °C, mais sans augmentation des précipitations. Les cinq cercles représentent cinq

« réalisations » différentes des niveaux générés par les conditions météorologiques, chacun illustrant un niveau de variabilité différent, mais plausible. Les cinq pastilles bleu foncé en haut à gauche reflètent une situation correspondant à une augmentation de 40 % des précipitations, mais sans augmentation de température.

Laquelle de ces associations températures-précipitations se produira à l'avenir? Il est impossible de déterminer la probabilité de telle ou telle association dans l'avenir, ni de parier sur un avenir en bleu ou en rouge, mais la figure montre combien de modèles soutiennent les projections de chaque association température-précipitations. C'est ce qu'illustrent les graphiques à barres gris et verts situés à gauche et sous le graphique principal. Les barres vertes représentent le proche avenir, soit l'horizon 2040 (soit l'année médiane entre 2026 et 2055). Les barres grises représentent un avenir plus lointain, celui de 2070 (soit l'année médiane entre 2056 et 2085). À court terme, par exemple, selon les barres vertes sous le graphique, les modèles prévoient une augmentation de la température entre +1,5 °C et +4 °C pour l'horizon 2040, alors qu'elle varie approximativement entre +2,5 °C et +6,5 °C pour l'horizon 2070. De même, les barres à gauche montrent des projections de précipitations allant de -3 % à +22 %. L'analyse n'exclut pas la possibilité qu'il n'y ait aucune augmentation de la température, mais une augmentation de 40 % des précipitations (pastilles bleu foncé dans le coin supérieur gauche de la figure 19). Toutefois, l'intersection des températures et des précipitations prévues montre que les projections scientifiques actuelles pointent essentiellement dans le sens de niveaux rosés à court terme, devenant plus rouges vers la fin du siècle (François et Brown, 2022).

La plausibilité de méga-crues dans des conditions futures a été évaluée à partir d'une comparaison entre les conditions météorologiques et les conditions de surface du sol qui, selon les simulations des modèles, entraîneraient des inondations (simulations sur HYDROTEL du générateur météorologique et des inondations historiques). L'analyse a montré que la sélection d'une série de données hydrologiques combinant l'équivalent en eau de la neige du 1er mars, selon la crue simulée de 1971, et les précipitations d'avril à mai, selon la crue simulée de 2011 produirait des niveaux d'eau du lac Champlain plus élevés qu'en 2011. On pourrait intuitivement déduire que des niveaux plus élevés puissent résulter de la combinaison, lors d'une année donnée, de conditions d'enneigement et de pluviométrie ayant déjà été observées dans un passé récent et que cela rende plus plausibles des inondations de plus grande ampleur que celles de 2011.

La figure 20 est un exemple de graphique de coordonnées parallèles établissant des liens entre de multiples facteurs météorologiques et les débits et niveaux d'eau qui en résultent. Ce graphique est constitué de plusieurs axes verticaux (coordonnées) disposés de gauche à droite; chaque axe représentant la portée soit d'un prédicteur de crue à Saint-Jean-sur-Richelieu, soit d'une variable servant à décrire la crue à Saint-Jean-sur-Richelieu. Dans le cas présenté ci-dessous, les prédicteurs sont le niveau du lac au 1er mars, l'accumulation de neige au 1er mars (représentée par la variable de l'équivalent en eau de la neige à cette date) et la pluviométrie en mars et en avril. Les variables utilisées pour décrire les crues sont la date de l'épisode (jour civil) et le débit et le niveau d'eau à Saint-Jean-sur-Richelieu. Chaque courbe reliant les différentes coordonnées représente une année/crue spécifique du sous-ensemble de simulations utilisées pour l'analyse. Les crues simulées qui entraînent un niveau d'eau plus élevé que celui simulé pour l'inondation de 2011 sont mises en évidence par une couleur. L'échelle des couleurs qui va du rouge au bleu indique la quantité totale de pluie en avril. Les crues historiques (basées sur les apports simulés dans HYDROTEL) qui se sont produites en 1971 (jaune) et en 2011 (vert) sont également représentées dans le graphique à des fins de comparaison avec l'ensemble simulé (François et Brown, 2022).

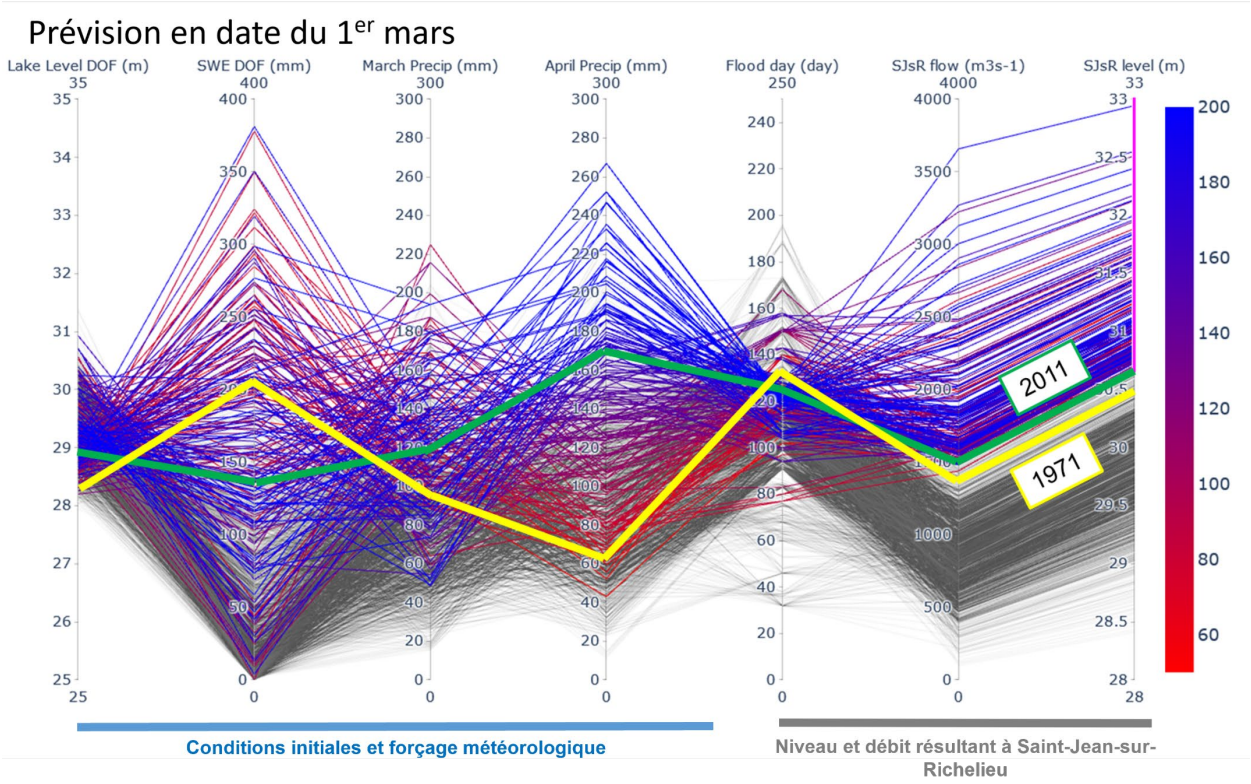


Figure 20. Graphique de coordonnées parallèles établissant le lien entre un ensemble de conditions antérieures (c.-à-d., de gauche à droite : le niveau du lac, l'EEN, les précipitations de mars et d'avril) et des variables qui décrivent la crue à SJsR (date, débit et niveau d'eau) (François et Brown, 2022).

La date des crues est indiquée en tant que quantième (1 correspondant au 1 janvier, 92 au 2 avril, etc.). Les deux plus importantes crues historiques (d'après les apports d'eau simulés dans HYDROTEL), en 1971 et 2011, sont indiquées en jaune et en vert, respectivement. Les crues simulées plus importantes que celles de 2011 sont indiquées en violet. L'échelle de couleur sur la droite indique les précipitations d'avril (mm).

La figure 20 montre que de nombreux épisodes dérivés des « stress-tests » climatiques dépassent l'ampleur des inondations de 2011, certains même nettement plus (François et Brown, 2022). Il ne faut pas s'en étonner, car l'ensemble de ces tests comprend des scénarios prévoyant une augmentation de la pluviométrie qui dépassera de très loin ce que font entrevoir les projections climatiques (+30 % et plus). Dans de tels scénarios, un manteau neigeux beaucoup plus épais pourrait s'accumuler dans le bassin versant, surtout si le réchauffement est peu important, ce qui offrirait des conditions de surface idéales pour une méga-crue. Advenant le cas, comme lors de la crue de 1971, il n'y aurait pas besoin de chutes de pluie importante en mars ou en avril pour produire une méga-crue en aval du lac. Ce genre d'événements pourraient se produire si l'augmentation des précipitations compensait celle de l'évaporation. Il est également intéressant de noter que des méga-crues pourraient survenir même si l'accumulation de neige était considérablement inférieure à ce qui a été observé en 2011, mais il faudrait pour cela un printemps particulièrement pluvieux.

L'analyse des changements climatiques (François et Brown, 2022) appuie les constatations suivantes :

1. Les changements climatiques vont probablement abaisser le niveau moyen du lac Champlain et réduire le débit de la rivière Richelieu au cours du XXIe siècle, mais la région risquera toujours d'être frappée par des crues plus importantes que celle de 2011. Des méga-crues plus importantes que celle de 2011 sont plausibles, bien que peu probables, au cours d'une année donnée. La gestion de la plaine inondable et la planification des interventions d'urgence sont les meilleures façons d'y faire face, par opposition aux mesures de nature structurelle.

2. Les estimations de la relation entre l'augmentation de la température et l'évapotranspiration ne sont pas négligeables, et les estimations élaborées dans le cadre de l'étude sont raisonnables, mais également incertaines (François et Brown, 2022). Des recherches dignes de foi prédisent que le niveau du lac Champlain diminuera au cours du XXIe siècle, et un ensemble de modèles laisse entendre que les émissions de carbone provoqueront une augmentation de la température et des précipitations, mais que les températures plus chaudes donneront lieu à une augmentation suffisante de l'évapotranspiration pour contrecarrer les effets d'une pluviométrie accrue. L'absence de mesures directes de l'évapotranspiration dans le bassin est source d'incertitude. Des niveaux d'eau plus bas réduiraient le risque d'inondation, mais pourraient aussi comporter des inconvénients importants. Un programme de surveillance visant à valider et à améliorer les estimations de l'évapotranspiration pourrait aider à atténuer l'incertitude relative aux niveaux d'eau dans l'avenir que l'on croit devoir être bas.

3. La probabilité d'inondations autour du lac Champlain et le long de la rivière Richelieu changera, et il n'y a pas de consensus sur la façon d'envisager l'impact des changements climatiques sur l'estimation de la fréquence des inondations à l'appui de la réglementation du développement immobilier dans les zones inondables. Les évaluations réalisées par le Groupe d'étude, ainsi que les données sur les inondations de 2011, indiquent qu'une partie importante des dommages causés par des inondations de grande envergure survient dans des zones situées à l'extérieur des « plaines inondables » désignées.

4. Les simulations modélisées dans le cadre de l'étude peuvent aider à expliquer le type d'influence de l'accumulation de neige et des précipitations sur les inondations. D'après les visualisations de ces simulations, des inondations supérieures à celles de 2011 apparaissent plus plausibles et le risque d'inondation devient plus palpable.

4.1.2 Recommandations

Les différentes approches de modélisation climatique appliquées par le Groupe d'étude indiquent toutes une incertitude majeure quant au futur régime hydrique, ainsi que d'une probabilité très faible (mais non nulle) d'inondations plus importantes que celles du printemps 2011, et de périodes d'étiage plus fréquentes et plus longues dans le bassin du lac et de la rivière. L'information dérivée des scénarios d'apports d'eau établis par le Groupe d'étude à partir de différentes techniques devrait être mise à la disposition de toutes les parties intéressées. Par conséquent, le Groupe d'étude recommande que la CMI conseille aux gouvernements d'encourager les organismes décisionnels à tenir compte des changements climatiques dans leurs décisions concernant tous les aspects de la gestion du risque d'inondation et dans leurs interventions.

4.2 MESURES DE NATURE STRUCTURELLE VISANT À RÉDUIRE LES INONDATIONS (THÈME 1)

Il n'est pas facile de trouver une solution de nature structurelle permettant de faire face à des inondations d'envergure dans ce bassin commun, comme le passé nous l'a enseigné. Une solution de nature structurelle (comme un barrage) a déjà été proposée deux fois et jugée comme étant la formule la plus efficace sur le plan technique pour régler le problème des inondations (CMI, 1938, 1981). Or, la mise en œuvre d'une telle solution a été soit infructueuse, comme après le premier renvoi de la CMI, soit contestée, comme après le second renvoi. La CMI a demandé à l'actuelle équipe chargée de l'étude de n'envisager que des mesures de nature non structurelle ou de nature structurelle d'ampleur modérée, compte tenu de ce qu'avait donné la proposition de la construction d'un barrage de grande taille. Le Groupe d'étude a envisagé toute la gamme des mesures de nature structurelle susceptibles de constituer une solution de ce genre pour régler le problème des inondations.

Le haut-fond de Saint-Jean est le point de contrôle naturel des niveaux d'eau dans le réseau hydrographique du bassin LCRR. Il agit comme un point d'étranglement du débit d'eau qui agit sur le niveau d'eau en amont (figure 21). Pour réduire les niveaux maximaux d'inondation sur les rives du lac et de la rivière en amont de ce point, il est essentiel d'augmenter le volume d'eau qui franchit le haut-fond.

Figure 21. Vue aérienne de la rivière Richelieu à Saint-Jean-sur-Richelieu, vue vers l'aval.

Les solutions de nature structurelle proposées dans le présent rapport proviennent de rapports antérieurs de la CMI, d'idées soumises par les résidents et les organisations du bassin, et d'une analyse des possibles solutions de nature structurelle novatrices mises en œuvre en dehors des limites du bassin. Les différentes mesures structurelles identifiées tombent dans l'une des quatre catégories générales suivantes (MGAI et HHC 2021) :

1. Élimination des traces d'intervention d'origine anthropique dans la rivière Richelieu (principalement par le retrait des artefacts et par des travaux d'excavation)

2. Mise en place de structures de modification du débit

3. Dérivation d'une partie des eaux

4. Modifications techniques dans la plaine inondable pour atténuer les inondations (essentiellement sous la forme de digues).

Bon nombre des solutions recensées concernent la morphologie du chenal, le régime hydraulique et l'hydrologie du bassin. Les impacts cumulatifs des modifications historiques sur le débit ont été pris en compte dans l'évaluation des effets des mesures envisagées, notamment pour ce qui est de l'analyse historique des modifications et de la restauration des conditions naturelles, d'un point de vue quantitatif, de sorte à permettre des simulations numériques du régime hydrologique à l'état naturel et des simulations du même régime après les modifications anthropiques (voir, par exemple, la figure 14).

Les scientifiques de l'étude ont commencé par recenser un grand nombre de mesures structurelles potentielles.

Après un examen préliminaire, sept mesures potentielles ont été sélectionnées pour être soumises à une analyse plus poussée (MGAI et HHC, 2021), mesures qui peuvent être combinées entre elles :

- Retrait sélectif de structures d'origine anthropique en vue d'accroître le débit sur le haut-fond de Saint-Jean

- Dérivation d'une partie de l'écoulement par le canal de Chambly, à hauteur du haut-fond

- Création d'un seuil fixe immergé (restriction de l'écoulement) en amont de Saint-Jean-sur-Richelieu

- Installation d'un barrage ou d'un réversoir gonflable en amont de Saint-Jean-sur-Richelieu, avec dragage du chenal.

Pour chaque mesure structurelle potentielle examinée, les scientifiques de l'étude ont effectué une évaluation initiale de l'efficacité de la réduction des niveaux d'eau maximums lors de crues majeures, en utilisant les renseignements et les données disponibles pour déterminer si une évaluation plus poussée s'imposait.

La CMI a demandé au Groupe d'étude de ne pas envisager la construction d'ouvrages majeurs et de se concentrer plutôt sur des ouvrages d'envergure « modérée », ce qui a écarté d'emblais la formule d'aménagement de la rivière (construction d'un barrage). Le Groupe d'étude a donc porté son attention sur un ensemble de mesures consistant à retirer une partie des matériaux du lit de la rivière (interventions sélectives) et à détourner une partie de l'écoulement par le canal de Chambly, ces mesures étant considérées comme des solutions de nature structurelle modérée.

À ce titre, trois mesures de ce type ont été examinées plus en détail (Moin et al, 2022) :

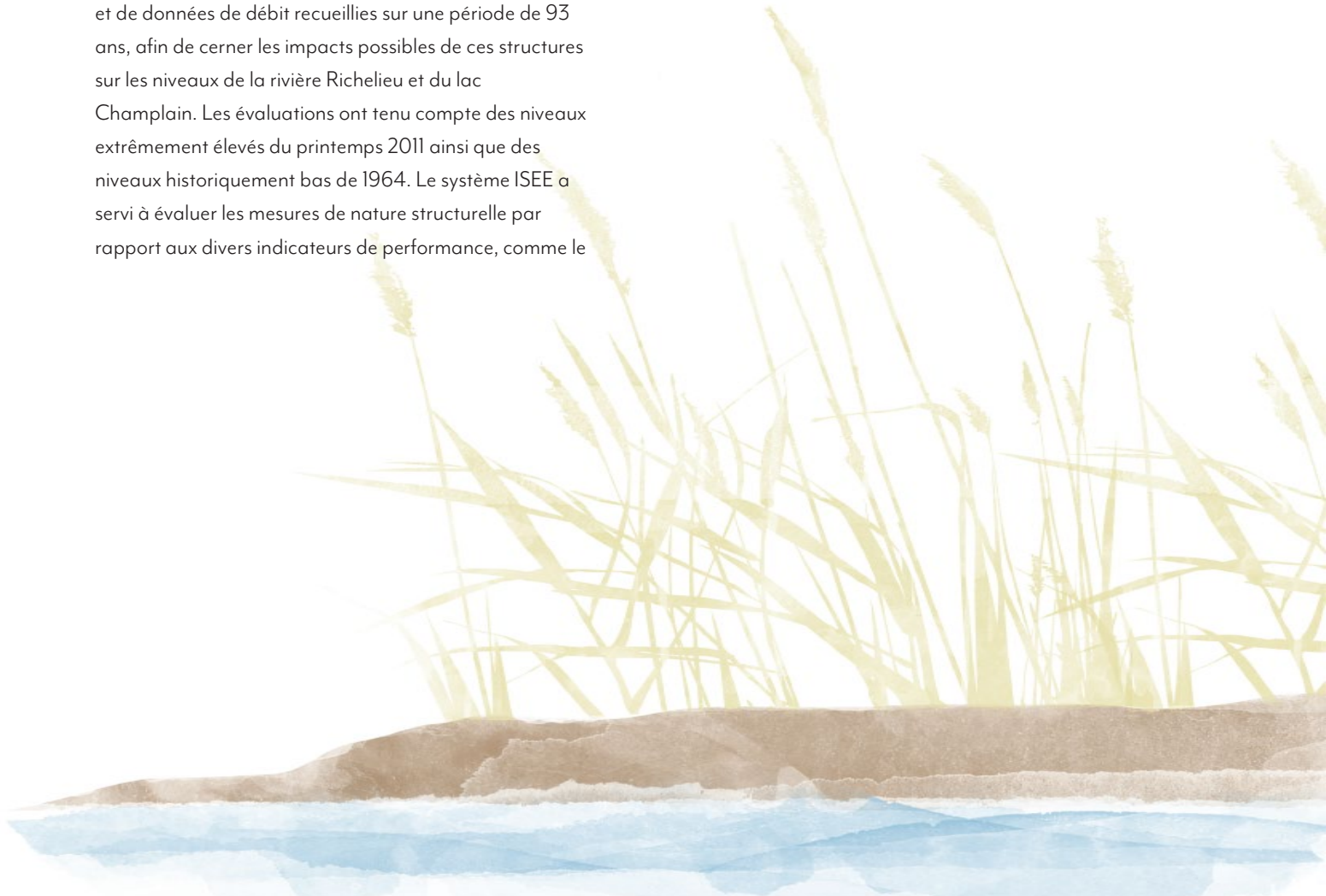
1. Excavation sélective du haut-fond de Saint-Jean-sur-Richelieu pour en retirer les traces d'interventions anthropiques (artefacts) et écrêtement des parties les plus élevées du haut-fond qui ralentissent l'écoulement. L'aménagement concomitant d'un seuil submergé permanent contribuera à modérer le débit et à hausser les bas niveaux d'eau en période de sécheresse.

2. Dérivation d'un débit important (400 m^3/s) par le canal de Chambly en cas de crue afin d'augmenter le débit et de diminuer ainsi les niveaux du lac et de la rivière en amont.

3. Dérivation d'un débit modéré (80 m^3/s) par le canal de Chambly, conjointement avec la mesure 1 (excavation sélective et seuil submergé).

Les répercussions hydrauliques de chaque mesure ont été évaluées à l'aide des outils de modélisation de l'étude et de données de débit recueillies sur une période de 93 ans, afin de cerner les impacts possibles de ces structures sur les niveaux de la rivière Richelieu et du lac Champlain. Les évaluations ont tenu compte des niveaux extrêmement élevés du printemps 2011 ainsi que des niveaux historiquement bas de 1964. Le système ISEE a servi à évaluer les mesures de nature structurelle par rapport aux divers indicateurs de performance, comme le nombre d'édifices résidentiels qui seraient épargnés par les inondations grâce à l'abaissement du niveau d'eau obtenu par chaque mesure. L'analyse des mesures a consisté : à évaluer la faisabilité technique; à cartographier l'altitude du lit de rivière à son état naturel et à son état modifié; à simuler les impacts positifs et négatifs du débit obtenu après mise en œuvre des mesures structurelles; à estimer les coûts au plus près et à envisager de possibles plans d'exploitation. L'analyse de ces mesures devait permettre de produire une preuve de concept, étant entendu que des travaux supplémentaires (p. ex., plans d'ingénierie détaillés, évaluation des impacts environnementaux) seraient nécessaires pour mettre en œuvre n'importe laquelle de ces mesures.

Ces mesures structurelles potentielles sont décrites ci-dessous. Elles ont été évaluées afin d'en déterminer les impacts potentiels et de savoir lesquelles seraient probablement les plus efficaces, selon les critères d'évaluation et les indicateurs de performance du Groupe d'étude.



4.2.1 Excavation sélective du haut-fond de Saint-Jean-sur-Richelieu et construction d'un seuil submergé (mesure structurelle 1)

Cette mesure consiste à retirer divers artefacts situés sur le haut-fond et à creuser une partie du haut-fond pour améliorer la débitance de la rivière Richelieu. Elle est intéressante, car elle renverse les effets des interventions humaines et ramène le réseau hydrographique à un état plus naturel, tel que déterminé à l'aide du MAN de reconstitution du cours supérieur de la rivière Richelieu (voir la description ci-haut), état s'approchant de celui qu'avait la rivière avant tout changement d'origine anthropique (Thériault et al., 2022). La mesure 1 prévoit l'enlèvement sélectif des vestiges de structures anthropiques afin d'augmenter le débit dans ce tronçon de la rivière (figure 22). Il est envisagé d'éliminer les digues submergées et les anciens pièges à anguilles submergés (les pièges visibles, qui sont un point d'intérêt culturel local, ne seraient pas retirés).

Les diverses stratégies d'excavation envisagées donnent toutes lieu à une baisse permanente de niveau d'eau, bien qu'à divers degrés, ce qui augure bien pour l'atténuation des inondations. Cependant, comme l'excavation exacerbe les bas niveaux en condition de faible débit, cette formule seule n'est pas une solution viable. Il a donc été décidé de combiner l'excavation à l'aménagement d'un seuil submergé pour atténuer l'impact des niveaux d'étiage, les matériaux excavés devant être utilisés dans la construction du seuil. La figure 22 donne une illustration de cette mesure.

L'excavation combinée au seuil submergé permettrait de corriger les débits extrêmes (hauts comme bas), d'abaisser le niveau d'eau pendant une crue et d'augmenter de façon sélective le niveau d'eau en période de faible débit. Cette configuration correspondrait aux conditions de régularisation hydraulique naturelle du haut-fond qui existaient avant les nombreuses interventions d'origine anthropique. La figure 23 compare les niveaux d'eau du lac Champlain à l'état naturel historique aux conditions de référence et à la mesure 1. La ligne bleue représentant les conditions de la mesure 1 suit de près la ligne rouge de l'état naturel, ce qui confirme que cette mesure ramènerait la rivière à un état plus naturel. (Moin et al, 2022). Non seulement le seuil submergé compenserait la baisse de niveau causée par l'excavation du haut-fond, mais il augmenterait généralement le niveau d'eau pendant les saisons estivale et automnale, réduisant ainsi au minimum les impacts possibles d'une baisse du niveau du lac qui pourrait également être causée par les changements climatiques.

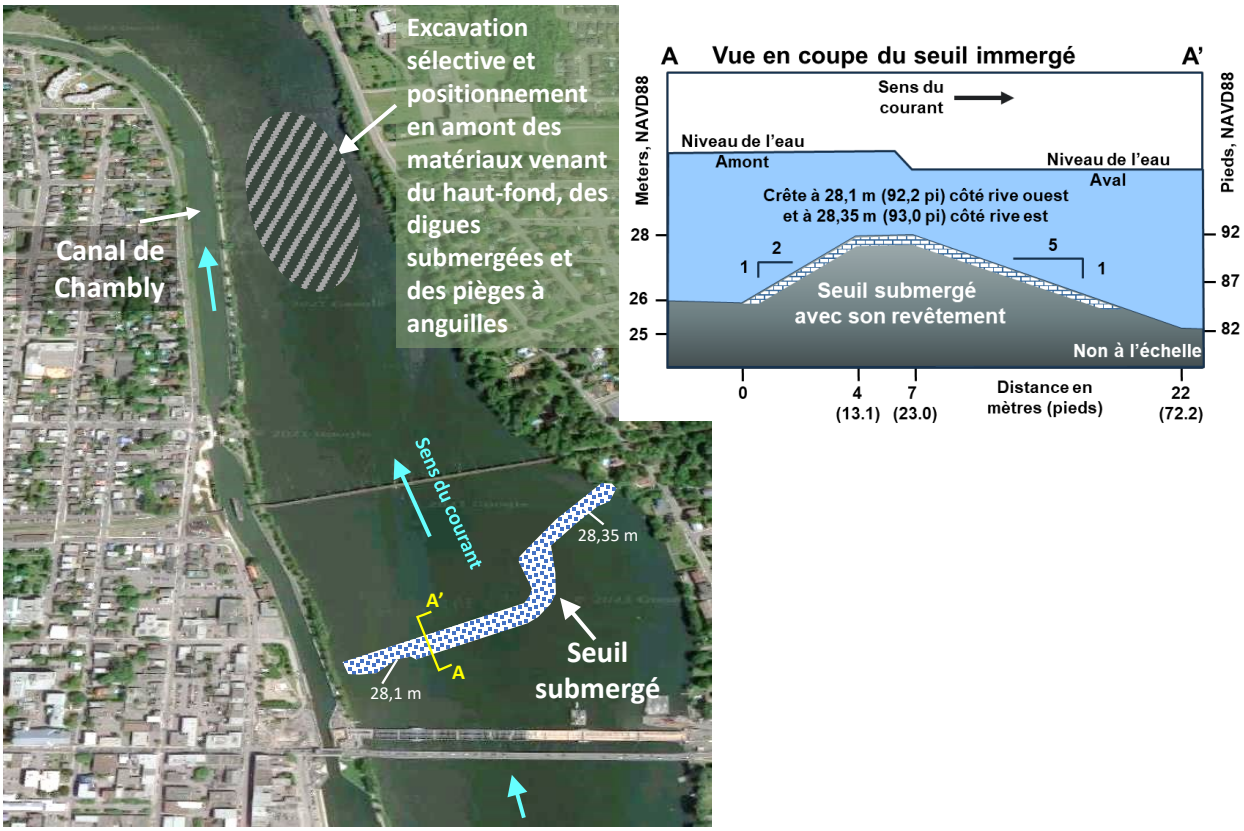


Figure 22. Excavation proposée et seuil submergé (mesure structurelle 1).

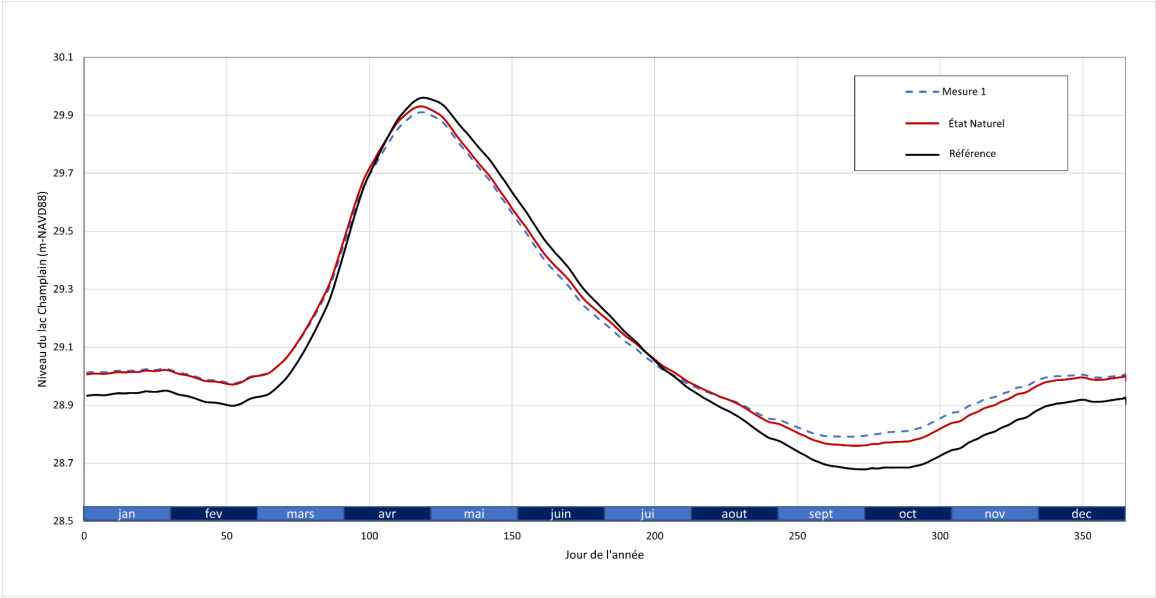


Figure 23. Comparaison des niveaux d'eau de la mesure 1 avec l'état naturel (Moin et al., 2022).

Aux fins de la preuve de concept, l'équipe de l'Étude a simulé l'excavation d'environ 31 310 m^3 (40 952 vg^3) de matériaux du haut-fond, sur une superficie totale d'environ 12 ha, au titre de la mise en œuvre de la mesure (Moin et al, 2022). Les artefacts sont principalement constitués de pierres non adhérentes et de remblai, et le haut-fond est principalement constitué de matériaux meubles faciles à excaver. Environ 25 % ou 7 740 m^3 (10 124 vg^3) des 31 310 m^3 (40 952 vg^3) seraient déposés immédiatement en aval du futur seuil submergé, là où le lit a été considérablement dragué et abaissé en 1939 (Moin et al., 2022). Quelque 9 000 m^3 (11 770 vg^3) de matériaux seraient retirés des artefacts, le reste, soit environ 22 000 m3 (22 775 vg^3), devant être excavé du haut-fond. Les matériaux seraient enlevés sur une épaisseur d'une trentaine de centimètre en moyenne (11,8 po), et la profondeur de l'eau sous-jacente dans ce tronçon de la rivière varierait alors entre 1,5 et 4,5 m (5 et 15 pi), selon la période de l'année (Moin et al., 2022). Selon l'analyse du Groupe d'étude, la mise en œuvre de cette mesure coûterait environ 8 millions de dollars canadiens (6 millions de dollars américains). Le coût annualisé total sur 50 ans, y compris pour l'exploitation et l'entretien, a été estimé à 336 000 $ CA (252 000 $ US)[17].

La combinaison retrait sélectif des artefacts du haut-fond et positionnement optimal du seuil submergé devrait permettre de réaliser deux conditions hydrauliques : 1) Le relèvement du niveau d'eau de référence au moyen d'un nouveau seuil près de Saint-Jean-sur-Richelieu permettra d'éviter un débit excessivement bas dans des conditions de sécheresse, et 2) le creusement du lit de la rivière tout de suite en aval du seuil — là où l'étranglement de l'écoulement dans le goulot formé par des berges rapprochées continuerait autrement à causer des inondations dans le bassin LCRR —augmentera le débit et réduira le niveau d'eau de la rivière, atténuant dès lors l'ampleur des inondations dans le bassin LCRR. L'enlèvement des matériaux sur le haut-fond atténuerait l'effet d'étranglement de l'écoulement et augmenterait le débit maximum (débitance) de la rivière, ce qui permettrait aussi d'abaisser le niveau d'eau. Il s'en suivrait une baisse de niveau à Rouses Point, car toute amélioration de la débitance dans le chenal fluvial entraîne un abaissement systématique du niveau d'eau dans l'ensemble du tronçon (dans ce cas-ci, entre Rouses Point et le haut-fond de Saint-Jean-sur-Richelieu) et cela quel que soit le débit. Dans le cas d'un débit moyen à faible de la rivière Richelieu, le seuil submergé constituerait un obstacle provoquant un refoulement d'eau en amont. La hauteur du seuil submergé a été ajustée pendant la phase de conception et le niveau optimal du seuil a été fixé à 28,10 m (92,2 pi). Un tel niveau permettrait d'abaisser les niveaux d'eau en période de crue et de les augmenter de façon sélective en situation de débits moyens à faibles. Cependant, pour assurer un écoulement dans la partie centrale du chenal en période de faible débit et pour exploiter les actuelles caractéristique d'une bathymétrie naturelle plus élevée côté rive droite, le seuil proposé aurait deux crêtes, soit l'une à 28,10 m (92,2 pi) du côté ouest du chenal et l'autre à 28,35 m (93 pi) vers Iberville sur la berge est, et il agirait comme nouveau régulateur hydraulique du réseau.

Le seuil submergé aurait peu d'effet sur les niveaux d'eau en amont ou en aval dans des conditions de débit très élevé, mais en situation d'étiage, il permettrait d'accroître le niveau du lac et le niveau dans les tronçons amont de la rivière de quelque 15 à 65 cm. La figure 24 illustre l'effet de la mesure 1 sur le niveau du lac Champlain dans les conditions de faible niveau observées en 1964-1965 (Moin et al., 2022).

[17] Sauf indication contraire, les coûts dans le présent rapport sont donnés en dollars de 2021. Les calculs supposent une durée de vie utile de 50 ans et un taux d'actualisation de 3 %.

Une relation débit-profondeur a été établie à partir des résultats de la modélisation hydraulique pour des débits inférieurs à 500 m^3/s (17 657 pi^3/s) (figure 25). L'évaluation a montré que, même pour le débit minimal observé de 59 m^3/s (2 083 pi^3/s), la profondeur d'eau au-dessus du seuil serait maintenue à 28 cm (11 po) (Moin et al., 2022).

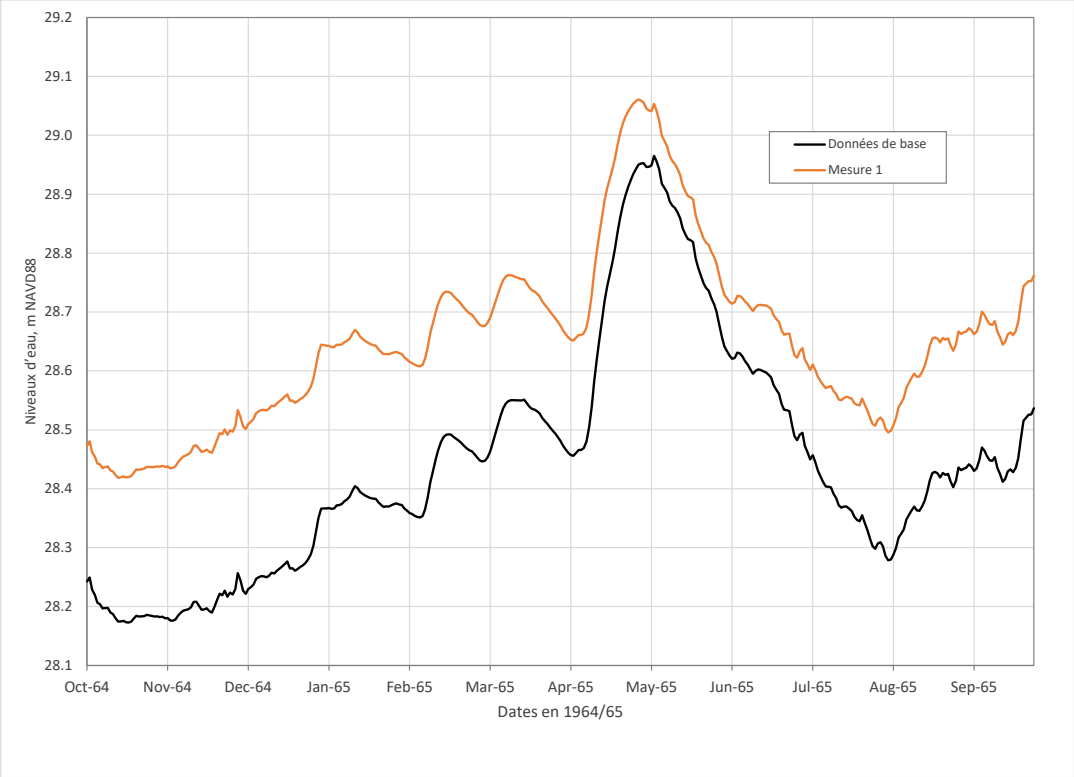


Figure 24. Impacts de la mesure 1 sur le niveau d'eau en période de débit extrêmement faible (1964/1965).

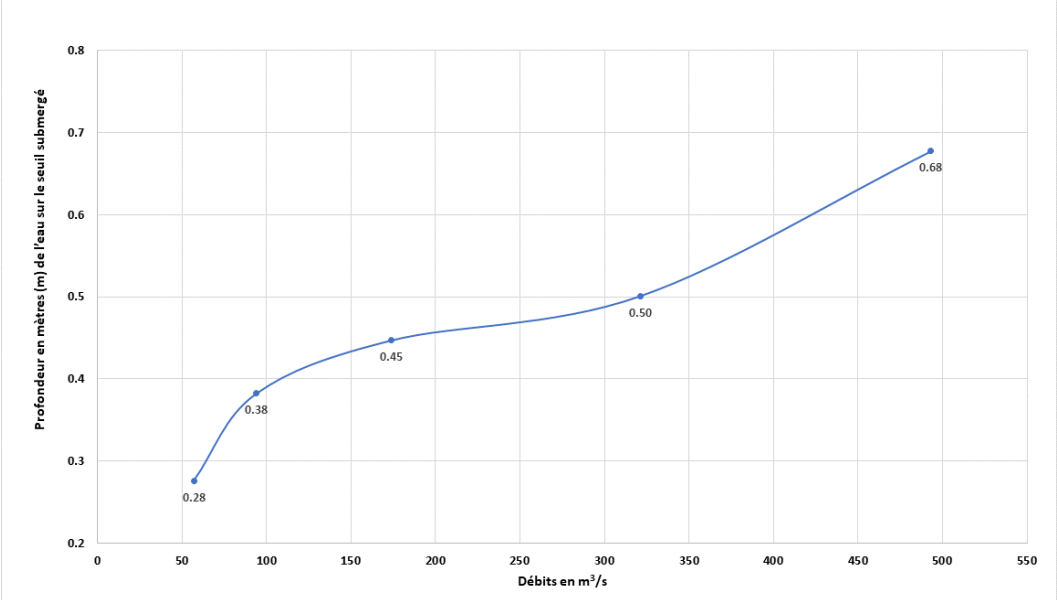


Figure 25. Profondeur de l'eau sur le seuil submergé pour la mesure 1.

La figure 26 montre la baisse de niveau au droit du seuil submergé en fonction de différents débits de la rivière. Comme on pouvait s'y attendre, pour un débit de 59 m^3/s (2 083 pi^3/s), le décrochage serait appréciable avec une différence de niveau d'eau de 64,7 cm (25,5 po) à hauteur du seuil submergé. Pour un débit de 500 m^3/s (17 658 pi^3/s), le niveau d'eau en amont du déversoir augmenterait et le décrochage (chute de niveau) à hauteur du seuil submergé diminuerait jusqu'aux environs de 20 cm (7,9 po). La hauteur de chute continuerait ainsi de décroître à mesure que le débit augmenterait. Par exemple, pour une crue d'un débit d'environ 1 500 m^3/s (52 973 pi^3/s), comme en 2011, l'écoulement au-dessus du seuil submergé présenterait une profondeur d'environ 2,4 m (7,87 pi) et le décrochage à hauteur du seuil ne serait que de 4,6 cm (1,8 po; figure 26). Lors d'une mégacrue d'un débit de 2 192 m^3/s (77 407 pi^3/s) — soit le débit modélisé le plus élevé de l'étude —, la baisse serait encore réduite pour atteindre environ 2,9 cm (1,1 po). À cause des limites inhérentes au maillage utilisé pour modéliser le comportement hydraulique, il n'a pas été possible de simuler des débits plus élevés, mais il est établi que le décrochage de niveau au-dessus du seuil submergé diminue à mesure que le débit augmente.

L'évaluation de l'étude a permis de déterminer que, pour une crue comparable à celle du printemps 2011 (débit maximal de 1 477 m^3/s et niveau d'eau correspondant de 31,23 m pour le lac Champlain à Rouses Point), cette mesure permettrait de réduire le niveau de pointe de 15,2 cm à Saint-Jean-sur-Richelieu et de 10,7 cm (4,2 po) à Rouses Point (Moin et al, 2022). Dans des conditions de débit extrêmement bas, le niveau d'eau pourrait augmenter de 28 cm (11 po) à Rouses Point grâce à cette mesure.

L'un des principaux avantages du seuil submergé est qu'il peut être construit à l'aide des matériaux excavés, ce qui réduit les coûts de construction. Ces matériaux fourniraient également un substrat plus naturel pour l'habitat aquatique. Le seuil ne serait pas visible, sauf à des débits extrêmement faibles (comme nous venons de le voir, une hauteur d'eau de 28 cm (11 po) serait maintenue au-dessus du seuil). Il pourrait aussi être facilement réparé ou modifié jusqu'à ce qu'il soit de nouveau nécessaire de modifier le régime d'écoulement.

Le lac Champlain et la rivière Richelieu sont des eaux transfrontalières, et les impacts de toute solution de nature structurelle sur les niveaux d'eau doivent être établis pour la région frontalière. L'étude a notamment été fondée sur 93 années de données hydrologiques en vue d'évaluer de tels effets sur les niveaux d'eau. La figure 27 montre les différences entre l'état de référence et la mesure 1. La figure illustre les différences de niveaux à Rouses Point sur 48 quarts de mois et indique les fluctuations de niveau au cours d'une année civile (les quatre premiers quarts de mois correspondent au mois de janvier), cela à partir de 93 années de données hydrologiques. La ligne de base zéro correspond à l'absence de changement; les valeurs positives indiquent que le niveau d'eau a augmenté à la frontière et les valeurs négatives correspondent aux périodes où le niveau est inférieur à l'état de référence. La figure saisit d'autres statistiques indiquant qu'environ 62 % du temps, les niveaux d'eau seraient relevés, et qu'ils seraient réduits de diverses façons 38 % du temps. La majeure partie de la baisse se produirait au printemps (du quart de mois 14 au quart de mois 26), et de la fin de l'été au printemps suivant, les niveaux d'eau augmenteraient. Les exceptions notées sont les périodes de pluviométrie plus élevée (niveau maximal indiqué par les points orange) et le périodes plus sèches (niveau minimal indiqué par les points verts) où les niveaux d'eau seraient soit abaissés, soit relevés tout au long de la période (Moin et al., 2022).

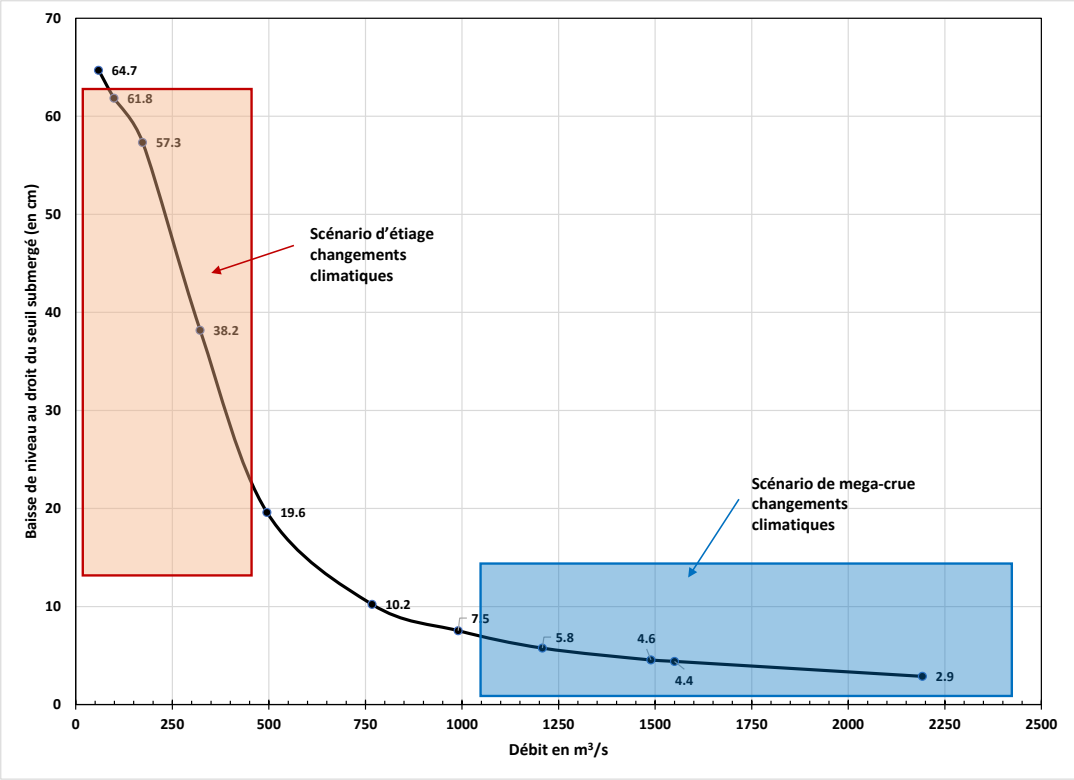


Figure 26. Baisses de niveau d'eau au droit du seuil submergé proposé en fonction de divers débits de la rivière (Moin et al., 2022).

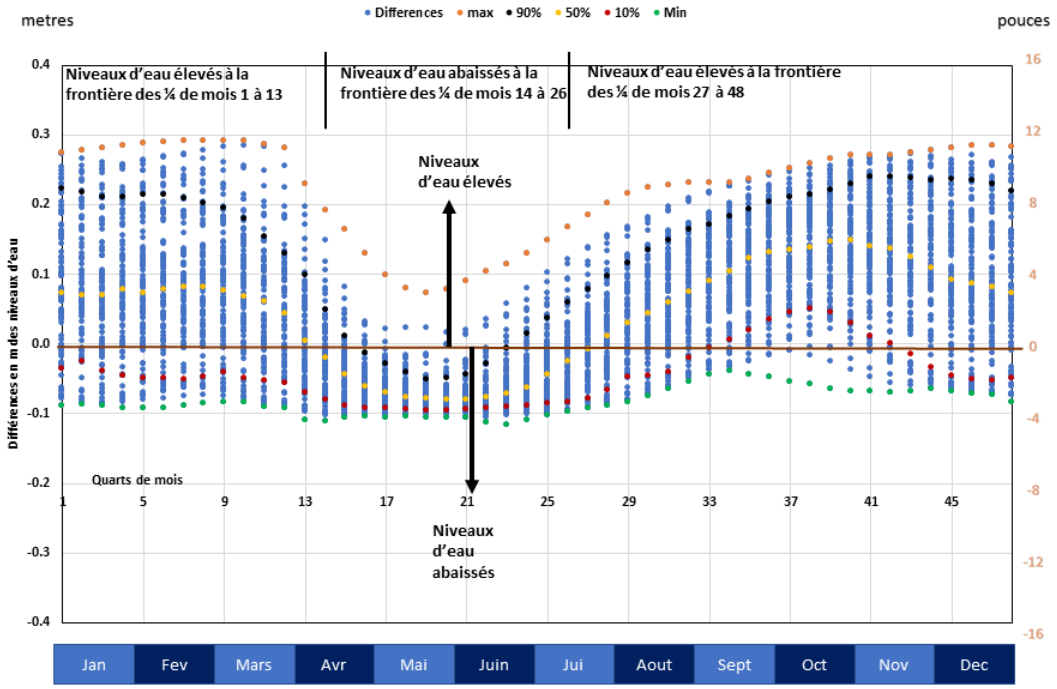


Figure 27. Changements des niveaux d'eau près de la frontière canado-américaine associés à la mesure 1.

4.2.2 Dérivation optimisée du canal de Chambly (mesure structurelle 2)

La mesure structurelle 2 consiste à modifier le canal de Chambly afin de maximiser la dérivation de l'écoulement selon une capacité nominale de 400 m^3/s (14 125 pi^3/s) qui correspond au régime hydraulique d'une dérivation majeure. La dérivation en question (figure 27) nécessiterait l'excavation du chenal, le remodelage et le renforcement des parois du canal et l'installation de vannes pour contrôler le débit. En période de débit élevé, soit durant la saison printanière, cette mesure permettrait de dériver une importante portion du débit global par le canal de Chambly. Pour permettre l'écoulement à un débit d'une telle ampleur, il faudrait ajuster la pente du canal en creusant le chenal. L'équipe de l'étude a calculé qu'il faudrait retirer 126 516 m^3 (165 477 vg^3) de matériaux de la rivière. On a estimé que cette mesure exigerait un investissement de 83 à 113 M$ CA (62 à 85 M$ US). Les coûts annualisés totaux sur 50 ans, pour l'exploitation et l'entretien, ont été estimés à 4,9 M$ CA (3,7 M$ US)[18].

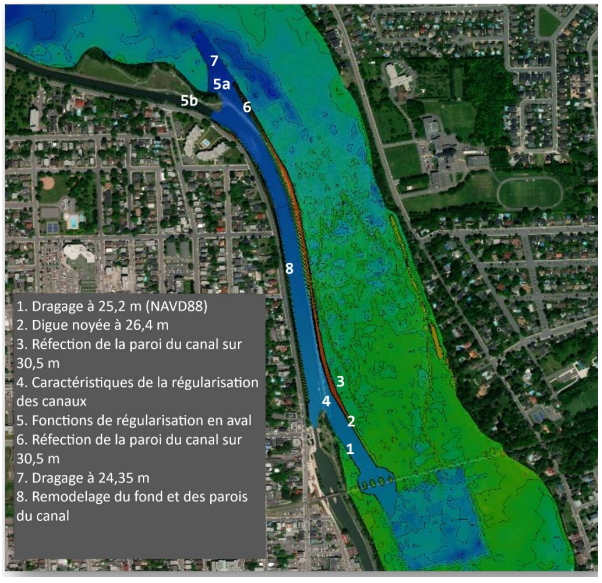


Figure 28. Dérivation proposée d'une partie des eaux de la rivière en vertu de la mesure structurelle 2.

Plusieurs options de dérivation ont été envisagées relativement à l'exploitation des vannes du canal, dans le cadre de l'élaboration de la mesure 2 :

- **Selon le niveau d'eau à Rouses Point** : La dérivation serait utilisée quand le niveau d'eau atteindrait la cote de crue, soit 30,5 m (100,06 pi), ce qui correspond à un débit d'environ 1 130 m^3/s (39 904 pi^3/s).

- **Opération à date fixe** : La dérivation serait ouverte à une date précise chaque année, date qui a été fixée au 15 mars aux fins de l'évaluation.

- **Exploitation selon un modèle théorique** : Une simulation de « prévision parfaite » a été réalisée à partir des données historiques afin de déterminer le meilleur scénario.

C'est le scénario de la « prévision parfaite » qui a été retenu pour évaluer les avantages potentiels de cette mesure. Pour l'inondation de 2011, la mesure 2 aurait permis de réduire le niveau d'eau de pointe de 34,3 cm (13,5 po) à Saint-Jean-sur-Richelieu et de 22,1 cm (8,7 po) à Rouses Point, sur le lac Champlain. Étant donné que le canal de dérivation demeurerait fermé sauf en période de débit élevé, il n'y aurait aucun impact à des niveaux extrêmement bas (sauf de légères différences en raison des changements de bathymétrie attribuables à l'excavation du chenal lors de l'aménagement de la dérivation). Les 93 années de données hydrologiques donnaient à penser qu'à hauteur de la frontière internationale cette mesure ferait monter le niveau d'eau quelque 60 % du temps (mais de moins de 2 cm), et le ferait baisser environ 40 % du temps, habituellement pendant les périodes où la dérivation serait ouverte.

[18] Ces calculs supposent une durée de vie utile nominale de 50 ans et un taux d'actualisation de 3 %.

La mesure structurelle 2 est celle qui offrirait les meilleures garanties d'allégement des impacts dus aux inondations. Cependant, elle serait également beaucoup plus coûteuse que les mesures structurelles 1 et 3 et sa mise en œuvre serait assortie de défis techniques de taille. Par exemple, la désignation historique du canal pourrait poser des problèmes de conception et avoir une incidence sur la faisabilité de cette mesure. Les courants plus élevés que prévu associés à la dérivation nécessiteraient le renforcement du canal ou une restriction du débit. La mesure 2 n'abaisserait le niveau d'eau que lors d'épisodes de crue majeure et ne serait appliquées que rarement. Par ailleurs, la mesure 2 entraînerait une augmentation temporaire du niveau d'eau en aval de Saint-Jean-sur-Richelieu à la suite de l'ouverture des vannes du canal, ce qui pourrait entraîner une augmentation des dommages causés par les inondations en aval (Roy et al., 2022).

4.2.3 Dérivation d'un débit modeste par le canal de Chambly, excavation sélective du haut-fond de Saint-Jean-sur-Richelieu, et construction d'un seuil submergé (mesure structurelle 3)

Cette mesure reprend les solutions de la mesure structurelle 1 et ajoute une dérivation de débit modeste par le canal de Chambly, au nord de l'écluse no 9 à Saint-Jean-sur-Richelieu[19]. À l'instar de la mesure 1, la mesure 3 prévoit l'enlèvement sélectif de vestiges de structures d'origines anthropique afin de favoriser un débit plus important dans ce tronçon de la rivière (figure 29). Ce projet permettrait d'éliminer les digues submergées et des anciens pièges à anguilles submergés (les pièges à anguilles visibles qui sont un point d'intérêt culturel pour la collectivité locale, ne seraient pas retirés). De plus, un seuil submergé serait installé pour atténuer les impacts des faibles niveaux d'eau. L'excavation combinée au seuil submergé permettrait de réduire les débits extrêmes hauts comme bas, d'abaisser le niveau d'eau lors d'une crue et d'augmenter de façon sélective le niveau d'eau à faible débit.

La mesure 3 consisterait aussi à ménager une dérivation modérée assurée par deux ensembles de ponceaux à dalot munis de vannes[20]. Ils seraient positionnés dans la digue séparant la rivière du canal. Pour la preuve de concept, il avait été proposé de détourner un débit d'environ 80 m^3/s (2 825 pi^3/s) dans le canal en période de crue. Le plan général est présenté à la figure 29. Comme nous l'avons vu, l'analyse de ces mesures avait pour objet de produire une preuve de concept et il était entendu que des travaux complémentaires (comme des plans d'ingénierie détaillés et une évaluation des impacts environnementaux) seraient nécessaires pour mettre en œuvre l'une ou l'autre de ces mesures. Les vannes seraient ouvertes ou fermées en fonction du niveau d'eau pour détourner une partie de l'écoulement vers le canal, avant de la rediriger vers la rivière. Une fois le niveau d'eau aux environs de 29,25 m (95,96 pi) à hauteur des ponceaux à dalot, ce qui correspond à une trentaine de mètres (98,43 pi) NAVD88 à Rouses Point, les vannes seraient ouvertes. Elles seraient fermées quand le niveau à Rouses Point passerait sous 29,5 m. Les énormes vannes de régularisation du débit dans le canal de Chambly, montées sur roues fixes ou sur galets, seraient soulevées et abaissées à l'aide d'un mécanisme de levage. Le fonctionnement serait manuel ou automatique grâce à un système à flotteur.

Semblable à la mesure 1, la mesure 3 permettrait de rapprocher les niveaux d'eau de ce qu'ils étaient à l'état naturel (figure 30), comme a permis de l'établir le MAN de reconstitution du cours supérieur de la rivière Richelieu (décrit précédemment), selon un modèle se rapprochant de l'état de la rivière avant que des changements anthropiques soient apportés (Thériault et al., 2022). La ligne bleue de la figure 30 qui illustre les conditions de la

[19] Il est à noter que l'idée de détourner l'eau au niveau de l'écluse no 9 n'a fait l'objet que de peu d'attention à cause d'un phénomène de vibration constaté lors d'expériences de dérivation à haut débit menées en 1979 (CILCRR, 1979), et aussi du caractère historique de la structure de l'écluse (MGAI/HHC, 2022).
[20] Il est à noter que l'étude n'a pas évalué de mesure consistant uniquement à détourner une partie du débit, sans travaux d'excavation ni aménagement d'un seuil. Il n'en reste pas moins que d'autres solutions de dérivation pourraient être envisagées à la faveur de futures évaluations.

mesure 3 suit de près le profil de la ligne rouge représentant l'état naturel, ce qui confirme que cette mesure ramènerait l'hydrologie de la rivière à un état plus naturel (Moin et al, 2022). Non seulement le seuil compenserait la baisse de niveau causée par l'excavation du haut-fond, mais il augmenterait généralement le niveau d'eau pendant les saisons estivale et automnale, réduisant ainsi au minimum les impacts possibles d'un abaissement du niveau du lac susceptible d'être causé par les changements climatiques.

Les impacts de cette mesure sur le niveau d'eau s'apparentent globalement à ceux de la mesure 1, hormis des mesures additionnelles d'atténuation des inondations pendant la saison des crues. On a évalué les coûts d'immobilisation de cette mesure à quelque 21 M$ CA (15,8 M$ US). Les coûts annualisés sur 50 ans en exploitation et entretien ont été estimés à quelque 916 000 $ CA (687 000 $ US)[21].

Pour cette mesure, les vannes seraient ouvertes et fermées en fonction d'un niveau d'eau préétabli. Le plan d'exploitation proposé repose sur un principe simple selon lequel l'écoulement doit être dérivé quand le niveau de la rivière atteint la cote de crue ou s'en rapproche. Une fois que le niveau d'eau près de l'écluse approche des 29,25 m (95,96 pi), ce qui correspond à une trentaine de mètre (98,43 pi) à Rouses Point, les vannes seraient ouvertes. Elles seraient fermées après que le niveau d'eau à Rouses Point serait passé sous les 29,5 m. Dans les simulations modélisées utilisées pour l'analyse bénéfices-coûts, la dérivation n'a été exploitée que pour trois années, soit 1993, 1998 et 2011. Une deuxième simulation a testé cette mesure avec la dérivation en fonction pendant 542 jours sur 27 ans. Dans cette simulation, la dérivation a été généralement fermée avant le début de la saison de navigation de plaisance à la mi-mai, à l'exception d'une ou deux fois à cause d'inondations retardées ou prolongées, comme en 2011. Si les gouvernements étudient davantage la faisabilité de cette mesure, les règles d'ouverture et de fermeture de la dérivation devraient aussi être étudiées plus en détail.

Les ouvrages fluviaux seraient les mêmes que ceux décrits pour la mesure 1. Il faudrait cependant ajouter des moyens de « canaliser » la rivière en fonction de la dérivation modeste envisagée, cela pour diriger l'écoulement selon les besoins. La base des ponceaux de dérivation du côté admission se situerait légèrement sous le niveau d'eau normal de la rivière. Pour poser les ponceaux à dalot dans la digue, une section d'environ 40 m (131 pi) serait asséchée à l'aide de batardeaux pendant une période qui n'excéderait pas deux semaines. Une fois les ponceaux installés et les parois consolidées par un enrochement protecteur, le batardeau serait retiré. Une opération semblable pour l'installation des ponceaux du côté évacuation serait nécessaire.

[21] Ces calculs supposent une durée de vie utile nominale de 50 ans et un taux d'actualisation de 3 %.

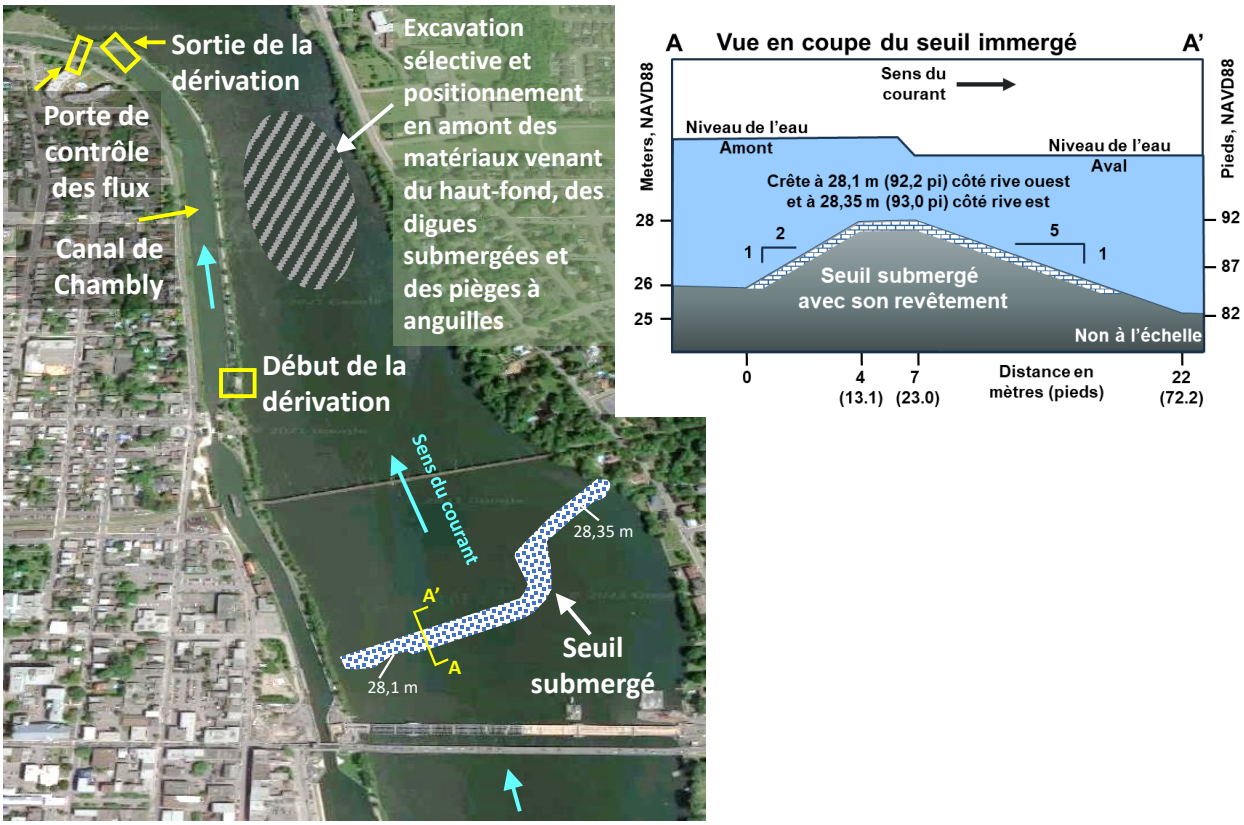


Figure 29. Mesure structurelle 3 - Seuil submergé avec dérivation à débit limitée.

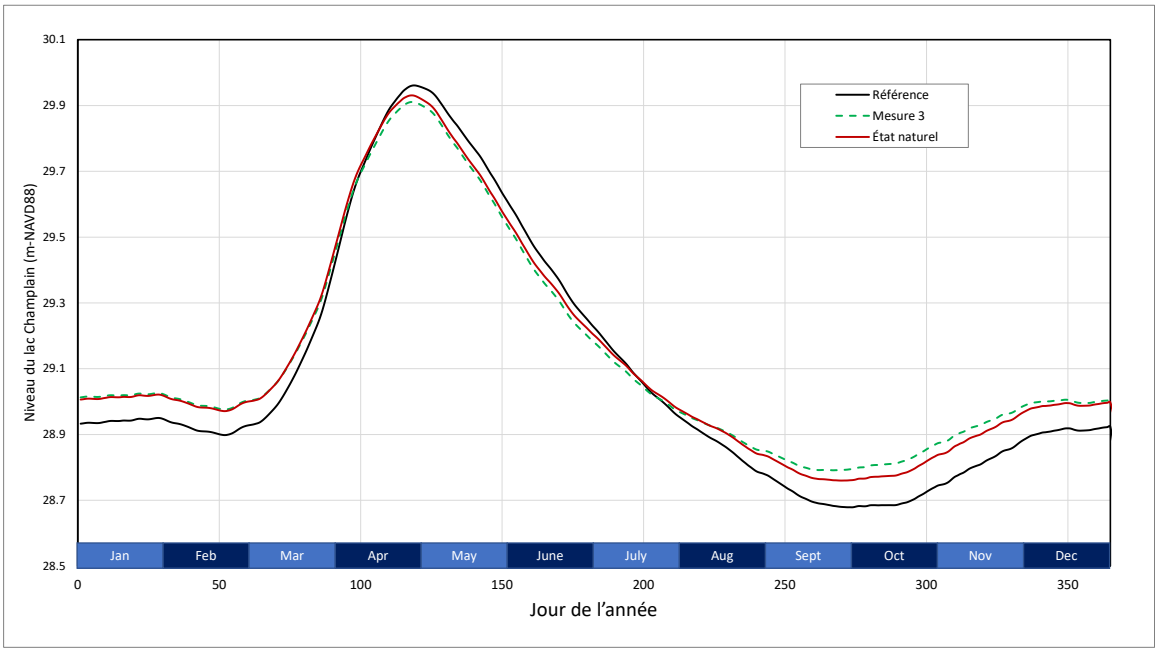


Figure 30. Comparaison des niveaux d'eau de la mesure 3 à ceux de l'état naturel (Moin et al., 2022).

Tout comme pour les autres mesures, la mesure 3 a été évaluée en fonction de l'abaissement du niveau d'eau qu'elle aurait permis lors de la crue printanière de 2011. En plus de la réduction de niveau résultant des interventions prévues dans le cadre de la mesure 1 (excavation du haut-fond, retrait d'artefacts et aménagement d'un seuil submergé), la mesure 3 permettrait d'abaisser davantage le niveau d'eau grâce à l'ouverture du canal de dérivation. Dans les conditions de 2011, l'ouverture aurait été maintenue durant deux mois, du 14 avril au 14 juin, quand la combinaison niveau d'eau/débit a atteint le seuil fixé pour qu'une partie du débit soit déviée. La réduction correspondante du niveau d'eau de pointe aurait été de 22,3 cm (8,8 po) à Saint-Jean-sur-Richelieu et de 15,2 cm (6 po) à Rouses Point sur le lac Champlain. Tout au long de la période d'exploitation de la dérivation, la mesure 3 aurait davantage atténué les impacts de la crue que la mesure 1, à raison d'environ 7 cm (3,2 po) à Saint-Jean-sur-Richelieu et de 4,5 cm (2 po) sur le lac (Moin et al., 2022). Cette mesure aurait le même effet sur les faibles niveaux d'eau que la mesure 1 en augmentant le niveau d'un maximum de 28 cm (11 po) dans des conditions de débit extrêmement bas. À l'instar de la mesure 1, le niveau d'eau à la frontière internationale serait relevé environ 62 % du temps, et il serait réduit de diverses façons, mais davantage qu'en fonction de la mesure 1, à raison de 38 % du temps. L'essentiel de l'abaissement se produirait pendant les périodes de débit élevé, au printemps, quand les vannes seraient ouvertes, tandis que le niveau commencerait généralement à augmenter à la fin de l'été (Moin et al., 2022).

4.2.4 Évaluation des mesures de nature structurelle

Les trois mesures de nature structurelle ont été comparées en fonction de leurs effets relatifs sur les niveaux d'eau, en regard des indicateurs de performance et des critères de décision. Le tableau 4 compare les coûts des trois mesures, leurs effets sur les niveaux d'eau (hauts et bas), et leur efficacité à réduire à la fois le nombre de maisons inondées et le montant global des dommages dans une situation semblable à ces inondations du printemps 2011[22].

Pendant la période de référence (1925-2017), le nombre d'années où le niveau d'eau aurait atteint la cote de crue mineure à Saint-Jean-sur-Richelieu serait passé de 19 à 2 ans avec la mesure 2 et à 11 ans avec les mesures 1 et 3. De même, le nombre d'années où le lac Champlain aurait dépassé les seuils de crue serait passé de 37 à 18 ans avec la mesure 2 et à 30 ans avec les mesures 1 et 3. La plupart des années, les mesures d'atténuation des inondations n'auraient pas eu d'incidence importante sur les niveaux d'eau en aval du haut-fond de Saint-Jean. Cependant, la formule de la dérivation majeure par le canal de Chambly (mesure 2) aurait pu entraîner une augmentation temporaire des débits et des niveaux d'eau en aval, ce qui aurait pu occasionnellement mener à des niveaux de pointe plus élevés (Moin et al., 2022).

[22] Il est important de noter que l'équipe de l'étude n'a pas élaboré d'indicateurs de performance pour les périodes hors crues; cependant, les activités de sensibilisation du public ont clairement fait ressortir que les bas niveaux (étiages) sont, pour de nombreuses parties prenantes, tout aussi préoccupants. L'augmentation des niveaux d'eau en condition de faible débit est considérée comme bénéfique pour la navigation de plaisance, car une faible profondeur d'eau peut restreindre l'accès à l'eau pour les embarcations et entraîner des coûts pour les propriétaires de marina à cause des opération de sortie des bateaux de l'eau et de dragage des fonds. Des niveaux d'eau plus élevés pendant une sécheresse et à la fin de l'été peuvent également aider à atténuer le réchauffement de l'eau en été, à maintenir une qualité d'eau adéquate et à prévenir la prolifération d'algues. Compte tenu des préoccupations soulevées par les effets des faible niveau d'eau, le Groupe d'étude a inclus une évaluation qualitative des conditions de faible niveau d'eau dans l'évaluation des mesures possibles.

Tableau 4. Évaluation des mesures de nature structurelle.

Paramètres	Mesure 1. Enlèvement sélectif de matériaux du haut-fond + seuil submergé	Mesure 2. Dérivation majeure par le canal de Chambly	Mesure 3. Enlèvement sélectif de matériaux du haut-fond + seuil submergé + dérivation modérée par le canal de Chambly
	Évaluation économique		
Coûts d'immobilisation[1]	8 M$ CA (6,4 M$ US)	100 M$ CA (75 M$ US)	21 M$ CA (16,8 M$ US)
Coûts de fonctionnement et d'entretien	-	400 000 $ CA (300 000 $ US)	20 000 $ CA (15 000 $ US)
Coûts totaux annualisés[1]	336 000 $ CA (252 000 $ US)	4 887 000 $ CA (3 665 000 $ US)	916 000 $ CA (687 000 $ US)
Bénéfices totaux annuels[2]	3,4 M$ CA (2,5 M$ US)	4,7 M CA (3,5 M$ US)	3,6 M$ CA (2,7 M$ US)
Ratio bénéfices/coûts [3]	10,11	0,95	3,33-3,96*
Ratio d'incrémentalité[4]	-	0,45	0,69
	Évaluation du niveau d'eau		
Baisse du niveau de la rivière Richelieu par rapport à la crue de 2011	15,2 cm (6,0 po)	34,3 cm (13,5 po)	22,3 cm (8,8 po)
Baisse du niveau du lac Champlain par rapport à la crue de 2011	10,7 cm (4,2 po)	22,1 cm (8,7 po)	15,2 cm (6,0 po)
Augmentation du niveau du lac Champlain par rapport à la sécheresse de 1964 (printemps, automne)	7 à 28 cm (2,8 à 10,9 po)	Négligeable	7 à 28 cm (2,8 à 10,9 po)
	Étude d'impact		
Maisons épargnées par rapport aux inondations de 2011[5]	596 (15,5 %)	1 175 (30,6 %)	928 (24,2 %)

1. Coûts présentés dans Moin et al. (2022), en dollars de 2021 en supposant une durée de vie utile de 50 ans et un taux d'actualisation de 3 %.

2. Les bénéfices annuels totaux ont été déterminés en fonction des dommages annuels prévus, y compris des dommages structuraux aux résidences, de la perte de revenus dans le secteur des loisirs, des coûts d'hébergement temporaire, des coûts socioéconomiques, de la perte de revenus commerciaux, de la perte de rendement agricole et des coûts de nettoyage, en supposant une durée de vie de 50 ans et un taux d'actualisation de 3 % (Moin et al., 2022).

3. Deux évaluations économiques ont été effectuées pour l'étude; la première valeur résulte de l'analyse bénéfices-coûts de Bouchard St-Amant et Dumais (2022), et la deuxième, de Moin et al (2022).

4. Les ratios différentiels B-C indiqués pour les mesures 2 et 3 sont les bénéfices supplémentaires obtenus pour le coût supplémentaire pris en compte, comparativement à la mesure 1 (Bouchard St-Amant et Dumais, 2022).

5. Nombre total de résidences épargnées par les inondations, Canada et États-Unis combinés. Les pourcentages indiqués sont comparés aux données de référence de 3 839 résidences inondées en 2011 (Moin et al., 2022).

L'étude a essentiellement porté sur les trois mesures parce qu'elles reposaient sur des structures modérées qui n'auraient d'incidence que sur les extrêmes de l'hydrogramme et potentiellement moins d'impacts environnementaux que toute autre. Une solution de nature structurelle susceptible de ramener le régime hydraulique proche de son état initial, comme les mesures 1 et 3, est séduisante du point de vue environnemental. Elles contribueraient en outre à atténuer les effets de l'élargissement du canal de Chambly dans les années 1970. La figure 31 dresse la comparaison entre les niveaux d'eau correspondant aux conditions de référence, aux trois mesures d'atténuation et à l'état naturel de la rivière Richelieu. La mesure 2 (ligne jaune) suit le profil de la ligne de référence (ligne noire), tandis que les mesures 1 et 3 (lignes bleue et verte en pointillés) sont plus près de l'état naturel (ligne rouge) (Moin et al., 2022).

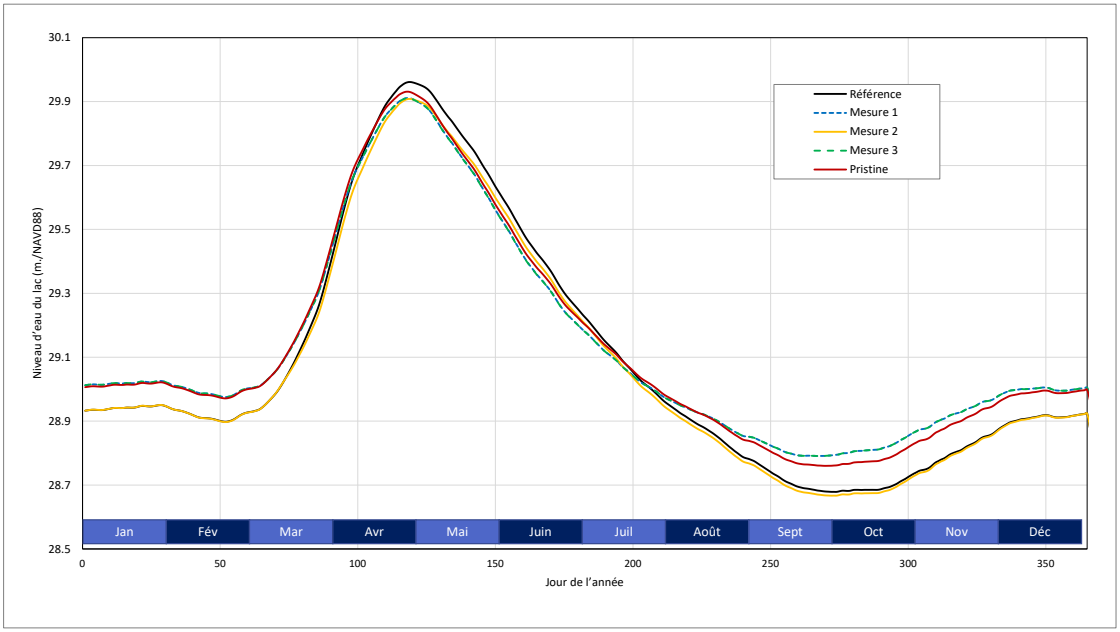


Figure 31. Comparaison entre les niveaux d'eau du lac Champlain correspondant aux conditions de référence, aux trois mesures d'atténuation et à l'état naturel de la rivière Richelieu (Moin et al, 2022).

Le tableau 4 donne les ratios bénéfices-coûts (B-C) pour chaque mesure. Deux ratios B-C sont fournis pour les mesures 1 et 3. Le premier (le plus bas) est fondé sur les niveaux d'eau de 1925 à 2017 de l'ISEE ayant servi à générer un ensemble de niveaux d'eau synthétiques (Bouchard St-Amant et Dumais, 2022). Le deuxième ratio B-C (le plus élevé) est fondé sur les dommages historiques dus aux inondations générées par le système ISEE (Moin et al., 2022). Les deux approches ont permis d'obtenir des renseignements utiles sur les ratios bénéfices-coûts. Par souci de simplicité, les coûts annuels présentés dans les sections suivantes sont fondés sur l'utilisation de l'OCAD. Une étude additionnelle des approches bénéfices-coûts et une analyse des hypothèses sous-jacentes pourraient être appropriées avant la mise en œuvre de mesures structurelles particulières visant à réduire les risques d'inondation dans le bassin LCRR.

Les ratios B-C incrémentiels indiqués pour les mesures 2 et 3 représentent les avantages additionnels obtenus pour le coût supplémentaire considéré, comparativement à la mesure 1. Un ratio incrémentiel de 0,69 pour la mesure 3 signifie que les avantages supplémentaires attendus de la mesure additionnelle sont inférieurs au supplément de coût requis pour sa mise en œuvre.

Indicateurs de performance économique

Les résultats de l'analyse des indicateurs de performance économique suggèrent que les trois mesures permettraient de réduire les dommages causés par les inondations. L'ensemble des répercussions économiques des inondations dans le bassin a été estimé à 696 millions de dollars canadiens (522 millions de dollars américains) pour la période de référence (1925-2017) en l'absence de toute mesure d'atténuation des inondations (Roy et al, 2022). Pour la même période de référence, la mesure 2 aurait offert la plus forte réduction, avec un abattement des dommages de 359 M$ CA (262 M$ US ou 52 %), devant la mesure 3 avec 277 M$ CA (202 M$ US ou 40 %) et la mesure 1 avec 248 M$ CA (181 M$ US ou 36 %). Bien que synonyme de la plus forte diminution des dommages globaux, la mesure 2 aurait entraîné une augmentation temporaire du niveau d'eau en aval de Saint-Jean-sur-Richelieu après l'ouverture des vannes du canal, ce qui aurait donné lieu à une augmentation des dommages de 11 % (11 M$ CA; 8 M$ US) au cours de la période de référence. (Roy et al., 2022).

Environ 90 % (630 M$ CA; 473 M$ US) de tous les impacts économiques se produisent dans la partie canadienne du bassin, et c'est précisément là où surviennent la plupart des dommages, soit dans la région du cours supérieur de la rivière Richelieu, que les mesures d'atténuation des inondations sont les plus efficaces. Dans cette partie du bassin, les mesures 1, 2 et 3 auraient permis de réduire les dommages de 43 %, 64 % et 47 % respectivement durant la période de référence (Roy et al., 2022). Les mesures 1 et 3 auraient réduit les dommages entre Saint-Jean-sur-Richelieu et Chambly, mais n'auraient généralement eu aucun effet en aval du bassin de Chambly. Cependant, en de rares occasions, les mesures peuvent avoir un léger effet négatif dans les parties en aval où le niveau d'eau augmente légèrement quand celui du Saint-Laurent est élevé.

Le secteur résidentiel est le plus touché par les inondations, puisqu'il enregistre 63 % des dommages totaux (439 M$ CA; 329 M$ US, de 1925 à 2017). Les mesures d'atténuation des inondations auraient réduit les dommages résidentiels de 42 % (184 M$ CA; 138 M$ US), de 58 % (256 M$ CA; 192 M$ US) et de 45 % (197 M$ CA; 148 M$ US), respectivement. Le gros de la prévention des dommages se situerait dans le cours supérieur de la rivière Richelieu, dans plusieurs municipalités riveraines. Dans la partie américaine du bassin, les mesures seraient également efficaces, mais la vulnérabilité du secteur résidentiel aux inondations est faible, car les inondations causant des dommages importants ne sont pas fréquentes; 2011 est la seule année où les dommages résidentiels ont dépassé le million de dollars américains.

Le secteur commercial, industriel et récréatif se classe au deuxième rang pour ce qui est de l'impact des inondations, puisqu'il représente 34 % des dommages totaux (235 M$ CA; 178 M$ US, de 1925 à 2017). Dans la zone d'étude, c'est la mesure 2 qui aurait permis de réduire le plus les dommages combinés pour ce secteur d'activité au cours de la période de référence (99 M$ CA; 74 M$ US ou 42 %), devant de la mesure 3 avec 74 M$ CA (56 M$ US ou 31 %) et la mesure 1 avec 61 M$ CA (46 M$ US ou 26 %).

Le secteur agricole subit une partie moindre des dommages causés par les inondations (3 % ou 18 M$ CA; 14 M$ US, de 1925 à 2017). La mesure 2 aurait offert la plus grande réduction des dommages aux bâtiments agricoles, mais les mesures 1 et 3 auraient été plus efficaces pour atténuer la perte de rendement des cultures, car elles auraient permis une diminution du niveau des eaux jusqu'à la période critique de l'année entre l'ensemencement et les récoltes.

L'effet des mesures sur les dommages structuraux et matériels causés aux bâtiments publics auraient été relativement mineurs, puisqu'ils auraient représenté seulement 0,3 % des dommages totaux subis pendant la période de 1925 à 2017 (1,8 M$ CA; 1,4 M$ US). Toutes ces mesures auraient permis de réduire les dommages, mais les effets des mesures au cours de la période de référence n'auraient pas été statistiquement significatifs ($p > 0,05$) dans la majeure partie de la zone d'étude, à l'exception d'une légère augmentation annuelle des dommages (moins de 1 000 $ CA; 750 $ US), dans le cours inférieur de la rivière Richelieu.

Indicateurs de performance environnementaux

Le tableau 5 présente une évaluation des trois mesures de nature structurelle par rapport aux indicateurs de performance environnementaux du Groupe d'étude (Moin et al., 2022). Les travaux entrepris dans le cadre de l'étude comportaient une analyse préliminaire des impacts environnementaux. Si les gouvernements devaient décider de mettre en œuvre l'une des mesures examinées, celle-ci devrait faire l'objet d'une évaluation environnementale rigoureuse et être accompagnée d'une collecte de données plus poussée. Le tableau 5 regroupe les résultats de l'évaluation en cinq catégories, en fonction de leur écart (exprimé en pourcentage) par rapport aux conditions de référence actuelles, pour le lac Champlain et pour les tronçons amont et aval de la rivière Richelieu. (Les IP ne s'appliquent pas tous à chaque zone du bassin LCRR ce qui explique que certaines parties du tableau soient vierges) Les teintes de vert indiquent une évaluation positive, les teintes de rouge une évaluation négative et le gris un changement négligeable. Les cellules blanches n'ont pas été évaluées. Il convient également de noter que les scores du tableau 5 sont des moyennes et ne reflètent pas la variabilité naturelle. La couleur verte dans le tableau indique un effet positif sur l'environnement.

Les analyses des indicateurs de performance environnementaux suggèrent que la modification du régime des niveaux d'eau associée aux mesures d'atténuation aurait de légers effets positifs (tableau 5). Par exemple, en favorisant l'abaissement des niveaux d'eau au printemps dans les années où les niveaux sont élevés, les mesures assureraient une profondeur plus convenable dans le cours supérieur de la rivière pour le frai du Grand brochet et pour l'habitat de halte de la sauvagine durant sa migration printanière. Les changements seraient également bénéfiques pour le petit blongios (un héron en voie de disparition) dont l'habitat de nidification serait optimisé et ils seraient propices à l'aménagement de huttes par les rats musqués en hiver. De plus, les modèles ne prévoient pas d'importants changements à long terme dans la superficie moyenne des milieux humides riverains et lacustres. Toutefois, les mesures 1 et 3 pourraient entraîner un léger changement dans la répartition des catégories de milieux humides dans le cours supérieur de la rivière Richelieu, avec une diminution de la végétation aquatique submergée et une augmentation des zones de marais et marécages. En ce qui concerne l'effet des mesures sur l'habitat de frai et sur le développement embryonnaire du chevalier cuivré (espèce de poisson endémique, en voie de disparition), il n'est pas possible de quantifier les répercussions des mesures en raison du manque de données bathymétriques de haute résolution pour des endroits critiques, surtout dans les rapides de Chambly. Les mesures 1 et 3 présentent l'avantage, sur le plan écologique, de rapprocher le régime des niveaux d'eau de l'état naturel, avant que de multiples modifications anthropiques ne soient apportées à la rivière Richelieu (Roy et al., 2022).

Tableau 5. Évaluation des indicateurs de performance environnementaux au vu des mesures de nature structurelle (Roy et al., 2022).

	Mesure 1			Mesure 2			Mesure 3		
	Lac	RR Amont	RR Aval	Lac	RR Amont	RR Aval	Lac	RR Amont	RR Aval
Milieux humides (marais et marécages)									
Milieux humides (tous types)									
Végétation submergée									
Habitat de fraie du grand brochet									
Zone de frai du chevalier cuivré									
Halte migratoire de la sauvagine									
Habitat de nidification du petit blongios									
Survie du rat musqué									
Zone de nidification de la tortue-molle à épines									

Légende :				
Augmentation de 5 % ou plus	*Augmentation entre 2 % et 5 %*	*Entre une augmentation de 2 % et une diminution de -2 %*	*Diminution entre -2 % et -5 %*	*Diminution de -5 % ou plus*

Indicateurs de performance concernant les Autochtones

L'étude a permis de travailler en étroite collaboration avec les communautés autochtones du bassin afin de répondre à leurs intérêts et à leurs préoccupations grâce à la sélection d'indicateurs de performance qui leur soient propres. Trois indicateurs de performance ont été choisis à cette fin, soit le frêne noir (qui a des applications culturelles comme la vannerie), le riz sauvage (qui est une source de nourriture culturelle) et les sites archéologiques/sacrés (qui ont une incidence sur la préservation culturelle historique). Un certain nombre d'indicateurs de performance environnementaux (milieux humides, frayère du Grand brochet, frayère du Chevalier cuivré, habitat migratoire de la sauvagine et survie du rat musqué) présentent en outre un intérêt pour les groupes autochtones. Le tableau 5 résume les effets potentiels des mesures d'atténuation sur ces IP. Le tableau 6, quant à lui, présente les répercussions de chaque mesure structurelle sur les indicateurs de performance concernant les Autochtones. Il reprend les codes de couleur utilisés au tableau 5. Aucune des trois mesures n'a d'incidence négative. Bien que l'indicateur de performance du frêne noir donne des résultats positifs fondés sur une augmentation de l'habitat désirable grâce aux mesures adoptées, il convient de noter que l'établissement, la survie et la reproduction du frêne noir sont complexes, et les qualités physiques idéales que recherchent les Autochtones pour produire leurs vanneries ne sont pas encore bien comprises du point de vue de la xylologie (science du bois) (Roy et al., 2022).

Les principaux points suivants ressortent de l'analyse des indicateurs de performance en ce qui a trait aux effets des mesures d'atténuation des inondations qui sont : le seuil submergé (mesure 1); la dérivation par le canal de Chambly (mesure 2), et le seuil submergé avec dérivation mineure (mesure 3).

- Les trois mesures augmenteraient la superficie favorable à l'habitat de l'espèce de frêne noir convenant à la vannerie dans la partie canadienne de la zone d'étude, cela sous l'effet d'une réduction de la durée de la période d'inondation. Toutefois, même si l'augmentation de la superficie de l'habitat était bénéfique pour l'espèce, cela ne se traduirait pas par une augmentation rapide de la population, puisque la disponibilité de l'habitat n'est pas considérée comme étant le plus important facteur limitatif de la colonisation du frêne noir.

- Les trois mesures amélioreraient la survie du riz sauvage dans le secteur du lac Champlain sous l'effet d'une réduction des niveaux d'eau pendant la période de germination et d'une réduction de l'amplitude de la baisse de niveau d'eau entre la germination et la flottaison.

- L'effet des trois mesures sur la vulnérabilité des sites d'excavation et des sites archéologiques potentiels le long de la rivière Richelieu ne serait pas statistiquement significatif, ce qui revient à dire qu'aucune répercussion négative n'est prévue.

Dans l'ensemble, les mesures suggérées ont des effets mineurs sur les indicateurs de performance présentant un intérêt pour les communautés autochtones locales.

Tableau 6. Évaluation des indicateurs de performance autochtones au vu des mesures de nature structurelle (Roy et al., 2022).

	Mesure 1			Mesure 2			Mesure 3		
	Lac	RR Amont	RR Aval	Lac	RR Amont	RR Aval	Lac	RR Amont	RR Aval
Durabilité du frêne noir									
Riz sauvage									
Vulnérabilité des sites archéologique/sacrés									

Légende :

Augmentation de 5 % ou plus	*Augmentation entre 2 % et 5 %*	*Entre une augmentation de 2 % et une diminution de -2 %*	*Diminution entre -2 % et -5 %*	*Diminution de -5 % ou plus*

Répercussions des changements climatiques

Le Groupe d'étude a notamment fondé ses décisions sur la viabilité économique et la résilience aux changements climatiques. Comme nous l'avons vu, les évaluations en lien avec les changements climatiques ont révélé que des inondations plus importantes que celles de 2011 sont plausibles à l'avenir, même si le niveau d'eau moyen est abaissé. L'étude a donc évalué les mesures de nature structurelle en fonction d'un avenir « plus sec » avec des méga-crues rares, mais plausibles. Cette évaluation était axée sur les mesures 1 et 3, car il a été déterminé que la mesure 2 n'était pas viable pour des raisons techniques et économiques. L'étude visait à déterminer si les mesures 1 et 3 réduiraient les dommages causés par les inondations dans la zone d'étude de façon rentable en fonction de conditions climatiques futures potentielles. Une alternative est dite rentable quand elle présente des bénéfices supérieurs aux coûts, soit quand le rapport des bénéfices sur les coûts est supérieur à un.

Les changements climatiques devraient donner lieu à une augmentation des précipitations et donc accroître le risque d'inondation, mais aussi à une augmentation des températures, ce qui pourrait amplifier l'évaporation et réduire le risque d'inondation. Cette analyse quantifie les effets compensatoires de précipitations et de températures plus élevées pour estimer laquelle des deux aura le plus d'influence, mais cette analyse comporte des incertitudes. Si le risque d'inondation augmente, le rapport coût-efficacité des mesures devrait augmenter également (il serait davantage nécessaire de réduire les dommages causés par les inondations). L'effet des changements climatiques viendraient contredire la conclusion voulant que les mesures ne sont rentables que si le risque d'inondation diminue à l'avenir, car il serait moins nécessaire de réduire les dommages causés par les inondations. C'est pour cette raison qu'il convient d'examiner la question de la rentabilité économique en fonction du degré selon lequel le risque de crue pourrait être réduit par l'action des changements climatiques.

L'évaluation a d'abord consisté à déterminer la réduction de la fréquence des inondations nécessaire pour abaisser à un les ratios bénéfices-coûts des mesures 1 et 3. Ensuite, les résultats des projections climatiques du Groupe d'étude ont été analysées en vue de déterminer dans quel pourcentage la fréquence des inondations serait réduite pour permettre un abaissement des ratios bénéfices-coûts à un ou moins. Par exemple, et selon l'évaluation, une réduction de 28,5 % de l'ampleur d'une crue bi-centennale ramènerait le ratio bénéfices-coûts à un dans le cas de la mesure 1, avec une probabilité d'environ 7 % qu'une telle réduction se produise dans la période de 2056 à 2085. L'analyse a indiqué que la mesure 3 sera probablement rentable malgré l'effet des changements climatiques et que la mesure 1 le sera très probablement (Werick, 2022).

Critères de décision

Les trois mesures structurelles ont été comparées aux critères de décision, comme le montre le tableau 7. Comme nous l'avons vu, la mesure de nature structurelle 2 (dérivation majeure) n'était ni techniquement ni économiquement viable et la question n'a pas été examinée plus à fond. Les mesures 1 et 3 répondaient aux six premiers critères, mais pour savoir jusqu'à quel point elles peuvent être mises en œuvre, une évaluation plus approfondie sera nécessaire.

Tableau 7. Évaluation des mesures de nature structurelle au vu des critères de décision du Groupe d'étude.

	Critères de décision du Groupe d'étude						
Mesure	**Dans les limites de la portée et du mandat de l'étude**	**Techni-quement viable**	**Économi-quement viable**	**Respectueux de l'environnement**	**Équitable et juste**	**Résilience aux changements climatiques**	**Réalisable**
Enlèvement sélectif de matériaux du haut-fond + seuil submergé	✓	✓	✓	✓	✓	✓	En attente d'autres discussions entre administrations
Dérivation majeure par le canal de Chambly	✓	✗	✗	Non évalué	Non évalué	Non évalué	Non évalué
Enlèvement sélectif de matériaux du haut-fond + seuil submergé + dérivation modérée par le canal de Chambly	✓	✓	✓	✓	✓	✓	En attente d'autres discussions entre administrations

La mesure 1 a été jugée comme étant une solution de nature structurelle très viable répondant aux critères de décision du Groupe d'étude. Il s'agit d'une structure passive peu coûteuse qui rapproche le régime hydraulique de son état naturel tout en offrant des avantages importants. Elle corrige les niveaux d'eau, hauts comme bas, et elle est synonyme d'avantages intéressants pour la société, les peuples autochtones et l'environnement. Aucun effet négatif important n'a été relevé. Le ratio bénéfices-coûts de cette mesure est proche de 10.

La mesure 3 a également été jugée comme une solution structurelle viable. Elle permet d'alléger encore plus que la mesure 1 la crue des eaux (de 50 % de plus environ), mais le ratio bénéfices-coûts incrémentiel correspondant à l'ajout de la dérivation est inférieur à un. Il en découle que le ratio bénéfices-coûts est réduit, mais que la valeur résultante dépasse tout de même nettement le point d'équilibre entre les coûts et les bénéfices pour s'établir aux environs de 3 quand la mesure est envisagée dans son ensemble. Cette mesure procure le même niveau de retombées que la mesure 1. Une diminution supplémentaire des niveaux d'eau de crue pourrait être synonyme d'autres bénéfices pour la société.

Les premières investigations par le Groupe d'étude au sujet de la faisabilité des recommandations du thème 1 d'un point de vue politique ont révélé un soutien limité pour des interventions structurelles de grande envergure et très coûteuses, ainsi que des craintes quant aux impacts potentiels sur les niveaux d'étiage, sur la qualité de l'eau et sur l'environnement (SPE, 2022). Le Groupe d'étude a tenu compte de ces considérations dans ses évaluations. Le nouveau plan québécois de protection contre les inondations restreint également le recours à des mesures de nature structurelle (SPE, 2022). Ces travaux ont, par ailleurs, révélé que des obstacles pourraient entraver la faisabilité aux États-Unis, notamment si le Traité relatif aux eaux limitrophes devait être activé par la mise en œuvre de la mesure d'atténuation retenue et si un financement par les Américains était souhaité (SPE, 2022). Toutefois, au cours de la période de commentaires du public, le Groupe d'étude a reçu des réactions généralement positives de la part des parties prenantes au sujet des mesures de nature structurelle. Les solutions de nature structurelle que le Groupe d'étude recommande ont en effet été jugées modérées et réalistes par le public. Certains membres du public avaient des questions ou souhaitaient obtenir plus d'informations. En général, les participants ont voulu en savoir plus sur la fonction, la construction et l'impact potentiel du seuil submergé, en particulier sur l'hydrologie et l'environnement. Les participants ont également posé des questions sur la façon dont serait gérée la dérivation de la mesure 3. Certains membres du public ont dit craindre que les solutions proposées ne réduisent pas suffisamment les dommages causés par les inondations ou que la probabilité de mise en œuvre de ces solutions soit faible. En général, cependant, les membres du public se sont dit encouragés par la recommandation de l'étude sur les solutions structurelles.

4.2.5 Niveau d'eau à la frontière internationale

Le Groupe d'étude a évalué les impacts des solutions potentielles de nature structurelle sur le niveau d'eau à la frontière internationale à partir de 93 années de données hydrologiques. La figure 32 résume les résultats pour les débits élevés, selon les conditions de crue de 2011. Cette figure montre le profil de la surface du niveau d'eau pendant une inondation, depuis la frontière (à gauche) jusque dans le secteur du haut-fond de Saint-Jean (à droite). Le niveau d'eau de référence est indiqué en noir, la mesure 1 est en rouge et la mesure 3 en bleu. (Il convient de noter que la mesure 1 et la mesure 3 auraient des impacts similaires à certains endroits, et qu'il peut être difficile de différencier les courbes rouge et bleue).

La figure 33 illustre de façon similaire un profil de niveau d'eau de la frontière au secteur du haut-fond de Saint-Jean dans des conditions de faible débit. Les tracés montrent que les mesures de nature structurelle proposées augmenteraient les niveaux d'eau à faible débit par rapport à l'état de référence. (À noter que les deux mesures ont des impacts très similaires sur les niveaux d'eau, et donc, que les courbes de la mesure 1 et de la mesure 3 sont indiscernables).

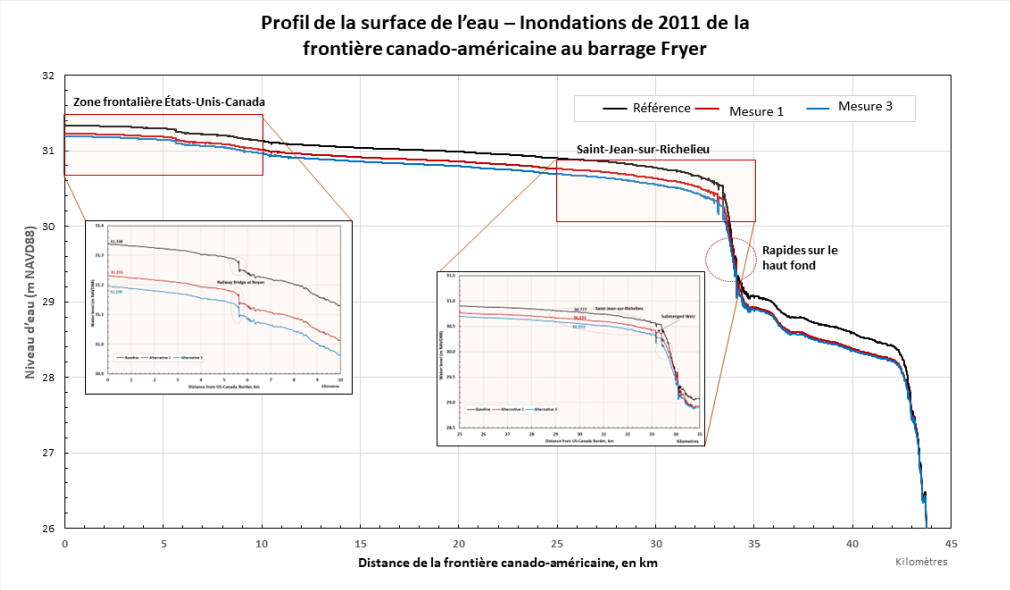


Figure 32. Impacts des mesures 1 et 3 sur les niveaux d'eau à la frontière canado-américaine, dans les conditions d'inondation de 2011.

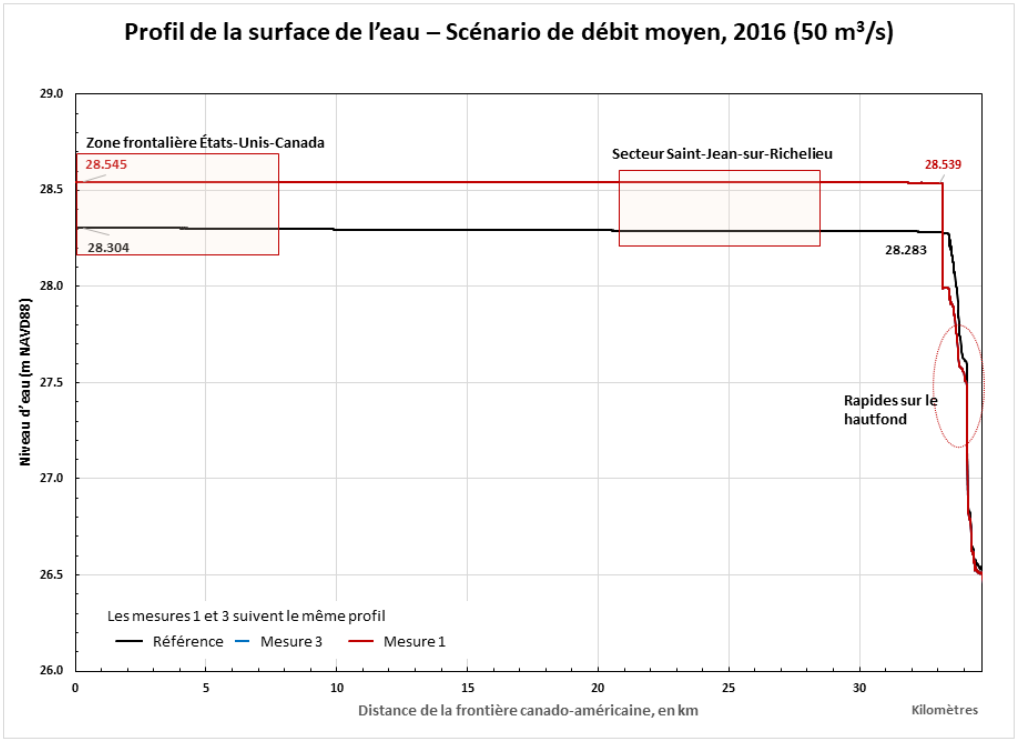


Figure 33. Impacts des mesures 1 et 3 sur les niveaux d'eau à la frontière canado-américaine, dans des conditions de débit moyen.

La modélisation indique que les mesures d'atténuation proposées modifieraient le régime hydrologique à la frontière, les niveaux d'eau augmentant environ 62 % du temps et diminuant pour les 38 % restants. L'essentiel de la baisse de niveau interviendrait au printemps, tandis que l'augmentation de niveau débuterait généralement à la fin de l'été (Moin et al., 2022).

Selon l'article IV du Traité relatif aux eaux limitrophes : « Les Hautes parties contractantes conviennent, sauf pour les cas spécialement prévus par un accord entre elles, de ne permettre, chacun de son côté, dans les eaux qui sortent des eaux limitrophes, non plus que dans les eaux inférieures des rivières qui coupent la frontière, l'établissement ou le maintien d'aucun ouvrage de protection ou de réfection, d'aucun barrage ou autre obstacle dont l'effet serait d'exhausser le niveau naturel des eaux de l'autre côté de la frontière, à moins que l'établissement ou le maintien de ces ouvrages n'ait été approuvé par la Commission mixte internationale. »

Les mesures 1 et 3 pourraient toutes deux favoriser une augmentation du niveau naturel des eaux à la frontière internationale. Si un promoteur (p. ex., la province de Québec, un organisme du gouvernement fédéral) a l'intention de mettre en œuvre la mesure 1 ou la mesure 3, une demande aux gouvernements peut être requise en vertu du Traité relatif aux eaux limitrophes. Les gouvernements peuvent ensuite examiner la demande et déterminer si l'approbation du projet est requise en vertu du Traité. Dans l'affirmative, les gouvernements peuvent examiner et approuver eux-mêmes les effets par le biais d'une entente spéciale, ou transmettre la demande à la CMI pour examen et approbation. Dans un cas comme dans l'autre, le gouvernement fédéral de chaque pays consulterait étroitement, l'un la province de Québec et l'autre les États du Vermont et de New York.

4.2.6 Recommandations

Le Groupe d'étude recommande à la CMI d'informer les gouvernements de la possibilité d'abaisser quelque peu les niveaux de crue, de l'ordre de 10 cm aux abords du lac et de 15 cm à Saint-Jean-sur-Richelieu pour un événement semblable à celui du printemps 2011, et de rehausser les niveaux d'étiage lors d'une sécheresse. Il faudrait, pour cela, ramener le régime hydrique au niveau du haut-fond de Saint-Jean-sur-Richelieu le plus près possible de son état naturel par le retrait de certains artefacts qui ralentissent l'écoulement, par l'excavation d'une partie du haut-fond et par l'installation d'un seuil submergé (réversoir) en amont, à proximité du haut-fond de Saint-Jean-sur-Richelieu (mesure 1).

Il serait également possible de réduire davantage les niveaux de crue en combinant l'enlèvement des artefacts, l'excavation sélective du haut-fond et l'aménagement d'un seuil submergé, à l'utilisation d'une dérivation de l'eau par le canal de Chambly. Celle-ci, d'un débit modéré, permettrait un abaissement total du niveau maximal de l'eau de 15 cm dans le lac et de 20 cm à Saint-Jean-sur-Richelieu lors d'un événement semblable à la crue du printemps 2011 (mesure 3). Bien que cette mesure, qui prévoit une dérivation de l'eau par le canal de Chambly, soit moins performante économiquement, elle permettrait de réduire davantage le niveau d'eau en cas de crue majeure et devrait donc être proposée aux gouvernements.

D'après l'évaluation des preuves de concept, le Groupe d'étude est d'avis que ces solutions structurelles modérées sont techniquement réalisables et socioéconomiquement acceptables. L'examen limité des effets sur l'environnement des deux solutions de nature structurelle envisageables a donné des résultats encourageants.

Si les gouvernements décident de mettre en œuvre une solution de nature structurelle, il y aura lieu d'en analyser les répercussions des deux côtés de la frontière au vu des composantes sociales, politiques, environnementales, juridiques et économiques liées à la conception et à l'exploitation de la structure retenue.

Le Groupe d'étude recommande que la CMI encourage les gouvernements à appliquer un mécanisme binational de gouvernance en vue de surveiller la mise en œuvre et l'exploitation de toute solution structurelle retenue. Le mandat du mécanisme de gouvernance binational pour la mesure 1 ou 3 devrait porter notamment sur les fonctions suivantes :

- Définition, par les deux pays, de la conception finale du seuil submergé et de l'excavation du haut-fond ainsi que des performances à atteindre.
- Conception et mise en œuvre d'un programme binational de gestion adaptative.
- Instauration d'un processus décisionnel binational en réponse au programme binational de gestion adaptative.

De plus, les fonctions suivantes s'appliquent à la mesure 3 :

- Définition, par les deux pays, de la conception finale de la dérivation d'eau par le canal de Chambly et des exigences de performance qui s'y rattachent.
- Mise en œuvre d'un plan binational de gestion de l'eau associé à la conception finale.
- Supervision de l'application et des décisions liées à l'exploitation de la dérivation.

4.3 STOCKAGE EN AMONT (BASSIN VERSANT) POUR ENTRAVER LES DÉBITS ET RÉDUIRE L'AMPLEUR DES CRUES (THÈME 2)

Situés à l'interface entre les écosystèmes terrestres et les ressources hydriques, comme les cours d'eau et les aquifères peu profonds, les milieux humides sont une partie des réseaux de drainage. Ils ont une incidence sur les écoulements en surface et en subsurface par la modification des processus hydrologiques dont une évapotranspiration accrue, le stockage de l'eau et l'alimentation de la nappe phréatique. Ces interactions ont amené les chercheurs et les planificateurs fonciers à établir des liens entre certains services hydrologiques et les milieux humides, comme la régularisation du débit mise en évidence par l'amplification des débits minimums et l'atténuation des débits maximums. Dans les bassins hydrographiques où les crues sont récurrentes, la capacité naturelle de stockage des milieux humides constitue un atout de taille.

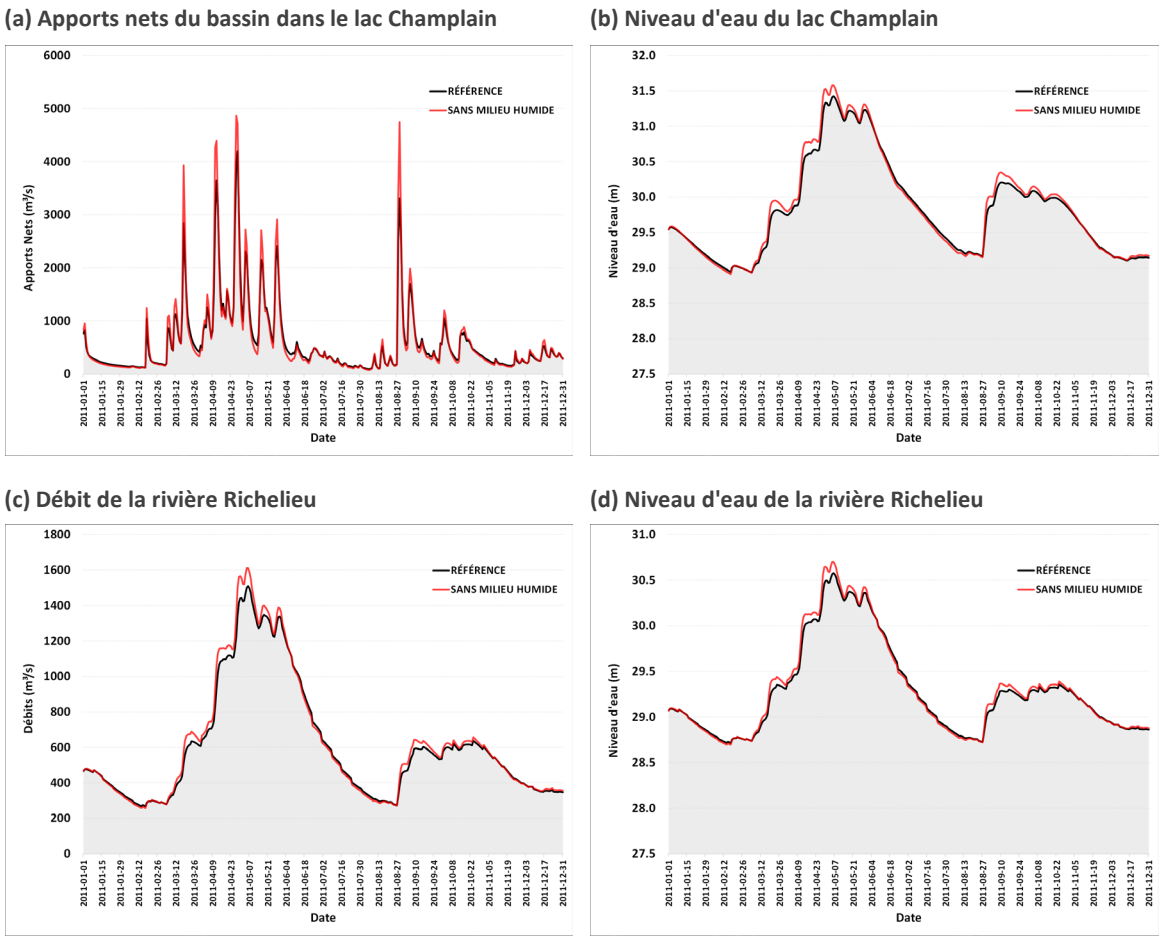
Plusieurs approches pourraient offrir des mesures d'atténuation des inondations pour protéger les zones critiques du bassin LCRR (Rousseau et al., 2021) :

- Permettre à l'eau de s'écouler naturellement dans la plaine inondable tandis que le niveau passe au-dessus des berges (c.-à-d. stockage actif-passif).
- Permettre que l'eau soit retenue naturellement dans le paysage terrestre ou dans des plans d'eau désignés (c.-à-d. stockage passif).
- Diriger l'eau à l'aide de batardeaux, de digues, de canaux et d'autres structures afin qu'un volume prédéterminé soit acheminé vers des terres désignées, loin des zones à protéger (c.-à-d. stockage actif).

La création et la restauration des milieux humides dans le bassin LCRR ont été étudiées en tant qu'approches de stockage passif visant à réduire à la fois le débit de pointe et, dans une moindre mesure, le volume d'eau de ruissellement. Des études de modélisation hydrologique ont montré que les milieux humides réduisent généralement les débits sur la branche montante de l'hydrogramme de crue, qu'ils atténuent le débit de pointe et augmentent légèrement les débits sur la branche descendante (Rousseau et al., 2021).

L'Étude s'est penchée sur les effets des approches passives et actives en matière d'atténuation des crues dans le bassin LCRR. Plus précisément, les chercheurs ont évalué la possibilité : i) de stocker les eaux de crue dans des zones agricoles riveraines, et ii) d'utiliser les milieux humides existants, restaurés et réaménagés des affluents des sous-bassins versants du Vermont et de New York pour réduire le volume des eaux de ruissellement, le débit de pointe et les apports nets du bassin dans le lac Champlain. Il est à noter que le mandat de l'Étude portait essentiellement sur le lac Champlain et la rivière Richelieu et qu'il n'incluait pas la lutte contre les inondations locales causées par les tributaires.

La plateforme de modélisation hydrologique de l'étude, PHYSITEL/HYDROTEL, a été utilisée pour ces évaluations (Rousseau et al., 2021) afin de quantifier les services hydrologiques (régulation du débit) fournis par les 1 551 km^2 de milieux humides existants du bassin du lac Champlain. Les milieux humides existants jouent un rôle clé dans l'atténuation des débits maximums et des crues, ainsi que dans l'augmentation des débits minimums dans les sous-bassins hydrographiques du bassin LCRR. Les milieux humides ont donc une incidence quotidienne sur les ANB et les niveaux d'eau du lac Champlain, et ils modifient indirectement le niveau et le débit de la rivière Richelieu. Les simulations du modèle ont clairement démontré que les milieux humides ont une fonction d'atténuation du débit et du niveau d'eau en aval lors d'événements de débit élevé. L'étude a évalué les impacts potentiels qui auraient pu se produire lors des inondations de 2011 si les milieux humides n'avaient pas existé. La figure 34 présente les hydrogrammes simulés pour l'épisode de 2011 en fonction de la condition de référence (milieux humides existants) et en l'absence de milieux humides.



**Les observations sont affichées en noir et les simulations en rouge.*

Figure 34. Incidence de l'absence de milieux humides sur les apports dans le lac Champlain (apports nets du bassin) et le niveau d'eau, ainsi que sur les débits et le niveau d'eau de la rivière Richelieu dans les conditions de 2011.

D'après les résultats de l'étude, les milieux humides existants peuvent occasionner une réduction du débit maximum annuel des 20 affluents du lac Champlain de 9 % à 52 % en moyenne (tableau 8, Rousseau et al, 2021). Ces réductions de débit des affluents abaissent les apports d'eau dans le lac Champlain et dans la rivière Richelieu et entraînent une réduction des niveaux d'eau élevés annuels dans le lac Champlain (12 cm; 4,7 po) et la rivière Richelieu (9 cm; 3,5 po). Lors de la crue du printemps 2011, le niveau d'eau de pointe du lac Champlain aurait été de 15 cm plus élevé et celui de la rivière Richelieu de 12 cm plus élevé en l'absence des milieux humides existants, comme le montre le tableau 9 (Rousseau et al., 2021). Les milieux humides existants contribuent également à l'amplification des faibles débits. Il est donc très important de préserver et de protéger les milieux humides existants.

Tableau 8. Atténuation des débits élevés grâce aux milieux humides actuels (Rousseau et al., 2021).

BASSIN VERSANT (% milieux humides)	ATTÉNUATION		
	MIN	MAX	MOYENNE
Great Chazy (14%)	16%	51%	36%
Little Chazy (14%)	25%	55%	42%
Dead Creek (24%)	32%	65%	47%
Saranac (12%)	11%	39%	25%
Salmon (8%)	16%	47%	29%
Little Ausable (7%)	12%	47%	30%
Ausable (6%)	3%	32%	17%
Bouquet (6%)	-3%	42%	23%
Putnam Creek (7%)	13%	54%	37%
La Chute (4%)	3%	22%	10%
Poultney (7%)	16%	45%	30%
Otter Creek (9%)	7%	38%	19%
Little Otter Creek (12%)	31%	67%	52%
Lewis Creek (8%)	3%	44%	26%
LaPlatte (7%)	17%	50%	34%
Winooski (3%)	3%	16%	9%
Lamoille (5%)	8%	24%	17%
Missisquoi (7%)	9%	42%	23%
De La Roche (11%)	14%	57%	41%
Aux Brochets (9%)	12%	38%	26%
Réduction des apports dans le Lac Champlain	***11%***	***34%***	***22%***
Réduction du débit de la rivière Richelieu (aux rapides Fryer)	***4%***	***11%***	***6%***
Abaissement du niveau du Lac Champlain (à Rouses Point), en cm (po)	***6 (2,4)***	***26 (10,2)***	***12 (4,7)***
Abaissement du niveau de la rivière Richelieu (à la marina de Saint-Jean-sur-Richelieu), en cm (po)	***4 (1,6)***	***21 (8,3)***	***9 (3,5)***

Tableau 9. Résumé des répercussions de l'absence de milieux humides sur les apports d'eau, les niveaux d'eau et le débit de la rivière selon les conditions du printemps 2011.

Milieux humides	Bassin du lac Champlain	Rivière Richelieu
Superficie (km²) (mi²)	21 254 (8 206)	22 055 (8 515)
Superficie des milieux humides (km²) (mi²)	1 551 (599)	1 616 (624)
Aire de drainage des milieux humides (km²) (mi²)	7 749 (2 992)	7 902 (3 051)
Augmentation du pic maximum (%)	15,8 % (apports)	6,7 % (débit aux rapides Fryer)
Augmentation du niveau d'eau le plus élevé (cm) (po)	15 (5,9)	12 (4,7), à la marina de Saint-Jean

Outre qu'ils ont évalué les milieux humides existants, les chercheurs ont étudié divers scénarios d'augmentation de la superficie de milieux humides aux abords des tributaires, dans les sous-bassins versants du Vermont et de l'État de New York (figure 35), ainsi que l'inondation temporaire de terres agricoles pour stocker les eaux de crue.

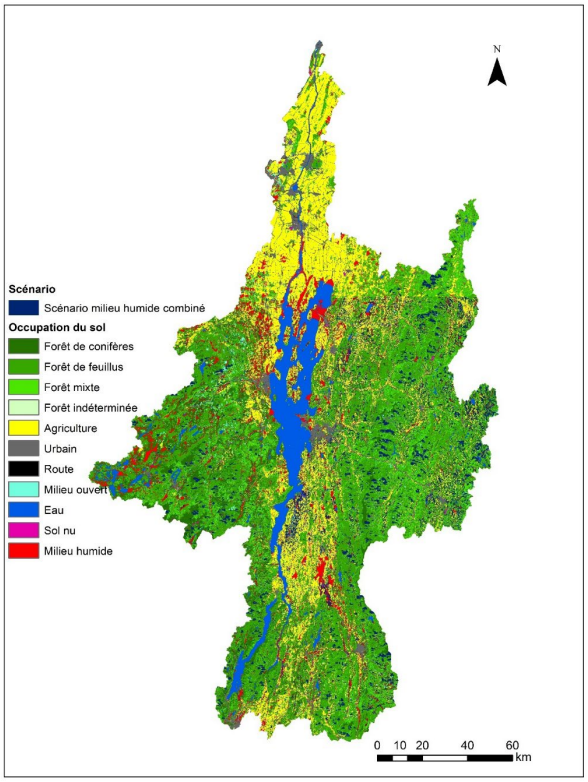


Figure 35. Zones de stockage potentiel en milieux humides (en bleu foncé).

Pour évaluer les effets potentiels d'un stockage additionnel dans les terres en amont, quatre scénarios ont été élaborés :

1. Conversion de terres agricoles en milieux humides dans une zone tampon de 1 000 m (3 280 pi) tout le long du réseau fluvial du bassin LCRR (superficie cumulative de 2 471 km² (954 mi²) dans la rivière Richelieu (à Fryer) et de 2 256 km² (871 mi²) dans le bassin du lac Champlain)

2. Conversion des dépressions topographiques locales en milieux humides (ajout de 647 km² (250 mi°) de milieux humides additionnels dans le bassin du la° Champlain)

3. Ajout de milieux humides sur terre présentant la capacité d'accumuler naturellement de l'eau en raison de la topographie et de sols mal drainés, cela à l'aide d'un ensemble de données produit par la US Environmental Protection Agency (865 km² supplémentaires, ou 334 mi²)

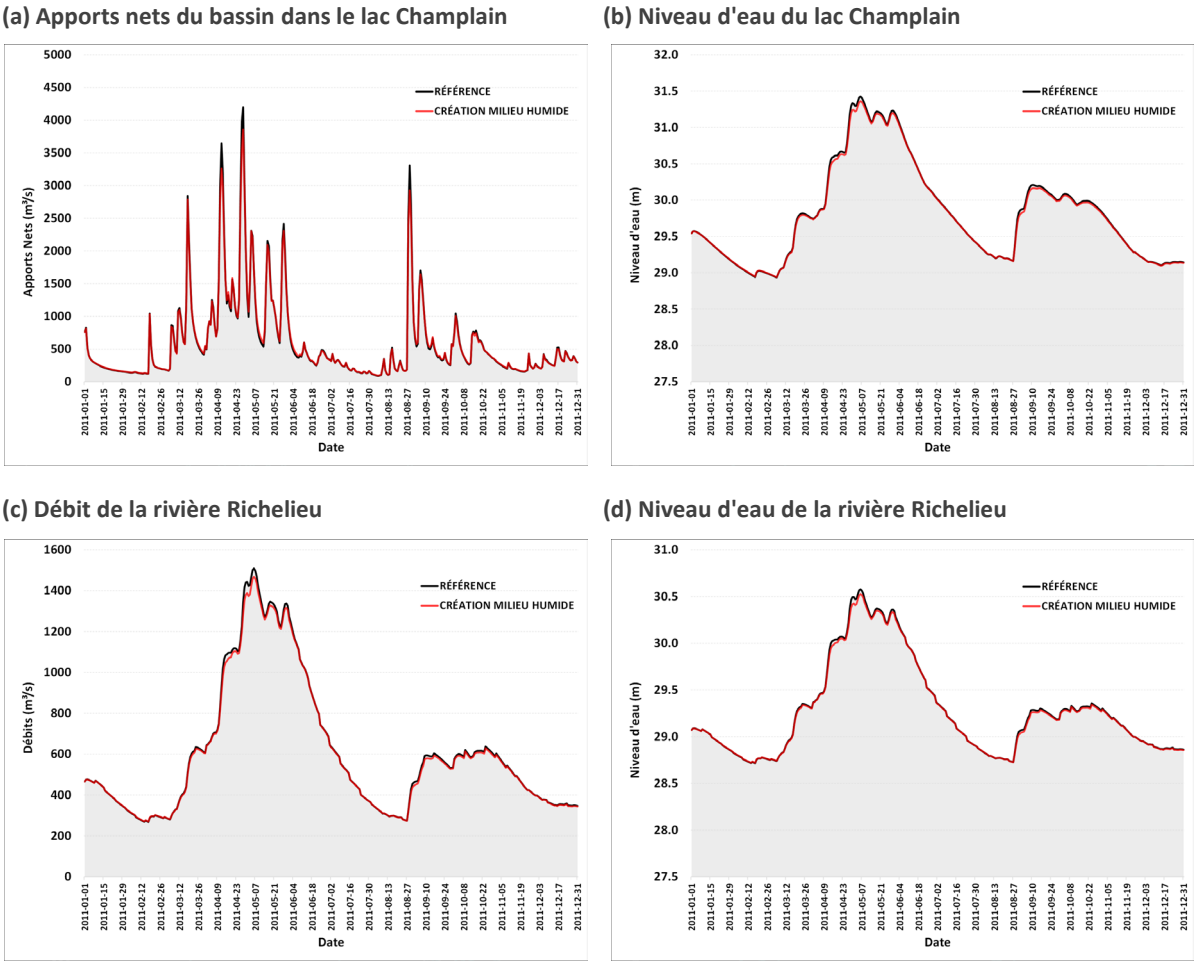
4. Combinaison des scénarios (2) et (3) (ajout total de 1 493 km², ou 576 mi², de nouveaux milieux humides).

Les quatre scénarios de stockage dans le bassin hydrographique ont mis en évidence la possibilité de réaliser des gains supplémentaires en matière de réduction des apports d'eau et du niveau du lac Champlain et, dans une moindre mesure, des débits de pointe et du niveau de la rivière Richelieu.

4.3.1 Évaluation des mesures de stockage dans le bassin hydrographique

Les modèles de l'étude ont révélé que les milieux humides existants dans le bassin LCRR ont un effet positif sur l'abaissement du niveau des inondations dans le bassin. En 2011, les milieux humides ont permis de réduire les inondations de 15 cm (6 po) dans le secteur du lac et de 12 cm (4,7 po) le long de la rivière. Cela revient à dire que la préservation des milieux humides existants est une considération importante pour les planificateurs de l'utilisation des terres dans le bassin, car les milieux humides existants exercent déjà un effet bénéfique sur le niveau des eaux lors d'inondations. L'étude a également examiné la possibilité d'ajouter des milieux humides pour réduire davantage les niveaux d'eau élevés.

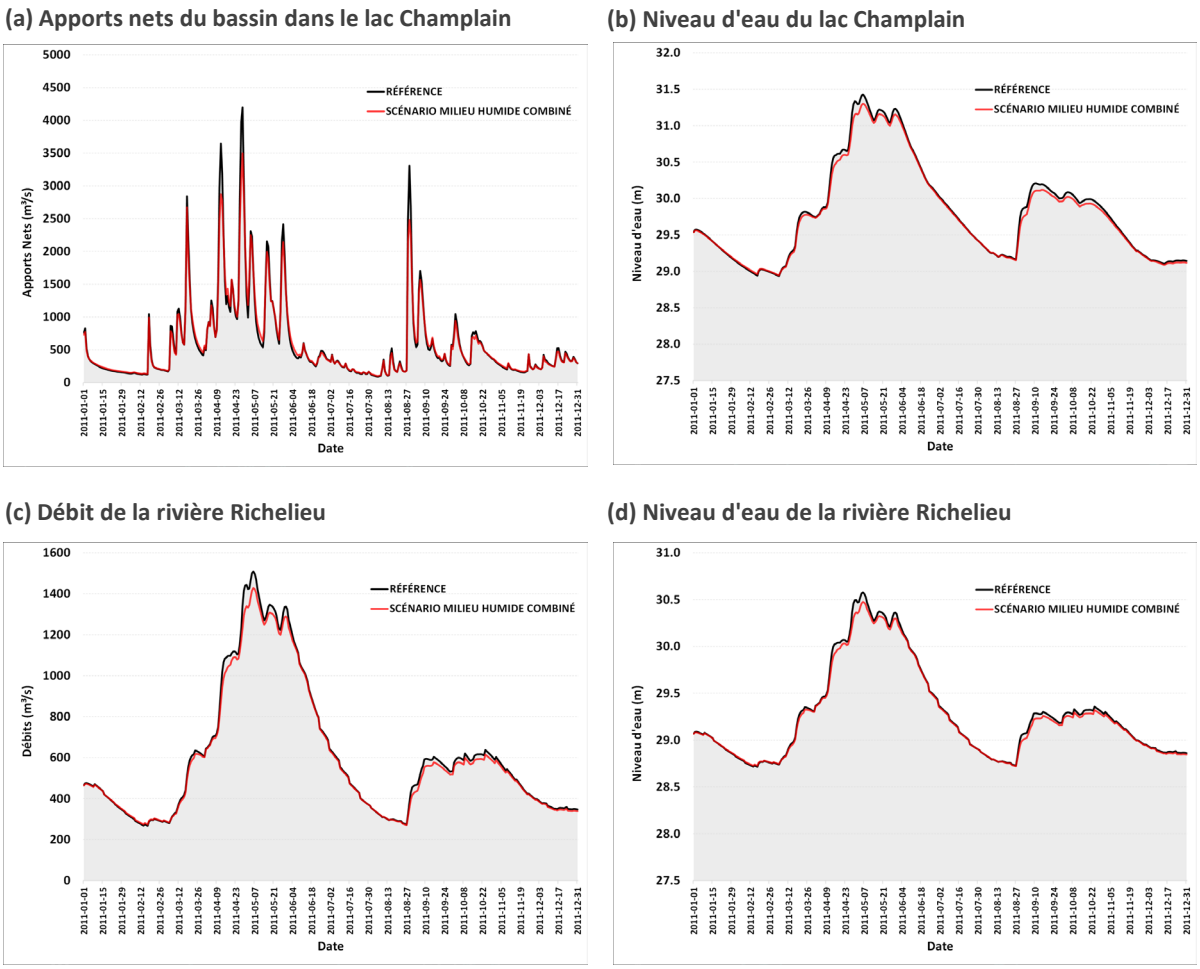
La figure 36 donne un exemple des effets de l'ajout de zones humides dans le bassin versant du lac Champlain. Plus précisément, elle illustre l'incidence d'une combinaison de scénarios relatifs aux milieux humides (par l'ajout d'une superficie totale supplémentaire de milieux humides de 652 km^2 ou 252 mi^2) sur les apports dans le lac Champlain (apports nets du bassin) ainsi que : a) sur les niveaux d'eau; b) sur le débit de la rivière Richelieu aux rapides Fryer; c) sur les niveaux d'eau à la marina de Saint-Jean, le tout en fonction des conditions de 2011. L'ajout de ces zones humides auraient pu réduire les niveaux d'eau les plus élevés lors de la crue printanière de 2011 de 6 cm dans le lac Champlain et de 5 cm dans la rivière Richelieu (Rousseau et al., 2021).



**Les observations sont affichées en noir et les simulations en rouge.*

Figure 36. Effets de l'ajout de 652 km^2 de milieux humides dans le bassin LCRR selon les conditions de 2011.

La figure 37 illustre les effets de l'ajout de milieux humides dans le bassin versant du lac Champlain. Plus précisément, elle montre l'incidence d'une combinaison de scénarios concernant les milieux humides (par l'ajout d'une superficie totale supplémentaire de milieux humides de 1 493 km^2 ou 576 mi^2) sur les apports du lac Champlain (apports nets du bassin) ainsi que : a) sur les niveaux d'eau; b) sur le débit entrant de la rivière Richelieu aux rapides Fryer; c) sur les niveaux d'eau à la marina de Saint-Jean, le tout en fonction des conditions de 2011.



**Les observations sont affichées en noir et les simulations en rouge.*

Figure 37. Effets de l'ajout de 1 493 km^2 de milieux humides dans le bassin LCRR en fonction des conditions de 2011.

Cette évaluation a fait ressortir que l'ajout de 1 493 km^2 (576 mi^2) de milieux humides permettrait d'atténuer davantage les inondations, comme le montre le tableau 10. L'ajout de ces zones humides auraient pu abaisser le débit de pointe du lac Champlain de 16,7 % et son niveau de 12 cm (4,7 po) lors de la crue de 2011. L'effet positif sur le débit de la rivière Richelieu n'aurait pas été aussi important (5,4 %), mais l'abaissement du niveau d'eau aurait été semblable (10 cm ou 3,9 po). Bien que ces avantages se situent généralement dans une fourchette semblable aux mesures recommandées du thème 1, ils nécessiteraient une augmentation de la superficie en milieux humides plus importante que la superficie du lac Champlain (1 130 km^2). Les effets additionnels des milieux humides seraient plus faibles dans des conditions d'écoulement plus typiques; l'ajout de 1 493 km^2 (576 mi^2) de milieux humides réduirait le niveau d'eau de la rivière Richelieu de seulement 6 cm (2,4 po) en moyenne (Rousseau et al., 2021). La vaste superficie supplémentaire de milieux humides requise pour réduire le niveau de l'eau rend probablement cette mesure peu pratique.

Tableau 10. Effet de l'ajout de 1 493 km² de milieux humides dans le bassin du lac Champlain sur les niveaux d'eau élevés du lac Champlain et de la rivière Richelieu.

	Lac Champlain	Rivière Richelieu
Réduction moyenne du niveau de crue	8 cm (3,1 po)	6 cm (2,4 po)
Réduction du niveau de la crue printanière de 2011	12 cm (4,7 po)	10 cm (3,9 po)

Le tableau 11 résume l'estimation de la capacité de stockage supplémentaire dans des terres en amont qui, selon l'étude, serait nécessaire pour réduire le débit de pointe d'une crue comparable à celle de 2011. Le tableau montre les aires de stockage supplémentaires qui seraient nécessaires pour réduire le débit de pointe de 2011 de 5 %, de 10 % et de 20 %, pour deux profondeurs de stockage, soit 50 cm (19,7 po) et 10 cm (3,9 po). La réduction de 5 % du débit de pointe de 2011 aux rapides Fryer nécessiterait une superficie supplémentaire de milieux humides d'une capacité de rétention de 50 cm d'eau estimée à 632 km²(244 mi²), ce qui correspond à une augmentation de 39 % de la superficie des milieux humides dans le bassin versant en amont des rapides Fryer (Rousseau et al., 2021).

De plus, selon l'analyse effectuée, la réduction de 10 % du débit maximal du printemps 2011 aux rapides Fryer nécessiterait 1 263 km² (488 mi²) de milieux humides additionnels d'une capacité de rétention de 50 cm (20 po) d'eau, ce qui correspondrait à une augmentation 39 % de la superficie de milieux humides dans le bassin versant, en amont des rapides Fryer, ou de 41 % dans le bassin versant du lac Champlain. Une diminution semblable de 10 % du débit de pointe exigerait l'addition de 6 688 km² (2 582 mi²) de milieux humides d'une capacité de rétention de 10 cm (4 po) d'eau (Rousseau et al., 2021). Ces évaluations confirment que la réduction du débit de pointe de la rivière Richelieu lors d'événements à débit élevé comme celui de la crue de 2011 nécessiterait l'ajout de zones humides particulièrement vastes. Bien qu'il existe des options autres que l'acquisition pure et simple de terres pour le stockage en milieu humide, par exemple sous la forme de servitudes, la superficie requise pour assurer un contrôle notoire des niveaux de crue dans le bassin LCRR n'en serait pas moins vaste au point de rendre probablement cette formule peu pratique pour des raisons à la fois topographiques et financières.

Les chercheurs ont également analysé la capacité de stockage d'eau sur des terres agricoles du bassin LCRR. Quatre analyses, présentées au tableau 12, ont été effectuées suivant des intrants différents. La première a consisté à déterminer la superficie de stockage qui serait nécessaire pour le volume de crue de 2011, tandis que les trois autres (2 à 4) se sont intéressées aux volumes de crue moyens dans le bassin LCRR. Leurs résultats suggèrent que le stockage de l'eau sur des terres agricoles du bassin LCRR pourrait aider à réduire les inondations futures; toutefois, de vastes superficies de terres seraient nécessaires, surtout s'il fallait stocker la majorité des eaux de crue. Comme le montre le tableau 12, le stockage du volume d'eau correspondant à une année de crues moyennes pourrait se faire sur 902 km² (348 mi²) de terres, mais la profondeur de l'eau en milieu humide serait de 1 mètre (3,3 pi), ce qui est relativement élevé. Pour réduire cette profondeur, il faudrait une superficie beaucoup plus importante. Ces évaluations laissent entendre que le stockage de grands volumes d'eaux de crue sur les terres agricoles aurait des répercussions sur une vaste superficie de terres agricoles et qu'il serait très difficile à mettre en œuvre.

Tableau 11. Estimation de la superficie supplémentaire de milieux humides ou de terres agricoles riveraines qu'il aurait fallu inonder afin de réduire le débit de pointe de la rivière Richelieu en 2011, aux rapides Fryer.

Scénario de réduction du niveau de pointe	Milieux humides additionnels km² (mi²)	Augmentation en pourcentage par rapport à la superficie existante		Pourcentage de terres agricoles inondées	
		En amont de Fryer	Bassin du LC	En amont de Fryer	Bassin du LC
Superficie de stockage additionnelle supposée pour 50 cm (19,7 po) d'eau					
5 %	632 (244)	39 %	41 %	17 %	20 %
10 %	1 263 (488)	78 %	81 %	34 %	39 %
20 %	2 527 (976)	156 %	163 %	68 %	79 %
Superficie de stockage additionnelle supposée pour 10 cm (3,9 po) d'eau					
5 %	3 344 (1 291)	207 %	216 %	90 %	104 %
10 %	6 688 (2 582)	414 %	431 %	181 %	209 %
20 %	13 376 (5 165)	828 %	862 %	361 %	418 %

Tableau 12. Capacité de stockage des terres agricoles dans le bassin LCRR .

	Crue printanière de 2011, profondeur d'eau uniforme (analyse n° 1)	Année moyenne, profondeur d'eau uniforme (analyse n° 2)	Année moyenne, profondeur d'eau uniforme (analyse n° 3)	Année moyenne, profondeur d'eau variable (analyse n° 4)
Volume de stockage (10^8 m³) (10^8 pi³)	16,12 (569)	8,915 (315)	8,915 (315)	8,915 (315)
Profondeur de l'eau (m) (pi)	0,765 (2.5)	0,423 (1.4)	1 (3,3)	7,58 (24,9)
Aire de stockage (km²) (mi²)	2,108 (814)	2 108 (814)	902 (348)	239 (92)

Il ressort des évaluations conduites que le stockage de l'eau sur des terres agricoles riveraines aurait permis d'atténuer l'ampleur des inondations en 2011. Le tableau 13 montre l'effet qu'aurait pu avoir le stockage temporaire de l'eau sur les terres agricoles riveraines dans les conditions de crue du printemps 2011. L'augmentation de la superficie de stockage d'eau à 2 256 km^2 (871 mi^2) de terres agricoles riveraines dans le bassin du lac Champlain aurait permis réduire le débit de pointe de 17,9 % et le niveau du lac de 5 cm (2 po) et aurait eu un effet semblable (4 cm ou 1,6 po de moins) sur le niveau de la rivière Richelieu (Rousseau et al., 2021). Ainsi, le stockage massif d'eau sur des terres agricoles riveraines aurait pu considérablement alléger la situation en 2011. Il convient de noter que ce scénario prévoit des aires de stockage additionnelles d'une superficie considérable, ce qui en complique la réalisation. Permettre le stockage de l'eau sur plus de 2 250 km^2 de terres agricoles riveraines nécessiterait de vastes travaux et beaucoup de temps (Rousseau et al., 2021).

Tableau 13. Résumé de l'effet du stockage d'eau sur des terres agricoles riveraines sur les apports dans le lac Champlain et sur son niveau d'eau, sur le débit de la rivière Richelieu aux rapides Fryer et sur le niveau de la rivière Richelieu (à la marina de Saint-Jean) pour les conditions de 2011.

	Bassin du lac Champlain	Rivière Richelieu
Aire de stockage, km^2 (mi^2)	2 256 (871)	2 371 (915)
Diminution du pic absolu (%)	-17,9 % (apports)	-2,0 % (débit)
Abaissement du niveau d'eau maximal	-5 cm (-2 po)	-4 cm (1,6 po)

Critères de décision

Le tableau 14 met les mesures de stockage dans le bassin hydrographique en regard des critères de décision du Groupe d'étude. Toutes les mesures en question s'inscrivaient dans la portée et le mandat de l'étude, mais il a été déterminé que la superficie additionnelle de milieux humides pour atténuer les inondations majeures dans les secteurs du lac Champlain et de la rivière Richelieu aurait été considérable (soit à peu près l'équivalent de la taille du lac Champlain). L'évaluation préliminaire des bénéfices et des coûts par le Groupe d'étude a donné à penser que chaque 100$ dollar investi n'amenait qu'un dollar de bénéfice pour réduire les niveaux d'eau à l'échelle du bassin. Cette mesure n'est donc pas pratique à mettre en œuvre selon l'échelle qui serait nécessaire pour atténuer complétement une inondation d'envergure et elle n'est pas une solution viable pour atténuer complétement les crues majeures dans les secteurs du lac Champlain et de la rivière Richelieu. Les milieux humides peuvent toutefois présenter des avantages sur le plan local et avoir des effets complémentaires.

Les rencontres avec le public et d'autres parties prenantes permettent de croire que le public appuie fermement la nécessité de protéger et de préserver les milieux humides existants. La plupart des membres du public ont également convenu que les milieux humides ne peuvent, à eux seuls, résoudre les problèmes d'inondation, ce qui est conforme à la recommandation du Groupe d'étude. Comme le public appuie fortement les milieux humides en matière de lutte contre les inondations et qu'il comprend les autres services écologiques que ces milieux fournissent, il n'est pas surprenant que le Groupe d'étude ait également entendu un certain nombre d'observations à ce sujet. Certains membres du public étaient d'avis qu'une recommandation plus ferme concernant l'expansion des milieux humides serait justifiée, ou ont exprimé le souhait que l'on reconnaisse davantage le fait que la superficie historique des milieux humides dans le bassin LCRR a été considérablement réduite en raison des changements survenus dans l'utilisation des terres par les humains. Pour certains membres du public, le fait de ne pas recommander d'ajouter des milieux humides pour réduire les inondations pourrait décourager les efforts continus de restauration de tels milieux, et quelques membres du public étaient d'avis que l'analyse de l'étude sous-évaluait l'importance des milieux humides, puisque qu'elle n'avait porté que sur l'abaissement du niveau du lac. Le Groupe d'étude a fait remarquer que les milieux humides offrent des avantages importants, comme la modulation du débit, particulièrement à l'échelle locale, et il encourage la protection et la restauration des milieux humides dans le cadre d'une approche globale de gestion des inondations.

Comme elles exigeraient de vastes étendues de terres et seraient particulièrement coûteuses, ces mesures n'ont pas été jugées viables sur les plans technique et économique au titre de la réduction à grande échelle des inondations, de sorte qu'elles n'ont pas été envisagées en tant que solutions autonomes raisonnables. Cela étant posé, les autres critères de décision du tableau 14 n'ont pas été évalués, ce qui ne revient pas à dire que ces mesures n'apporteraient pas, par exemple, des avantages environnementaux ni une résilience face aux changements climatiques.

Tableau 14. Évaluation des critères de décision du Groupe d'étude en regard des mesures de stockage dans le bassin hydrographique.

	Critères de décision du Groupe d'étude						
Mesure	Dans les limites de la portée et du mandat de l'étude	Techni-quement viable	Économi-quement viable	Respectueux de l'environnement	Équitable et juste	Résilience aux changements climatiques	Réalisable
Stockage sur terres agricoles : 2 256 km² (871 mi²)	✓	✗	✗				
Stockage en milieux humides : 647 km² (250 mi²)	✓	✗	✗				
Stockage en milieux humides : 865 km² (334 mi²)	✓	✗	✗				
Stockage en milieux humides : 1 493 km² (576 mi²)	✓	✗	✗				

Le vert indique une évaluation positive et le rouge une évaluation négative. Les cellules non colorées n'ont pas été évaluées.

Néanmoins, l'étude a démontré que les milieux humides existants offrent une aide non négligeable en matière de réduction des inondations, et que les inondations du printemps 2011 auraient été bien pires en l'absence de ces milieux humides. Pour cette raison les milieux humides existants doivent être préservés et protégés. D'un point de vue strictement technique, tout milieu humide additionnel pourrait contribuer à l'atténuation des inondations grâce au stockage passif de l'eau. Cependant, l'ajout de milieux humides et l'inondation de terres agricoles nécessiteraient la transformation et l'acquisition de grandes superficies de terres. Favoriser la restauration et l'aménagement de milieux humides plutôt que l'inondation de terres agricoles serait une solution socialement acceptable pour renforcer la résilience au fil du temps dans le bassin, du moins à l'échelle du sous-bassin hydrographique local (Rousseau et al., 2021).

L'un des legs du projet est un nouvel outil disponible dans PHYSITEL qui permet d'identifier les aires potentielles de stockage d'eau à partir d'une estimation préalable du volume des eaux de ruissellement à capter. Cet outil, propre à cette étude, est facilement accessible et il peut être appliqué à n'importe quel sous-bassin hydrographique du lac Champlain et de la rivière Richelieu. La mise en œuvre de tout scénario de stockage d'eau à grande échelle nécessiterait des travaux sur le terrain à long terme, mais offrirait certainement des avantages sur le plan hydrologique (Rousseau et al., 2021).

L'étude du bassin LCRR reconnaît également les avantages supplémentaires que représentent des stratégies multiples pour réduire globalement les inondations dans le réseau LCRR. L'optimisation du

stockage de l'eau dans le bassin versant, grâce aux effets cumulatifs de nombreuses pratiques de stockage de moindre envergure, contribuera à ramener le régime hydrologique du bassin à un état plus proche de l'état naturel et, bien que difficiles à quantifier individuellement, ces pratiques auront un effet cumulatif et positif sur le stockage dans le bassin versant et contribueront donc à réduire progressivement les inondations aux abords du lac. Le Groupe d'étude du bassin LCRR invite les gouvernements à poursuivre la mise en œuvre de pratiques comme celles-ci pour contribuer à atténuer les problèmes d'inondation aux abords des tributaires locaux et pour soutenir l'effort global visant à réduire les impacts des inondations dans le réseau LCRR.

4.3.2 Recommandations

Le Groupe d'étude recommande que la CMI encourage les gouvernements à continuer de protéger les milieux humides actuels, car ils contribuent à atténuer les inondations par un abaissement du niveau maximal des eaux de 15 cm dans le lac Champlain et de 12 cm dans la rivière Richelieu lors d'inondations comparables à celles du printemps 2011, pour les collectivités riveraines du lac Champlain et de la rivière Richelieu.

Le Groupe d'étude a déterminé que, sans la création d'une très grande superficie (650 km^2 ou plus) de nouveaux milieux humides, il ne peut y avoir d'atténuation significative des inondations pour les collectivités riveraines du lac et de la rivière Richelieu lors d'inondations majeures. Par conséquent, le Groupe d'étude ne recommande pas de poursuivre une stratégie d'acquisition de terres et de création de milieux humides comme politique spécifique de gestion efficace des inondations pour les collectivités riveraines du lac et de la rivière Richelieu.

Toutefois, le Groupe d'étude reconnaît que les milieux humides réduisent l'ampleur des inondations locales le long des tributaires, qu'ils soutiennent la biodiversité et procurent d'importants avantages connexes pour l'environnement. Ainsi, le Groupe d'étude souhaite encourager les gouvernements à continuer de protéger les milieux humides existants et, dans la mesure du possible, à restaurer ceux qui sont dégradés et à en créer de nouveaux. Le Groupe d'étude reconnaît les avantages supplémentaires et cumulatifs de plusieurs stratégies de réduction globale des inondations dans le réseau du lac Champlain et de la rivière Richelieu. Le Groupe d'étude encourage les gouvernements à poursuivre la mise en œuvre de pratiques qui auront un impact positif sur le stockage d'eau dans les bassins versants, qui allégeront les problèmes d'inondation dans les affluents locaux et qui contribueront à l'effort global visant à réduire les impacts des inondations dans le réseau du bassin LCRR.

4.4 AMÉLIORATION DES INTERVENTIONS EN CAS D'INONDATION (THÈME 3)

Les solutions non structurelles des thèmes 3 et 4 visent à réduire la vulnérabilité aux niveaux d'eau élevés et à renforcer la résilience aux inondations grâce à de meilleures stratégies de préparation, d'intervention et de rétablissement. La vulnérabilité est la combinaison de l'exposition et de la sensibilité. L'exposition aux inondations est prise en compte dans la cartographie des zones inondables et des zones inondées. Il est important de noter que les éléments exposés à un aléa peuvent être à la fois tangibles (p. ex., personnes, bâtiments, écosystèmes, etc.) et intangibles (p. ex., cohésion sociale, attrait, sentiment de sécurité) (Morin, 2008).

Le thème 3 porte sur les stratégies et les mesures d'atténuation et d'adaptation liées à la préparation aux urgences et à l'intervention lors des événements. Un certain nombre de mesures possibles ont été proposées durant l'étude, notamment : l'amélioration des outils de prévision des crues en vue d'améliorer le temps d'intervention et la préparation aux situations d'urgence au moyen de mesures comme l'installation de sacs de sable et l'érection de murs de protection; la réduction des risques par une mobilisation efficace et l'évacuation rapide; la protection des populations vulnérables et le maintien des services essentiels.

Les stratégies appliquées par le Groupe d'étude pour traiter de ces sujets ont débouché sur plusieurs produits. Citons : un nouvel ensemble de modèles pouvant servir à produire des prévisions des crues à cinq jours; l'outil de vulnérabilité sociale ISEE, et de nouveaux modèles de projection des régimes d'inondation selon des scénarios de changements climatiques.

4.4.1 Prévision des crues

Les inondations autour du lac Champlain et de la rivière Richelieu ont eu des effets dévastateurs sur le domaine bâti, les routes et le domaine agricole. Des prévisions exactes peuvent aider les collectivités à mieux planifier les menaces potentielles et à réduire les dommages avant que les niveaux de crue ne soient atteints. Le Groupe d'étude a aidé des organismes canadiens et américains à élaborer des modèles améliorés de prévision des crues permettant d'avoir une meilleure idée de ce que pourraient être les inondations futures (moment des épisodes et impacts), avec pour conséquence d'améliorer les interventions en cas d'inondation.

Le terme « système de prévision des crues » est assez général et englobe tout un éventail de technologies et d'activités intervenant dans le travail de prévision. Pour simplifier, un système de prévision des crues fournit régulièrement des produits de prévision des conditions de crue (en particulier le débit des cours d'eau, le niveau et la profondeur d'eau, et l'étendue des crues qui en résultent). Ces produits peuvent varier de simples prévisions à court terme des niveaux d'eau en des lieux précis à des produits plus complexes, comme une carte de la profondeur de l'eau assortie d'une probabilité d'occurrence (par exemple, 75 % de probabilité de non-dépassement). Un lien peut ensuite être établi entre être établi avec les répercussions des inondations, comme le nombre de bâtiments inondés, les installations essentielles touchées, les pertes prévues et des problèmes semblables; toutefois, ces répercussions dépassent généralement la portée des prévisions elles-mêmes et sont donc exclues de l'analyse présentée ici. Pour fournir de tels produits, le système de prévision des crues doit continuellement exécuter des simulations à partir de divers modèles (principalement hydrologiques et hydrodynamiques) de sorte à convertir les prévisions et les conditions météorologiques du bassin versant en « prévisions des crues ». Les prévisionnistes en hydrologie surveillent les résultats et alimentent le système de prévision des crues pour produire une prévision officielle émise par le gouvernement qui peut ensuite être diffusée aux usagers.

L'étude a évalué les systèmes de prévision des crues en vigueur au Québec et aux États-Unis (HHC, 2022). La prévision des crues dépend fortement de l'évolution dans l'espace et dans le temps des conditions météorologiques telles que la température, les précipitations liquides et congelées et le rayonnement solaire. Dans ce contexte, la National Oceanographic and Atmospheric Administration (NOAA), aux États-Unis, et Environnement et Changement climatique Canada (ECCC), au Canada, utilisent des systèmes de prévisions météorologiques numériques qui se classent parmi les meilleurs au monde. L'information produite est mise à la disposition des organismes responsables de la production et de la diffusion des prévisions, des directives et des avertissements relatifs aux inondations au moyen d'un portail de données ouvertes.

Aux États-Unis, la NOAA est la seule autorité fédérale à fournir des prévisions, des directives et des avertissements sur les crues. Au Canada, la prestation de prévisions, de directives et d'avertissements relatifs aux crues est une responsabilité provinciale. Pour la partie nord du bassin LCRR, située dans la province de Québec, l'autorité responsable est le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements climatiques (MELCC). Chaque organisme est responsable d'émettre des prévisions des crues officielles pour son territoire respectif et de produire des prévisions binationales cohérentes pour l'ensemble du bassin LCRR (figure 38). Il n'existe pas de prévisions officielles binationales uniques dans le cas des crues. Les experts qui ont examiné les programmes ont indiqué que des prévisions indépendantes seront maintenues dans les systèmes de prévision des crues recommandés dans le futur. Cependant, les diverses composantes scientifiques (c.-à-d. les modèles) devraient continuer d'être améliorées et déployées à l'occasion d'un travail en collaboration entre ECCC, la NOAA et le MELCC.

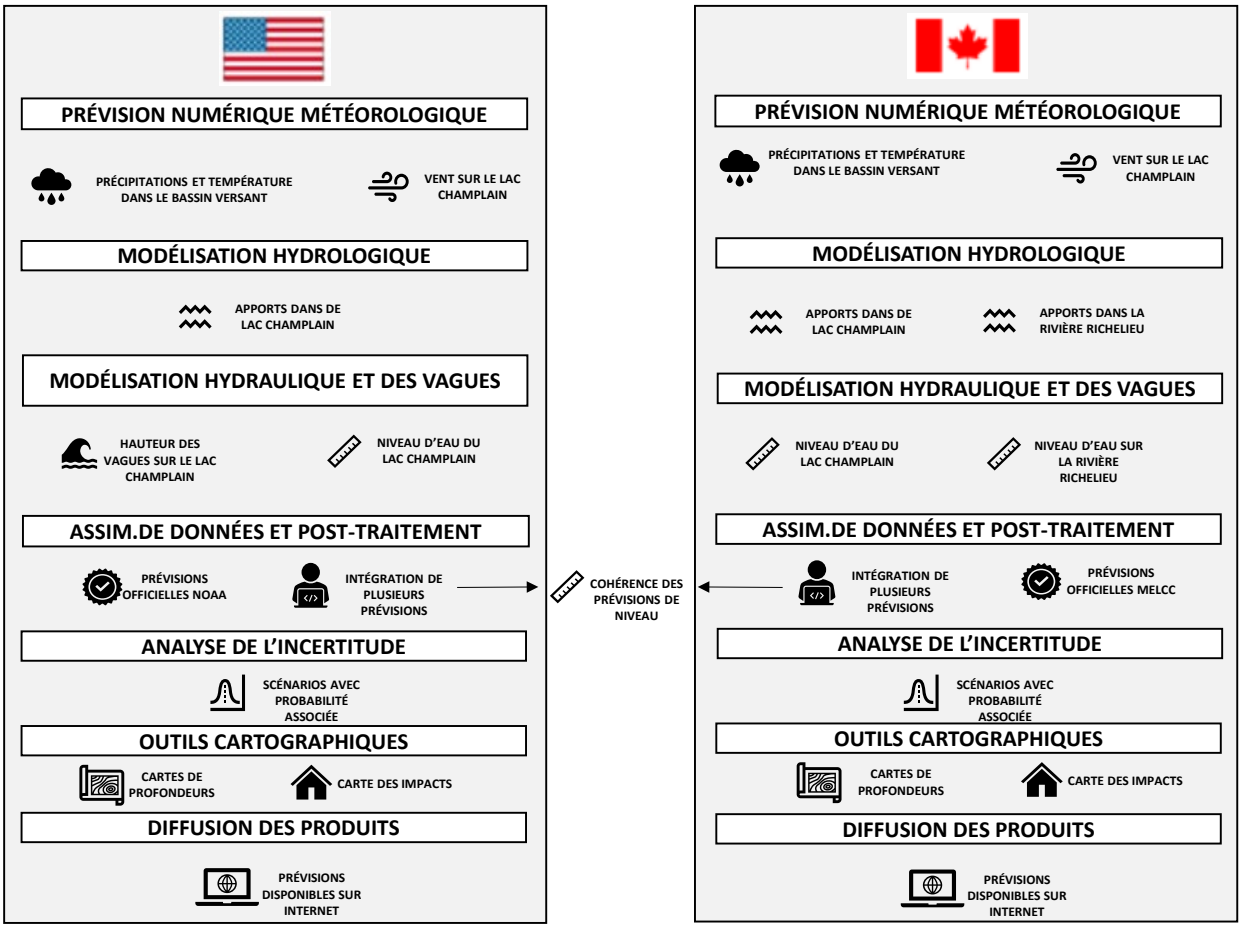


Figure 38. Schéma de la structure actuelle et des liens entre les systèmes de prévision des crues des États-Unis et du Québec et du Canada.

Des améliorations ont été apportées à de nombreux composants au cours de l'étude sur le bassin LCRR. Aux États-Unis, des modèles hydrologiques améliorés ont été créés pour le bassin LCRR; ces améliorations de la modélisation augmentent la capacité de produire des prévisions de crues pour les tributaires du lac Champlain. Un nouveau système expérimental (figure 39) produit des prévisions du niveau du lac, ainsi que de la circulation et des vagues dues au vent dans le réseau du lac Champlain et de la rivière Richelieu. Ces prévisions, qui varient sur le plan géographique, constituent une preuve de concept d'un avertissement précoce de crues dans la région. Au Canada, une partie des exigences a déjà été recensée ou le sera sous peu. En particulier, la production de prévisions hydrologiques à long terme à l'aide des prévisions météorologiques d'ensemble est déjà opérationnelle à ECCC (prévisions d'ensemble pour le bassin LCRR à un horizon de 32 jours). Ce système a été amélioré grâce à l'assimilation de données provenant de différent limnimètres (ECCC, USGS et MELCC). De plus, le MELCC a travaillé sur les améliorations requises en matière de post-traitement par l'ajout de l'effet du vent à l'aide du modèle STE (Loiselle et al., 2021). Les applications de cartes de prévision des crues vont également bon train, et le MELCC a déjà commencé à appliquer les résultats de l'étude, notamment les résultats hydrodynamiques d'H2D2 dans le cadre de son projet Info-Crue.

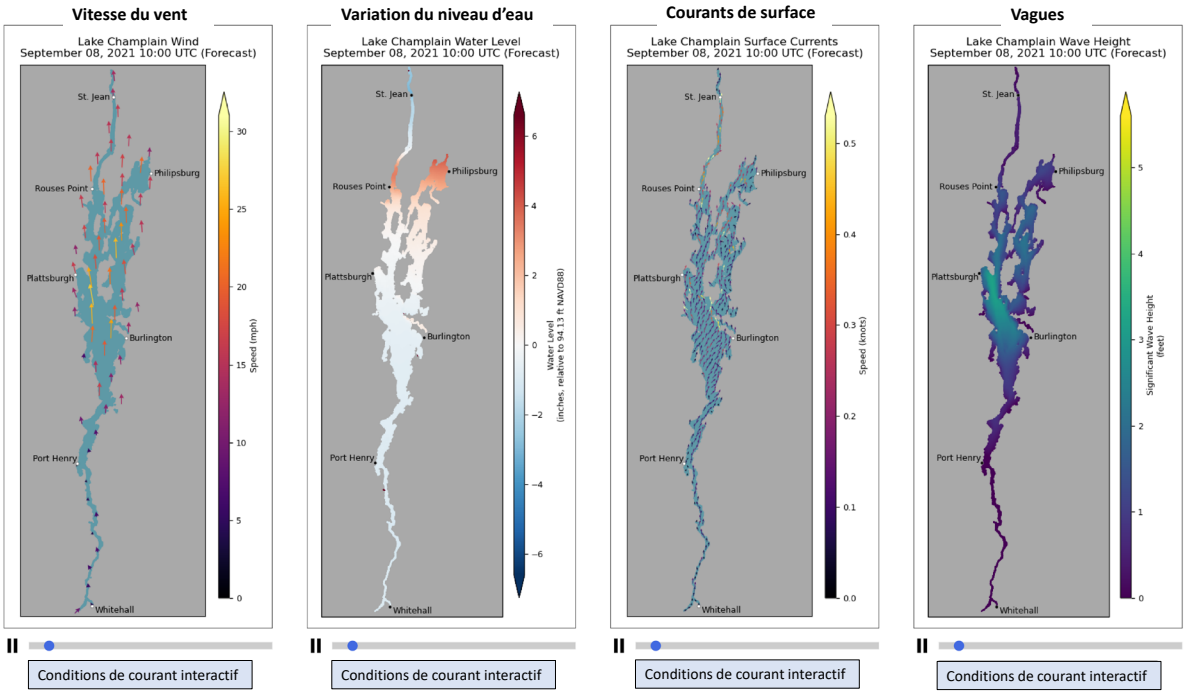


Figure 39. Exemple d'améliorations apportées à la prévision des crues pour le lac Champlain .

Une évaluation des besoins des usagers (Moin et al., 2022) a fait ressortir que les produits de prévision souhaités doivent comprendre des cartes de zones inondables à court terme assorties de probabilités d'occurrence ou de dépassement des limites d'inondation, ainsi que de graphiques de niveau-débit à long terme donnant une idée du risque d'inondation avec des fourchettes de probabilité.

Le système de prévision des crues recommandé exploiterait les modèles élaborés ou améliorés au cours de l'étude (ou des modèles semblables) lesquels sont aptes à saisir les processus pertinents aux prévisions dans le bassin LCRR, comme l'accumulation de neige en hiver et le moment et le volume projetés de la fonte des neiges, les apports dans le lac Champlain, le débit de la rivière Richelieu et les effets du vent et des vagues sur le réseau hydrographique. Ces modèles individuels et l'utilisation coordonnée de groupes de modèles dans les prévisions (prévisions d'ensemble) aideraient l'évaluation de l'incertitude et la cartographie des inondations associées aux prévisions, comme le souhaitent les usagers.

L'analyse de l'écart entre ce qui se fait actuellement et les systèmes recommandés a permis d'établir que les modèles requis sont arrivés à maturité et qu'ils sont tout à fait prêts à être mis en œuvre. Des recherches seront encore nécessaires sur la méthodologie à appliquer (éventuellement fondée sur des approches faisant appel à l'intelligence artificielle) pour intégrer des prévisions multiples, mais entre-temps, il serait possible de s'en remettre aux prévisionnistes pour trouver une approche pratico-pratique. Bien qu'il n'existe pas d'obstacles techniques majeurs, il est important de souligner que les divers organismes (NOAA, ECCC et MELCC) évoluent selon des contextes institutionnels, des procédures opérationnelles et des systèmes différents et qu'ils ne pourront pas tous progresser au même rythme relativement à la mise en œuvre de toutes les recommandations. Comme les services de prévision sont déjà disponibles et qu'ils sont dotés d'un mécanisme intégré d'amélioration continue, il n'est pas nécessaire de recommander de date butoir pour la réalisation de cet aspect.

Par ailleurs, le cadre de fonctionnement actuel permettant aux organismes concernés de travailler chacun de son côté convient également au système recommandé. Aucun incitatif technique ne justifie d'imposer un mode plus formel de fonctionnement conjoint, car aucun travers n'a été constaté sur ce plan dans les opérations actuelles. Les divers organismes (ECCC, MELCC et NOAA) doivent s'échanger les données nécessaires pour maintenir la coordination des prévisions. Si l'on devait mettre en œuvre une ou plusieurs mesures d'atténuation de nature structurelle, il faudrait que les modèles hydrauliques utilisés pour le système de prévision des crues incluent des règles de gestion et les effets de la dérivation, si celle-ci est retenue. Les prévisions devront également être facilement accessibles par le gestionnaire de la dérivation.

L'étude sur le bassin LCRR de la CMI a permis d'élaborer un ensemble d'outils appropriés et de les rendre disponibles pour mettre en œuvre les systèmes de prévision des crues recommandés. Il reste encore du travail à faire pour favoriser l'application de ces outils en condition opérationnelle, mais aucune difficulté technique majeure ne s'oppose à ce que les divers organismes concernés les reprennent à leur compte.

4.4.2 Vulnérabilité sociale

La méthode d'analyse de la vulnérabilité[23] consiste à évaluer, à calculer et à cartographier la sensibilité sociale à partir de quatre indices thématiques, soit la sensibilité sociale, la sensibilité territoriale, la capacité d'adaptation, et l'accessibilité des infrastructures. Cette notion de sensibilité est définie comme étant la proportion dans laquelle un élément exposé, une collectivité ou une organisation est susceptible d'être touché par la survenue d'un aléa (Morin, 2008).

[23] Une analyse de vulnérabilité sociale a été réalisée au Canada et aux États-Unis en 2018 et en 2019. D'abord élaborée par l'équipe canadienne de l'EPS, la méthodologie a ensuite été reproduite aux États-Unis (SPE, 2022).

L'analyse de la vulnérabilité, combinée à une analyse du risque d'inondation, permet de caractériser le risque (Aléa x Vulnérabilité = Risque) (figure 40). Il est essentiel de connaître le risque pour parvenir à des stratégies et à des mesures d'atténuation et d'adaptation appropriées et robustes, ainsi qu'à une meilleure résilience des collectivités.

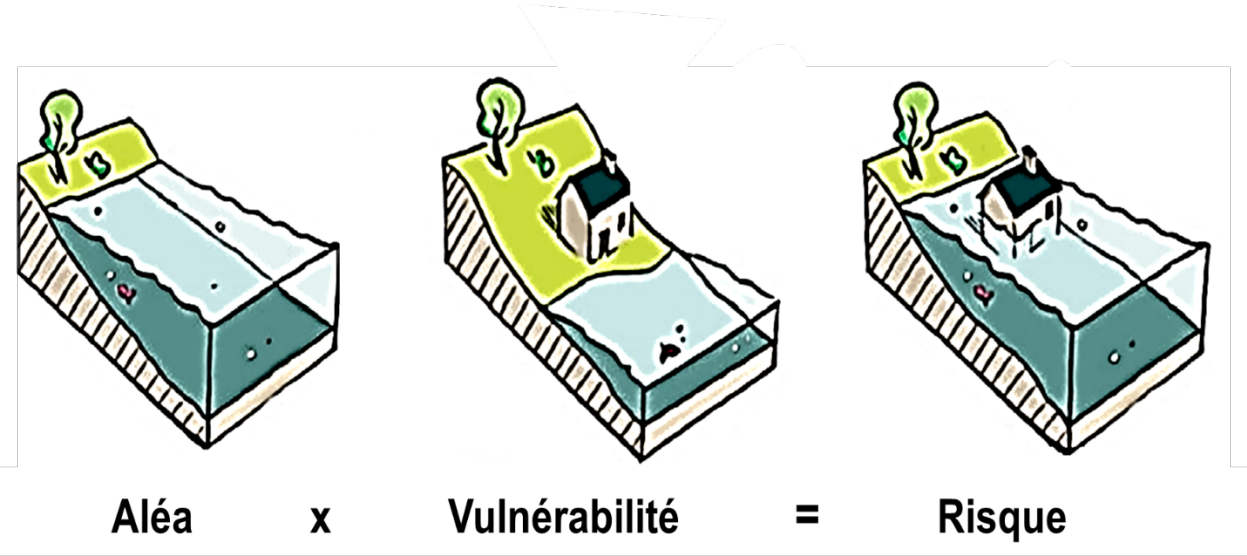


Figure 40. Cadre d'analyse des vulnérabilités. Adapté de SPE (2022).

En plus des améliorations apportées aux systèmes de prévision en place au Québec et aux États-Unis, les chercheurs se sont penchés sur des outils qui pourraient permettre d'aller plus loin que la fourniture d'informations sur les aléas d'inondation (étendue des inondations et profondeur d'eau) et d'aider les intervenants d'urgence locaux à se préparer aux inondations à venir. L'Étude a élaboré une démarche d'évaluation du risque d'inondation à partir d'un modèle alimenté par des données comme les niveaux d'eau dans un scénario d'inondation précis et les dommages prévus en fonction de la vulnérabilité d'une zone. Comme il est alimenté par des données de grande précision, le système intégré social, économique et environnemental (ISEE) permet de calculer les dommages causés aux biens immobiliers, bâtiment par bâtiment, et d'estimer les impacts économiques, sociaux et environnementaux des changements de régime des niveaux d'eau.

Le système ISEE (figure 41) intègre les risques sociaux tels que la vulnérabilité et peut générer des cartes et des informations comme l'étendue des inondations, la profondeur de l'eau, les accès routiers et l'emplacement des personnes à risque, autant d'éléments qui peuvent améliorer les interventions d'urgence en cas d'inondation. L'une des principales caractéristiques d'ISEE est qu'il fournit des renseignements très précis (par exemple, pour un édifice, une route ou une propriété donnée), ce qui peut être très utile à la fois pour les interventions d'urgence et pour la planification à plus long terme.

Figure 41. Outil de cartographie du système intégré social, économique et environnemental (ISEE).

Les chercheurs ont réalisé une analyse de la vulnérabilité sociale et communautaire dans le bassin LCRR qui a porté sur l'exposition, la sensibilité sociale, la sensibilité territoriale, la capacité d'adaptation et l'accessibilité des collectivités dans les zones inondables aux abords du lac et de la rivière. Cette analyse a permis de produire des cartes de sensibilité couvrant l'ensemble du bassin et de recommander des mesures à prendre localement (SPE, 2022).

4.4.3 Évaluation des mesures d'intervention en cas d'inondation

Les *observations recueillies lors des ateliers d'évaluation des besoins municipaux*[24]de l'étude ont également montré que les administrations municipales appuient les mesures du thème 3 et, plus particulièrement, qu'elles ont besoin de prévisions anticipées et de produits cartographiques pratiques. Les participants ont souligné toute l'utilité des prévisions de crues à cinq jours pour mieux préparer la population, en particulier la population vulnérable. Des prévisions à plus long terme (soit à 3 semaines, en tenant compte de l'accumulation de neige et des prévisions météorologiques à long terme) pourraient même être une incitation à entreprendre des préparatifs peu coûteux et à communiquer le risque probable à la population afin qu'elle participe aux activités de préparation. Il convient de noter que les prévisions à long terme de conditions météorologiques et hydrologiques très variables ne seront utiles que si elles sont combinées à des mises à jour successives permettant de réduire l'incertitude des projections. Les produits cartographiques ont été jugés utiles pour améliorer la distribution des sacs de sable, pour le balisage des voies d'évacuation, pour personnaliser la communication des risques, quartier par quartier, et pour déterminer le moment de décréter l'évacuation. Dans l'ensemble, les administrations municipales estimaient être bien préparées. Depuis 2011, la situation dans la région a changé : certaines routes ont été surélevées et des bâtiments ont été modifiés. Ces données n'ont pas toujours été reprises dans les outils fournis et il sera donc important de les mettre à jour systématiquement pour refléter la réalité sur le terrain (SPE, 2022).

Les recommandations du thème 3 ont suscité un grand intérêt chez les parties prenantes (SPE, 2022). Toutefois, il sera important de régulièrement mettre les données à jour. Les parties prenantes ont aussi évoqué la nécessité d'équiper les agences et les organismes fédéraux, étatiques, provinciaux et locaux pour qu'ils soient en mesure d'utiliser, d'entretenir et de mettre à niveau ces outils (SPE, 2022). Les parties prenantes ont soulevé des questions au sujet du financement et de la coordination entre les organismes responsables d'héberger les nouveaux outils de prévision et de modélisation. D'autres questions ont été posées au sujet du degré de coordination requis entre les organismes et de la façon dont les résultats des modélisations seront communiqués à d'autres organismes, aux autorités locales et aux usagers du public. Enfin, les élus et les fonctionnaires ont reconnu la nécessité de renforcer les dispositions concernant les plaines inondables et leur application. Il s'agit d'une composante du thème 4, mais elle recoupe le thème 3. Un programme ciblé de renforcement des capacités pourrait contribuer à rendre les recommandations relatives au thème 3 plus acceptables du point de vue politique (SPE, 2022).

L'un des temps forts des présentations sur les principales constatations et conclusions de l'étude a été le grand intérêt affiché par le public, les intervenants d'urgence et les représentants municipaux pour les améliorations susceptibles d'être apportées à la prévision des crues, selon le Groupe d'étude. Le public appuie fortement la recommandation de maintenir la coordination entre les administrations et d'assurer l'uniformité des prévisions. Certains membres du public et planificateurs ont exprimé le souhait d'obtenir des prévisions à plus long terme, pour autant que cela soit possible.

Enfin, les municipalités et d'autres groupes ont manifesté leur intérêt à l'égard de l'utilisation de produits de cartographie statique élaborés par l'Étude pour un large éventail de niveaux potentiels de crue, afin d'appuyer la planification d'urgence et la préparation aux inondations.

[24] L'atelier d'évaluation des besoins municipaux a consisté en quatre séances de travail entre décembre 2020 et mars 2021 auxquelles ont participé des représentants municipaux et régionaux ainsi que des représentants du ministère de la Sécurité publique du Québec (MSP) (SPE, 2022).

4.4.4 Recommandations

Le Groupe d'étude recommande que tous les renseignements météorologiques et hydrologiques produits aux États-Unis par la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) et, au Canada, par Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) et par le Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) soient mis à la disposition des organismes de chaque pays responsables de la production et de la diffusion des prévisions, des guides et des avertissements relatifs aux inondations, et qu'ils soient utilisés par ces organismes.

- Il y a lieu d'encourager la poursuite et le resserrement de la collaboration entre les divers organismes concernés, soit la NOAA, ECCC et le MELCC, de sorte à garantir que toutes les données de prévision disponibles et leurs interprétations soient partagées en temps réel. Il est question, à terme, que les prévisions officielles de chaque côté de la frontière soient de la meilleure qualité possible et qu'elles s'accompagnent d'une interprétation concertée et cohérente de part et d'autre de la frontière.

- Il y a lieu de continuer d'utiliser et d'améliorer les outils de modélisation et de prévision élaborés pour le bassin du lac Champlain et de la rivière Richelieu, car ils pourraient grandement faciliter la planification des interventions en cas d'inondation. Ces outils ont montré qu'il est possible d'étendre l'horizon prévisionnel et de fournir de nouveaux produits opérationnels pertinents aux parties prenantes du bassin, tels que ceux renseignant sur la montée des eaux, sur l'effet des vagues, sur l'étendue et la profondeur des inondations, et sur leurs impacts sur les berges, par exemple : routes coupées, vulnérabilités sociales et coûts.

Ainsi, les gouvernements sont encouragés à favoriser la mise en œuvre des outils de modélisation et de prévisions améliorés, ainsi que de systèmes cohérents d'évaluation des risques. Ils sont aussi invités à en assurer l'entretien et l'utilisation continue après l'Étude. Les outils, les données et la documentation d'appui produits par l'étude sur le bassin LCRR devraient être transférés aux organismes appropriés au Canada et aux États-Unis, au plus tard en mars 2023.

Afin d'appuyer la préparation aux inondations, il conviendrait de mettre à la disposition de toutes les parties intéressées, au plus tard en mars 2023, les simulations d'inondations de diverses amplitudes et les cartes connexes produites par le Groupe d'étude.

4.5 PRATIQUES DE GESTION DES PLAINES INONDABLES (THÈME 4)

La gestion des risques d'inondation (GRI) est une approche stratégique qui vise à accroître la résilience des collectivités aux inondations. Elle comprend la mise en œuvre d'une série d'outils stratégiques destinés à prévenir et à réduire les aléas d'inondation, à limiter l'exposition aux inondations et à atténuer la vulnérabilité sociale aux impacts des inondations. Étant donné que des inondations encore plus importantes que celles de 2011 demeurent possibles dans le bassin LCRR, il est nécessaire d'adopter des stratégies de GRI pour réduire et gérer les risques d'inondation en atténuant l'exposition et la vulnérabilité des personnes, des biens et des infrastructures. Les stratégies doivent être guidées par des principes généraux et leur mise en œuvre doit s'appuyer sur une combinaison d'outils stratégiques complémentaires.

Les stratégies de réduction et de gestion des risques d'inondation devraient cibler : 1) l'aléa d'inondation, c'est-à-dire l'inondation de terres habituellement sèches; 2) l'exposition des personnes, des biens, des infrastructures et de l'activité économique à l'intérieur ou à proximité de la zone où existe des aléas d'inondation; 3) la vulnérabilité des personnes et des biens aux dommages causés par les inondations. Ces stratégies doivent être intégrées à des échelles qui sont liées aux propriétés physiques du réseau hydrographique.

4.5.1 Outils de gouvernance

Quatre outils doivent être inclus dans une stratégie intégrée de GRI.

1. Les **cartes des risques d'inondation** sont une ressource précieuse pour la GRI, mais elles doivent être conçues pour cibler des publics précis et donner les résultats escomptés, et elles doivent intégrer plus de détails et des technologies de pointe (Alberti-Dufort, 2022a).

2. Les **campagnes de communication sur les risques d'inondation** peuvent stimuler la souscription à des assurances, encourager la gestion locale des urgences et informer les acheteurs potentiels de propriétés à risque, mais les messages doivent être conçus en fonction de pratiques exemplaires (Henstra et McIlroy-Young, 2022).

3. **Le risque d'inondation futur devrait orienter l'utilisation et l'occupation des terres**. Toutefois, il existe un risque d'inondation pour les secteurs déjà aménagés, de sorte qu'il y a lieu de réaliser des investissements visant à réduire le risque de dégâts dus aux inondations quand cela se justifié (Alberti-Dufort, 2022b).

4. L'**assurance inondation** peut être un outil efficace pour accélérer la reprise après des i**nondations**, mais pour obtenir une couverture étendue, il faudra que le gouvernement et le secteur privé partagent les risques et la responsabilité (Shabman, 2022).

Si, comme c'est le cas actuellement, ces outils sont envisagés et appliqués différemment par les deux pays ou les deux États et la province, cela ne posera aucun problème de nature transfrontalière. La capacité de mise en œuvre de chacun de ces outils d'un point de vue politique et la mesure dans laquelle il peut être appliqué varient selon le contexte local.

Le premier outil stratégique est la cartographie des risques d'inondation qui est déterminante en ce qui a trait à la participation et à la responsabilisation de toutes les parties concernées par la gestion des risques d'inondation. Par le passé, les cartes dressées pour la gestion des plaines inondables visaient principalement à illustrer les aléas d'inondation. Par la suite, une attention croissante a été accordée à la question de la vulnérabilité dans les zones inondables, l'insistance portant sur la nécessité de mieux comprendre les différentes composantes exposées aux inondations, comme les particuliers, le parc immobilier, les activités économiques, les infrastructures essentielles, le patrimoine naturel et autres, cela afin de favoriser la prise de meilleures décisions de planification. La cartographie des risques d'inondation permet de comprendre les risques, elle aide à la planification de l'utilisation des terres, elle appuie la prise de décisions et aide à la préparation des interventions en cas de catastrophe, outre qu'elle est un outil de sensibilisation et d'information pour toutes les parties prenantes concernées par les risques d'inondation (décideurs, citoyens, urbanistes, assureurs, etc.) (Alberti-Dufort 2022a). Il est techniquement possible d'élaborer des cartes d'inondation plus précises comportant notamment des renseignements altimétriques sur les premiers étages des structures situées dans les plaines inondables. Des projets pilotes sont en cours au Québec. Les progrès réalisés en cartographie semblent être politiquement acceptables, ces technologies n'ayant pas soulevé une forte opposition. Cependant, les améliorations de la cartographie peuvent être coûteuses et longues, et les professionnels travaillant sur l'atténuation des inondations doivent être formés pour utiliser ce type d'outil.

Le deuxième outil stratégique est un programme amélioré et ciblé de communication des risques. La communication des risques d'inondation peut en effet permettre d'atteindre de nombreux objectifs liés à la gestion des plaines inondables, notamment parce qu'elle est une façon pour le gouvernement de s'acquitter de sa responsabilité d'informer les citoyens et de les faire participer à la gestion des risques d'inondation. Ce faisant, le gouvernement peut inciter la population à

prendre des mesures pour réduire les risques d'inondation, l'amener à mieux comprendre les répercussions sociales et économiques potentielles des inondations, renforcer le soutien du public et des instances politiques à l'égard de la réglementation concernant l'aménagement des plaines inondables, et sensibiliser les résidents à la nécessité de souscrire à une police d'assurance inondation (Henstra, 2022). L'application de pratiques exemplaires en matière de communication des risques d'inondation peut amener le public à mieux comprendre les enjeux et à parvenir à une gestion plus judicieuse des risques d'inondation dans le bassin du lac Champlain et de la rivière Richelieu (Henstra et McIlroy-Young, 2022). Cette recommandation semble réalisable sur le plan technique. À l'échelle nationale, des améliorations sont en train d'être apportées à la communication des risques d'inondation. Cela concerne notamment la cartographie des risques 2.0 de la FEMA aux États-Unis et l'ajout, sur les sites Web du secteur de l'immobilier à l'échelle nationale, d'un système d'évaluation de l'exposition des biens aux inondations. Dans le bassin LCRR, la faisabilité de cet aspect pourrait être contestée. Il demeure que, pour les parties prenantes, les programmes de communication sur les inondations sont un outil important dans le bassin versant. Par exemple, connaître le risque qu'une maison soit inondée peut mener à apporter des changements pour protéger la propriété et le bien-être de la famille qui l'habite (SPE, 2022). Des communications ciblées permettraient également aux citoyens de mieux comprendre les décisions des autorités en matière d'aménagement du territoire et, éventuellement, les mesures collectives de protection contre les inondations.

Le troisième outil stratégique consiste à renforcer la gestion de l'occupation des plaines inondables et à élaborer des solutions d'adaptation durables visant à réduire l'exposition et la vulnérabilité aux inondations. Idéalement, il faudrait réduire le nombre de personnes, d'éléments bâtis et de services situés dans les plaines inondables. La gestion de l'occupation des plaines inondables peut englober plusieurs stratégies d'aménagement du territoire dont l'interdiction d'occupation des lieux, la réinstallation, les mesures d'adaptation et la protection (Alberti-Dufort, 2022b). Les choix de planification doivent être fondés sur plusieurs facteurs, comme le niveau de risque, la tolérance au risque ou les coûts, la durabilité, les autres contraintes de développement (p. ex., l'étalement urbain, le patrimoine historique) et les avantages associés à une solution particulière (Alberti-Dufort, 2022b). Cette proposition est techniquement réalisable, parce que les administrations locales gèrent couramment les plaines inondables par le biais de leurs règlements de zonage et codes du bâtiment, et qu'elles tiennent compte de l'aménagement et de l'utilisation de ces zones en vertu d'une planification exhaustive de l'utilisation des terres. De plus, il existe des mécanismes de gouvernance pour modifier et mettre à jour ces instruments de politique et de planification. Les administrations locales du bassin LCRR semblent être d'accord avec la nécessité de planifier en fonction des inondations et de miser sur la résilience, mais elles craignent les obstacles à la mise en œuvre et à l'application des outils de politique pour atteindre ces objectifs; par exemple, des exceptions sont souvent accordées aux exigences de zonage et des codes du bâtiment, et les plans globaux ainsi que les plans d'aménagement du territoire ne sont que des documents d'orientation qui ne soutiennent que très peu les efforts d'application de la loi. Afin de favoriser la possibilité de mise en œuvre de ces outils d'un point de vue politique, il serait utile de renforcer les moyens à déployer pour ce faire et de mieux sensibiliser les élus locaux, les membres des conseils d'aménagement du territoire et les promoteurs immobiliers locaux (SPE, 2022).

Le dernier outil stratégique est celui des programmes d'assurance qui doivent être plus robustes. Le National Flood Insurance Program des États-Unis offre aux propriétaires, aux locataires et aux entreprises une assurance inondation qui leur procure une protection financière en fonction des risques d'inondation. Aux États-Unis, l'assurance inondation n'est normalement pas incluse dans les polices résidentielles courantes, mais elle peut être achetée à part. La participation au programme est facultative, mais peut être exigée par les prêteurs hypothécaires dans le cas de propriétés situées dans des zones inondables à risque élevé (https://www.fema.gov/flood-insurance, consulté le 4 mai 2022). Aux États-Unis, la FEMA a récemment promulgué le programme Risk Rating 2.0. L'Étude a déterminé que ce programme était parfaitement acceptable du point de vue politique, car il apporte des solutions à de nombreux problèmes qui accablaient l'ancien programme d'assurance de la FEMA. Au Québec et au Canada, la tendance est maintenant à la mise en place d'un programme d'assurance inondation, bien que la faisabilité de ce projet des points de vue technique et politique ne soit pas garantie, car il en est encore à l'étape de la proposition (SPE, 2022). Les analyses de l'Étude sur les avantages potentiels d'un régime d'assurance inondation présentent un intérêt particulier pour certaines parties prenantes. Le Groupe d'étude, en consultation avec Sécurité publique Canada, a élaboré un cadre pour un modèle d'assurance à trois niveaux (ou paliers) qui pourrait être appliqué dans l'ensemble du bassin LCRR (Shabman, 2022). Le cadre repose sur le concept de polices d'assurance dommages qui a fait l'objet d'une promotion au Canada (dans des rapports récents du Bureau d'assurance du Canada et de Sécurité publique Canada) et aux États-Unis.

Le tableau 15 résume les trois volets du programme d'assurance (Shabman, 2022). Aux États-Unis, où le programme d'assurance inondation est un peu mieux établi, ce concept pourrait être appliqué en utilisant le programme actuel d'assurance inondation au palier 2.

Tableau 15. Les trois paliers du cadre d'assurance inondation.

Palier 1	Palier 2	Palier 3
Le gouvernement provincial encadre la création et l'offre d'une assurance à indemnisation limitée Les indemnités sont fixées selon certains paramètres Tous les biens de la collectivité sont assurables Un droit pourrait être versé à un « fonds communautaire de secours en cas d'inondation » Tous les propriétaires fonciers peuvent se retirer de la protection, sous réserve de certaines conditions	Les assureurs privés offrent aux propriétaires de résidences assurables dans les régions aujourd'hui jugées à risque élevé une assurance à caractère indemnitaire plafonnée La protection est offerte par un pool de coassureurs privés Des escomptes accordés sur les primes sont fondés sur le revenu avec paiements de péréquation des revenus Couverture incluse dans la police contre des risques particuliers, avec option de retrait	L'admissibilité à l'aide post-sinistre prend effet quand les dommages dépassent le plafond du deuxième palier. L'aide post-sinistre est offerte aux assurés ayant décliné le recours aux premier et deuxième paliers L'aide post-sinistre peut être fondée sur le revenu en fonction de la valeur marchande des biens immobiliers, des revenus et de biens non immobiliers

4.5.2 Mise en œuvre

La mise en œuvre efficace d'une stratégie de GRI exige de comprendre les politiques et les programmes en place, d'en évaluer l'efficacité actuelle, puis de déployer des outils stratégiques complémentaires destinés à améliorer la résilience des collectivités dans la zone d'étude du bassin LCRR. La mise en œuvre peut être améliorée par un travail de consultation, de mobilisation et de collaboration, de même que par la clarification et le partage des responsabilités en matière de GRI et par la surveillance et l'évaluation des résultats. C'est en association avec les mesures d'atténuation définies en vertu des autres thèmes de l'étude que la stratégie de gestion des risques d'inondation trouvera toute son efficacité. Par exemple, il y aura lieu de maintenir les avantages de la réduction des niveaux d'eau lors d'inondations par la planification adaptative de l'utilisation des terres et à la gestion des plaines inondables, en particulier par la limitation de l'utilisation des terres dans les zones protégées par des solutions de nature structurelle. La notion de répartition équitable des effets des mesures stratégiques du thème 4 préoccupe particulièrement les propriétaires de maisons privées, et il y aurait lieu de faire en sorte que la résilience aux inondations soit une priorité stratégique intégrée dans les plans complets, les plans d'aménagement du territoire, les règlements municipaux, les règlements de zonage et les autres instruments qui orientent la prise de décisions à l'échelle locale.

4.5.3 Évaluation des pratiques de gestion des plaines inondables

Au Canada, les premiers sondages et questionnaires réalisés en 2018 et 2019 au titre de l'analyse de la perception des risques ont montré que le thème 4 (gestion des plaines inondables) était le plus populaire des quatre thèmes (SPE, 2022). En 2019, la plupart des acteurs locaux de quatre municipalités ayant participé à des groupes de discussion ont déclaré qu'il existe déjà un ensemble de règles de base encadrant la gestion des plaines inondables, mais ils souhaiteraient disposer de plus d'options d'adaptation. Ils aimeraient voir des changements dans les techniques de construction, des rénovations plus résilientes et des règlements plus clairs. Aux États-Unis, l'occupation des plaines inondables est également un thème important. Dans les enquêtes sur la perception du risque des ménages, les répondants ont manifesté un fort appui à l'égard de l'exigence d'une assurance inondation et du maintien du développement hors de la plaine inondable (SPE, 2022).

S'agissant des mesures du thème 4 et des recommandations provisoires formulées à son égard, lors de la période de consultation, les parties prenantes et le public se sont généralement entendus pour dire que l'amélioration de la communication sur les risques d'inondation serait grandement bénéfique pour les collectivités. Le Groupe d'étude a aussi pris acte de l'intérêt suscité par ses travaux en matière d'assurance inondation. De nombreuses parties prenantes se sont dit d'avis que la généralisation de l'assurance inondation serait la seule façon de disposer d'un fonds d'indemnisation suffisant en cas d'inondation; d'autres, en particulier des représentants du publics au Canada, qui connaissent moins bien le fonctionnement des régimes d'assurance inondation, ont posé des questions ou exprimé des inquiétudes sur la façon dont on pourrait établir et mettre en œuvre un régime d'assurance inondation qui soit équitable et abordable.

4.5.4 Changements climatiques

Comme nous l'avons vu, bien que les changements climatiques soient susceptibles d'abaisser le niveau moyen du lac Champlain et le débit de la rivière Richelieu au cours du XXIe siècle, la région sera toujours vulnérable à des méga-crues de plus grande ampleur que celles de 2011. La meilleure façon d'y faire face consiste à planifier les interventions d'urgence et à appliquer des pratiques de gestion des plaines inondables, plutôt que de recourir à des mesures de nature structurelle coûteuses.

L'impact potentiel des changements climatiques est un autre facteur important intervenant dans la gestion des risques d'inondation. L'impact des changements climatiques et la connaissance qu'on en possède peuvent influer sur la façon dont les autorités, les organisations et les citoyens appréhendent le problème en se concentrant non seulement sur les événements passés, mais aussi sur l'avenir. La perception des changements climatiques et de leur incidence sur les niveaux d'eau peut en effet modifier la façon dont les parties prenantes font le lien entre le problème et sa portée.

Dans le cadre des enquêtes auprès des ménages sur la perception des risques, des particuliers ont été invités à dire quels impacts les changements climatiques pourraient avoir sur les inondations dans leur région. Les résultats ont montré que la plupart des répondants aux États-Unis et au Canada sont préoccupés par les changements climatiques. Une majorité de répondants dans les deux pays pensent que les inondations deviendront plus fréquentes en raison des changements climatiques. La majorité des répondants aux États-Unis pensent également que les inondations s'aggraveront. Au Québec, 42,8 % de la population de la région sont d'avis que les inondations vont s'aggraver. Moins de répondants croient que les inondations dans la région deviendront moins fréquentes et moins graves sous l'effet des changements climatiques. L'un des messages forts des parties prenantes concerne la nécessité d'améliorer la communication, la mobilisation des parties prenantes et la réglementation des zones inondables (SPE, 2022).

4.5.5 Recommandations

Le Groupe d'étude recommande que la CMI encourage les gouvernements à faire le meilleur usage possible – en fonction de leur propre contexte — de l'analyse des pratiques exemplaires réalisée par l'Étude sur le bassin LCRR en matière de cartographie et de communication des risques, d'occupation de la plaine inondable et d'assurance inondation. Il serait plus précisément question :

- d'améliorer la cartographie des risques d'inondation en fonction des besoins des publics cibles. Cela comprend la mise à jour et l'ajout de détails supplémentaires aux cartes d'inondation existantes;
- d'élaborer des campagnes de communication sur les risques d'inondation adaptées à chacun des publics cibles du bassin LCRR;
- d'envisager la notion d'occupation des plaines inondables du point de vue de la résilience. Cela comprend des stratégies d'aménagement du territoire consistant : à éviter les secteurs inondés ou à composer avec ces derniers; à mettre à jour et à renforcer l'application de règlements d'aménagement du territoire en fonction du risque d'inondation, et à contrer tout développement immobilier dans les zones inondables à haut risque.
- d'explorer ou d'étendre les régimes d'assurance couvrant les risques d'inondations. Cela nécessitera une étude plus approfondie de l'état actuel de la couverture d'assurance offerte et de l'analyse de solutions d'assurance visant un partage de la responsabilité financière des dommages causés par les inondations.

De plus, le Groupe d'étude recommande que la CMI conseille aux gouvernements de maintenir les avantages d'un abaissement des niveaux de crues résultant de la mise en œuvre de mesures structurelles en appliquant une planification adaptative de l'utilisation des terres et de la gestion des plaines inondables, en particulier en limitant l'utilisation des terres dans les zones protégées par des solutions structurelles.

4.6 RENFORCEMENT DES CAPACITÉS

Comme l'environnement est en constante évolution, les autorités doivent offrir à toutes les parties prenantes l'espace nécessaire pour échanger sur leurs expériences et contribuer à l'évolution des stratégies d'adaptation. Le renforcement des capacités est un processus qui permet d'acquérir et de renforcer tout un ensemble de compétences, d'instincts, de capacités, de processus et de ressources dont les organisations et les collectivités ont besoin pour survivre, s'adapter et prospérer dans un monde en rapide évolution. Parce que le renforcement des capacités jette des passerelles entre les gens, les organisations et l'information, le Groupe d'étude recommande que les gouvernements encouragent la communication collaborative et le renforcement des capacités à divers degrés, par l'entremise de divers réseaux afin de prévenir les répercussions des inondations dans les secteurs du lac Champlain et de la rivière Richelieu ou de s'y préparer.

Le renforcement des capacités peut comprendre :

- l'amélioration des voies de communication et de collaboration entre les gouvernements du bassin et les autres parties intéressées;
- le perfectionnement professionnel du personnel dont l'expertise touche aux domaines de l'atténuation des crues et de l'atténuation des inondations; et
- d'autres initiatives visant à aider les collectivités à se préparer aux inondations, notamment en mettant à leur disposition des outils de planification et en les aidant à se préparer à des inondations plus fréquentes ainsi qu'à la possibilité d'inondations plus importantes que celles de 2011.

Le renforcement des capacités se ferait grâce à un réseau transfrontalier de professionnels des échelons fédéral, étatique, régional et local. Cela inclurait des représentants des secteurs public, privé et non gouvernemental.

4.6.1 Recommandations

Le Groupe d'étude a constaté que les différentes parties concernées par les questions touchant à l'eau dans le bassin versant du lac Champlain et de la rivière Richelieu ont souvent des façons différentes et parfois divergentes de comprendre les causes et les impacts des inondations dans le bassin. Par conséquent le Groupe d'étude recommande que la CMI encourage les gouvernements à créer des espaces où toutes les parties prenantes concernés par les questions relatives au bassin versant pourront aborder divers aspects du problème des inondations dans le bassin du lac Champlain et de la rivière Richelieu, cela afin de favoriser une meilleure entente et une plus grande collaboration entre toutes les parties prenantes.

Le Groupe d'étude recommande que la CMI encourage les gouvernements à continuer de travailler dans le sens du renforcement des capacités en vue d'améliorer les mesures d'atténuation des inondations, notamment par le biais d'initiatives destinées à aider les collectivités à prévenir les impacts des inondations ou à s'y préparer, et à mettre à leur disposition des outils de planification.

4.7 PRODUITS DÉRIVÉS DE L'ÉTUDE À L'APPUI DE LA GESTION DES INONDATIONS DANS LE BASSIN LCRR ET AILLEURS

Le Groupe d'étude a produit une mine de données et d'outils qui pourront servir à d'autres après l'achèvement de cette étude et qui feront partie de l'héritage de l'étude :

- Assemblages de données topographiques LiDAR de haute précision
- Scénarios d'apports d' eau (historiques, stochastiques, sur le climat futur)
- Références altimétriques et ensembles de données harmonisées
- Modèle de bilan hydrologique
- Modèle numérique de terrain
- ISEE (Système intégré social, économique et environnemental)
- Modèle hydrologique de l'ensemble du bassin versant
- Indicateurs de performance
- Amélioration de la prévision des crues
- Amélioration de la communication sur les risques d'inondation
- Nouveau modèle d'assurance inondation
- Outils de cartographie sophistiqués
- Cartes d'états hydrauliques statiques
- Information découlant des évaluations SPE, y compris les résultats des sondages

Plusieurs outils peuvent présenter un intérêt particulier :

- Les modèles sophistiqués de prévision des crues dans le bassin LCRR peuvent produire des prévisions en temps réel en ce qui concerne le niveau du lac Champlain, la hauteur des vagues et le niveau d'eau de la rivière Richelieu. Ces modèles peuvent être intégrés aux systèmes prévisionnels et les données peuvent être utilisées par les gestionnaires régionaux et locaux des urgences pour planifier les activités de préparation et d'intervention.

- Un nouvel ensemble de cartes statiques des plaines inondables couvre tout le bassin LCRR de Whitehall (New York) à Sorel-Tracy (Québec). Ces cartes représentaient 11 scénarios statiques couvrant l'éventail des niveaux d'eau du lac Champlain à Rouses Point de 30,349 m (99,57 pi) à 32,178 m (105,57 pi) NAVD88. Elles seront consultables en ligne sur le site Web de l'Étude LCRR à partir du début de l'année 2023 pour une période de cinq années.

- Le Cadre d'orientation sur les changements climatiques de la CMI et l'approche ascendante (Decision scaling) offrent une façon novatrice d'appuyer la prise de décisions face à l'incertitude entourant les changements climatiques futurs.

- Le système de modélisation intégré social, économique et environnemental (ISEE) de l'étude fournit des estimations plus détaillées des dommages causés par les inondations au domaine bâti que celles qui étaient disponibles jusqu'à ce jour.

- Le système ISEE peut évaluer les coûts et les avantages des investissements dans la réduction des risques dans le bassin LCRR, tels que les effets de la conception d'une assurance inondation sur la résilience des ménages aux inondations et les répercussions prévues sur les paiements d'aide en cas de catastrophe.

- Les travaux de l'étude sur la faisabilité politique et l'acceptabilité sociale des mesures d'atténuation proposées peuvent être des modèles à suivre dans les études futures.

Un comité chargé des données produites par l'Étude a été mis sur pied pour gérer certains de ces produits et fournir des conseils sur la façon d'archiver et de rendre ces produits accessibles (Comité des produits de données, 2022).

4.7.1 Recommandations

Le Groupe d'étude recommande à la CMI que les outils, modèles et données de l'étude sur le bassin LCRR nécessaires à la mise en œuvre des recommandations du Groupe d'étude soient mis à la disposition des organismes appropriés au Canada et aux États-Unis d'ici mars 2023.

4.8 OCCASIONS DE COMBINER DES MESURES

Le Groupe d'étude a reconnu que la division en quatre thèmes des approches visant à améliorer la résilience des collectivités du bassin LCRR risquait de donner lieu à la formulation de recommandations et à l'adoption d'approches déconnectées, de sorte que des efforts ont été déployés tout au long du processus pour maintenir et améliorer les liens entre les disciplines, les zones géographiques et les contextes culturels. De nombreux groupes d'experts et de résidents touchés ont contribué aux produits de l'étude dont le succès dépendra de l'instauration de consultations et de relations continues. Une composante essentielle de la réussite consistera à combiner les mesures de nature structurelle et les mesures de nature non structurelle pour gérer directement les débits élevés, et à permettre le déplacement en zones sûres des personnes et des biens à risque ou à assurer leur protection à long terme dans les situations d'urgence.

À elles seules, les mesures de nature structurelle ne peuvent pas empêcher le débordement du lac Champlain et de la rivière Richelieu dans toutes les conditions, mais elles peuvent quelque peu alléger la situation lors des pires inondations. Toutefois, afin qu'elles soient les plus efficaces possible, il convient de les appliquer en combinaison avec des approches qui réduisent l'exposition aux inondations, comme l'ajustement au fil du temps des emplacements et des détails de construction des bâtiments et d'autres structures situées sur le rivage ou à proximité, la préservation des zones humides actuelles, et l'amélioration de la façon dont les risques humains et financiers sont communiqués aux collectivités et aux particuliers et compris par les destinataires. Cela signifie qu'il n'existe pas une seule solution au problème des inondations dans le bassin LCRR, mais plutôt une série d'approches complémentaires collectivement susceptibles d'aider les collectivités du bassin LCRR à mieux se préparer aux inondations futures.

4.9 COLLABORATION BINATIONALE POUR FAIRE FACE AUX INONDATIONS DANS LE BASSIN

Aux termes du Traité relatif aux eaux limitrophes de 1909 entre le Canada et les États-Unis, les parties se sont engagées à « prévenir tous différends relativement à l'usage des eaux limitrophes et [à] régler toutes les questions qui sont actuellement pendantes entre les États-Unis et le Dominion du Canada… ». La question de la meilleure façon de gérer les débits et les niveaux dans le bassin transfrontalier du lac Champlain et de la rivière Richelieu a été abordée dans la présente étude, ainsi que la question de la collaboration avec les gouvernements et les collectivités autochtones. C'est ainsi que des experts techniques en sciences de l'eau, en génie et en sciences humaines, de même que des experts communautaires en intervention d'urgence et en planification municipale ont été consultés. Aucun particulier, ni aucune collectivité, agence ou institution ne peut, en agissant seul, mettre en œuvre efficacement les recommandations du Groupe d'étude. Des innovations susceptibles d'améliorer la gestion du réseau LCRR pourraient émaner de sources inattendues. Avec le temps, il sera possible de tirer des leçons à de nombreux niveaux sur ce qui fonctionne bien et ce qui ne fonctionne pas. Il faudra investir du temps, de l'énergie et des ressources pour continuer à améliorer et à maintenir les mesures d'atténuation des inondations qui feront de la région un endroit plus sûr et plus résilient.

5 CONCLUSION

C'est en réaction aux graves inondations ayant touché les collectivités riveraines du lac Champlain et de la rivière Richelieu au printemps 2011 que la CMI a mis sur pied le Groupe d'étude sur le bassin LCRR. Ce dernier a examiné les facteurs à l'origine des niveaux d'eau élevés et élaboré un ensemble de mesures possibles visant à réduire les dommages que pourraient occasionner de futurs épisodes de crue. Les experts de l'étude se sont penchés sur les dimensions scientifiques, techniques, environnementales et socio-économiques du problème des inondations sur une période de six ans. Ils ont formulé des recommandations qui entraîneront des changements positifs tangibles et mesurables à long terme en ce qui a trait à la réduction de la fréquence et de l'intensité des inondations ainsi que des dommages causés par ces dernières le long des rives du lac et de la rivière.

Tout au long de ses travaux, le Groupe d'étude a sollicité les commentaires des personnes qui vivent et qui travaillent dans les collectivités de la région et qui sont les mieux placées pour parler du problème, soit les résidents, les dirigeants communautaires, les premiers intervenants, les agents immobiliers, les groupes communautaires et environnementaux, et les peuples autochtones. L'Étude a également permis de communiquer avec les gouvernements fédéraux, des États et de la province pour comprendre ce que leurs programmes peuvent offrir et l'aide dont ils auraient besoin. Ces considérations sociales, politiques et économiques essentielles ont été intégrées à la conception et à l'application de nouveaux modèles scientifiques afin d'évaluer les mesures de réduction des inondations, d'améliorer la prévision des crues, d'optimiser la gestion des plaines inondables et de déterminer la valeur des nouvelles approches en matière d'assurance inondation. Les changements climatiques ont été pris en compte tout au long de l'étude afin d'accroître la résilience des mesures proposées dans des conditions susceptibles de changer au fil du temps, soit la possibilité de périodes en moyenne plus sèches ou plus pluvieuses et de conditions extrêmes du système.

Les recommandations découlant de l'étude ont été présentées dans ce document et elles sont regroupées à l'annexe A. Elles reflètent les préoccupations des collectivités des deux pays. Le Groupe d'étude estime qu'elles représentent autant d'approches raisonnables et pratiques à la réduction des inondations futures et de leurs impacts sur les biens et les personnes, sans nuire aux écosystèmes. Le bassin hydrographique du lac Champlain et de la rivière Richelieu subira toujours les effets des tempêtes, de la fonte des neiges et de la sécheresse, surtout dans un avenir caractérisé par des changements climatiques. Des approches structurelles et non structurelles appropriées peuvent toutefois être mises en œuvre au fil du temps pour améliorer la résilience des collectivités et des personnes, et pour réduire les risques pour la sécurité humaine et pour le domaine bâti (bâtiments et infrastructures).

L'étude a permis de réunir de précieux ensembles de données et de créer des outils qui pourraient s'avérer utiles dans tout travail futur visant à améliorer la compréhension et la gestion du bassin LCRR. Et puis, l'expertise interdisciplinaire et les relations établies au cours de l'étude perdureront et porteront fruit au fur et à mesure que les recommandations seront examinées, adaptées et mises en œuvre dans les années à venir.

ANNEXE A – Recommandations du Groupe d'étude à la CMI

Changements climatiques

Les multiples approches de modélisation climatique appliquées par le Groupe d'étude indiquent toutes une incertitude majeure quant au futur régime hydraulique, ainsi qu'une probabilité très faible (mais non nulle) d'inondations plus importantes que celles du printemps 2011, et de périodes d'étiage plus fréquentes et plus longues dans le bassin du lac et de la rivière. L'information dérivée des scénarios d'apports d'eau établis par le Groupe d'étude à partir de différentes techniques devrait être mise à la disposition de toutes les parties intéressées. Par conséquent, le Groupe d'étude recommande que la CMI conseille aux gouvernements d'encourager les organismes décisionnels à tenir compte des changements climatiques dans leurs décisions concernant tous les aspects de la gestion du risque d'inondations et dans leurs interventions.

Abaisser les niveaux d'eau - Solutions de nature structurelle et gouvernance

Le Groupe d'étude recommande à la CMI d'informer les gouvernements de la possibilité d'abaisser quelque peu les niveaux d'inondation, de l'ordre de 10 cm aux abords du lac et de 15 cm à Saint-Jean-sur-Richelieu pour un événement semblable à celui du printemps 2011, et de rehausser les niveaux d'étiage lors d'une sécheresse. Il faudrait pour cela ramener le régime hydraulique au niveau du haut-fond de Saint-Jean-sur-Richelieu le plus près possible de son état naturel par le retrait de certains artefacts d'origine anthropique qui ralentissent l'écoulement, l'excavation d'une partie du haut-fond et l'installation d'un seuil submergé (réversoir) en amont, à proximité du haut-fond de Saint-Jean-sur-Richelieu (mesure 1).

Il serait également possible de réduire davantage les niveaux d'inondation en combinant l'enlèvement des artefacts, l'excavation sélective du haut-fond et l'aménagement d'un seuil submergé, à l'utilisation d'une dérivation de l'eau par le canal de Chambly. Celle-ci, d'un débit modéré, permettrait au total un abaissement du niveau maximal de l'eau de 15 cm aux abords du lac et de 20 cm à Saint-Jean-sur-Richelieu lors d'un événement semblable aux inondations du printemps 2011 (mesure 3). Bien que cette mesure prévoyant une dérivation de l'eau par le canal de Chambly soit moins performante économiquement, elle permettrait de réduire davantage le niveau d'eau en cas d'inondations majeures et devrait donc être soumis à l'examen des gouvernements.

D'après l'évaluation des preuves de concept, le Groupe d'étude est d'avis que ces solutions structurelles modérées sont techniquement réalisables et socioéconomiquement acceptables. L'examen limité des effets sur l'environnement des deux solutions de nature structurelle envisageables a donné des résultats encourageants.

Si les gouvernements décident de mettre en œuvre une solution de nature structurelle, il faudra adopter un processus d'analyse de ses répercussions touchant les deux côtés de la frontière en y considérant les composantes sociales, politiques, environnementales, juridiques et économiques liées à la conception et à l'exploitation de la structure retenue.

Le Groupe d'étude recommande que la CMI encourage les gouvernements à appliquer un mécanisme binational de gouvernance en vue de surveiller la mise en œuvre et l'exploitation de toute solution structurelle retenue. Le mandat du mécanisme de gouvernance binational pour les mesures 1 ou 3 devrait porter notamment sur les fonctions suivantes :

- Définition, par les deux pays, de la conception finale du seuil submergé et de l'excavation du haut-fond ainsi que des performances à atteindre.
- Conception et mise en œuvre d'un programme binational de gestion adaptative.
- Instauration d'un processus décisionnel binational en réponse au programme binational de gestion adaptative.

De plus, les fonctions suivantes s'appliquent à la mesure 3 :

- Définition, par les deux pays, de la conception finale de la dérivation d'eau par le canal de Chambly et des exigences de performance qui s'y rattachent.
- Mise en œuvre d'un plan binational de gestion de l'eau associé à la conception finale.
- Supervision de l'application et des décisions liées à l'exploitation de la dérivation.

Entraver le débit - Stockage dans les bassins hydrographiques

Le Groupe d'étude recommande que la CMI encourage les gouvernements à continuer de protéger les milieux humides actuels, car ils contribuent à atténuer les inondations par un abaissement du niveau maximal des eaux de 15 cm dans le lac Champlain et de 12 cm dans la rivière Richelieu lors d'inondations comparables à celles du printemps 2011, pour les collectivités riveraines du lac Champlain et de la rivière Richelieu.

Le Groupe d'étude a déterminé que, sans la création d'une très grande superficie (650 km^2 ou plus) de nouveaux milieux humides, il ne peut y avoir d'atténuation significative des inondations pour les collectivités riveraines du lac et de la rivière Richelieu lors d'inondations majeures. Par conséquent, le Groupe d'étude ne recommande pas de poursuivre une stratégie d'acquisition de terres et de création de milieux humides comme politique spécifique de gestion efficace des inondations pour les collectivités riveraines du lac et de la rivière Richelieu.

Toutefois, le Groupe d'étude reconnaît que les milieux humides réduisent l'ampleur des inondations locales le long des tributaires, qu'ils soutiennent la biodiversité et procurent d'importants avantages connexes pour l'environnement. Ainsi, le Groupe d'étude souhaite encourager les gouvernements à continuer de protéger les milieux humides existants et, dans la mesure du possible, à restaurer ceux qui sont dégradés et à en créer de nouveaux. Le Groupe d'étude reconnaît les avantages supplémentaires et cumulatifs de plusieurs stratégies de réduction globale des inondations dans le système du lac Champlain et de la rivière Richelieu (LCRR). Le Groupe d'étude encourage les gouvernements à poursuivre la mise en œuvre de pratiques qui auront un impact positif sur le stockage d'eau dans les bassins versants, qui allégeront les problèmes d'inondation dans les affluents locaux et qui contribueront à l'effort global visant à réduire les impacts des inondations dans le réseau du bassin LCRR.

Améliorer l'intervention en cas d'inondation

Le Groupe d'étude recommande que tous les renseignements météorologiques et hydrologiques produits aux États-Unis par la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) et, au Canada, par Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) et par le Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) soient mis à la disposition des organismes de chaque pays responsables de la production et de la diffusion des prévisions, des guides et des avertissements relatifs aux inondations, et qu'ils soient utilisés par ces organismes.

- Il y a lieu d'encourager la poursuite et le resserrement de la collaboration entre les divers organismes concernés, soit la NOAA, ECCC et le MELCC, de sorte à garantir que toutes les données de prévision disponibles et leurs interprétations soient partagées en temps réel. Il est question, à terme, que les prévisions officielles de chaque côté de la frontière soient de la meilleure qualité possible et qu'elles s'accompagnent d'une interprétation concertée et cohérente de part et d'autre de la frontière.

- Il y a lieu de poursuivre et de continuer à améliorer les outils de modélisation et de prévision élaborés pour le bassin du lac Champlain et de la rivière Richelieu, car ils pourraient grandement faciliter la planification des interventions en cas d'inondation. Ces outils ont montré qu'il est possible d'étendre l'horizon prévisionnel et de fournir de nouveaux produits opérationnels pertinents aux parties prenantes du bassin, tels que ceux renseignant sur la montée des eaux, sur l'effet des vagues, sur l'étendue et la profondeur des inondations, et sur leurs impacts sur les berges, par exemple : routes coupées, vulnérabilités sociales et coûts.

Ainsi, les gouvernements sont encouragés à favoriser la mise en œuvre des outils de modélisation et de prévisions améliorés, ainsi que de systèmes cohérents d'évaluation des risques. Ils sont aussi invités à en assurer l'entretien et l'utilisation continue après l'Étude. Les outils, les données et la documentation d'appui produits par l'Étude LCRR devraient être transférés aux organismes appropriés au Canada et aux États-Unis, au plus tard en mars 2023.

Afin d'appuyer la préparation aux inondations, il conviendrait de mettre à la disposition de toutes les parties intéressées, au plus tard en mars 2023, les simulations d'inondations de diverses amplitudes et les cartes connexes produites par le Groupe d'étude.

Gestion des plaines inondables

Le Groupe d'étude recommande que la CMI encourage les gouvernements à faire le meilleur usage possible – en fonction de leur propre contexte – de l'analyse des pratiques exemplaires réalisée par l'Étude sur le bassin LCRR en matière de cartographie et de communication des risques, d'occupation des plaines inondables et d'assurance inondation.

Il serait plus précisément question :

- d'améliorer la cartographie des risques d'inondation en fonction des besoins des publics cibles. Cela comprend la mise à jour et l'ajout de détails supplémentaires aux cartes d'inondation existantes.

- d'élaborer des campagnes de communication sur les risques d'inondation adaptées à chacun des publics cibles du bassin LCRR.

- d'envisager la notion d'occupation des plaines inondables du point de vue de la résilience. Cela comprend des stratégies d'aménagement du territoire consistant : à éviter les secteurs inondés ou à composer avec ces derniers; à mettre à jour et à renforcer l'application de règlements d'aménagement du territoire en fonction du risque d'inondation, et à contrer tout développement immobilier dans les zones inondables à haut risque.

- d'explorer ou d'étendre les régimes d'assurance couvrant les risques d'inondations. Cela nécessitera une étude plus approfondie de l'état actuel de la couverture d'assurance offerte et de l'analyse de solutions d'assurance visant un partage de la responsabilité financière des dommages causés par les inondations.

De plus, le Groupe d'étude recommande que la CMI conseille aux gouvernements de maintenir les avantages d'un abaissement des niveaux de crues résultant de la mise en œuvre de mesures structurelles en appliquant une planification adaptative de l'utilisation des terres et de la gestion des plaines inondables, en particulier en limitant l'utilisation des terres dans les zones protégées par des solutions structurelles.

Renforcement des capacités

Le Groupe d'étude a constaté que les différentes parties concernées par les questions touchant à l'eau dans le bassin versant du lac Champlain et de la rivière Richelieu ont souvent des façons différentes et parfois divergentes de comprendre les causes et les impacts des inondations dans le bassin. Par conséquent le Groupe d'étude recommande que la CMI encourage les gouvernements à créer des espaces où toutes les parties prenantes concernés par les questions relatives au bassin versant pourront aborder divers aspects du problème des inondations dans le bassin du lac Champlain et de la rivière Richelieu, cela afin de favoriser une meilleure entente et une plus grande collaboration entre toutes les parties prenantes.

Le Groupe d'étude recommande que la CMI encourage les gouvernements à continuer de travailler dans le sens du renforcement des capacités en vue d'améliorer les mesures d'atténuation des inondations, notamment par le biais d'initiatives destinées à aider les collectivités à prévenir les impacts des inondations ou à s'y préparer, et à mettre à leur disposition des outils de planification.

Données, modèles et outils

Le Groupe d'étude recommande à la CMI que les outils, modèles et données de l'étude sur le bassin LCRR nécessaires à la mise en œuvre des recommandations du Groupe d'étude soient mis à la disposition des organismes appropriés au Canada et aux États-Unis d'ici mars 2023.

ANNEXE B – Bibliographie

Alberti-Dufort, A. 2022a. La cartographie des zones inondables : meilleures pratiques et recommandations pour le bassin du lac Champlain-Richelieu. Livre blanc pour la Commission mixte internationale. Ottawa, Ontario : Commission mixte internationale. https://ijc.org/fr/lcrr/la-cartographie-des-zones-inondables-meilleures-pratiques-et-recommandations-pour-le-bassin-du

Alberti-Dufort, A. 2022b. Comment l'aménagement des plaines inondables peut-il améliorer la résilience aux inondations : meilleures pratiques et recommandations pour le bassin du lac Champlain rivière Richelieu. Livre blanc pour la Commission mixte internationale. Ottawa (Ontario), Commission mixte internationale. https://ijc.org/fr/lcrr/comment-lamenagement-des-plaines-inondables-peut-il-ameliorer-la-resilience-aux-inondations

Bouchard St-Amant, P.A., and Dumais, G. 2022, Economic Analysis of structural measures, Groupe d'étude international du lac Champlain et de la rivière Richelieu de la CMI, Groupe de recherche en économie publique appliquée, École nationale d'administration publique.

Boudreau, P., Champoux, O. et Morin, J., 2022. Lake Champlain and Richelieu River water balance model for assessing Net basins supplies and mitigation measures. Rapport technique préparé par la Section de l'hydrologie et de l'écohydraulique, Service hydrologique national, Environnement et Changement climatique Canada. Rapport technique préparé pour Groupe de travail technique international du lac Champlain et de la rivière Richelieu.

Boudreau, P., Jean-François Cantin, André Bouchard, Olivier Champoux, Patrice Fortin, Jean-Michel Fiset, Nicolas Fortin, Julie Thérien, Guy Morin, 2015b. Création d'un modèle hydrodynamique expérimental 2D du lac Champlain utilisant les données bathymétriques existantes (tâche 1-2). Rapport technique préparé par Environnement Canada pour le Groupe de travail technique international du lac Champlain et de la rivière Richelieu.

Boudreau, Paul, Jean-François Cantin, André Bouchard, Olivier Champoux, Patrice Fortin, Jean-Michel Fiset, Nicolas Fortin, Julie Thérien et Guy Morin, 2015a. Création d'un modèle hydrodynamique expérimental 2D du lac Champlain utilisant les données bathymétriques existantes (tâche 1-2). Rapport technique préparé par Environnement Canada pour le Groupe de travail technique international du lac Champlain et de la rivière Richelieu , octobre 2015, 47 p. https://legacyfiles.ijc.org/tinymce/uploaded/LCRRTWG/T%c3%a2che1-2-Lac_Champlain_2D_mod%c3%a9lisation_EC-SHN_FR.pdf

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 Resources Research, 48(9), https://doi.org/10.1029/2011WR011212

Champoux, O. et Morin, J., 2018. Développement d'un modèle hydrodynamique 2D sur le seuil de Saint-Jean, rivière Richelieu. Rapport technique - RT-152. Section de l'hydrologie et de l'écohydraulique, Service hydrologique national, Environnement et Changement climatique Canada, Québec, mars 2018. Rapport technique préparé pour le Groupe de travail technique international du lac Champlain et de la rivière Richelieu , 47 p.

Comité des produits de données, 2022. Rapport contenant les recommandations en matière de préservation des données. Comité des produits de données du Groupe d'étude international du lac Champlain et de la rivière Richelieu.

Commission mixte internationale (CMI), 1938. Interim Report of the International Joint Commission on the Champlain Waterway, Washington - Ottawa, 1937 J.O. Patenaude, I.S.O., Printer to the King's Majesty, 187 p.

Commission mixte internationale (CMI), 1974. Regulation of Lake Champlain: Final Report. Report to the International Joint Commission under the Reference of 29 March 1973, par The International Champlain-Richelieu Engineering Board, 59 p.

Commission mixte internationale (CMI), 1981. Regulation of the Richelieu River and Lake Champlain. Gouvernements du Canada et des États-Unis (1909).

Commission mixte internationale (CMI), 2013. Plan d'étude pour la détermination des mesures visant à atténuer les inondations et leurs répercussions dans le bassin versant du lac Champlain et de la rivière Richelieu . 128 p.

Conseil international du lac Champlain et de la rivière Richelieu (CILCRR), 1979. Chambly Canal Flow Diversion Test, avril 1979. Comité spécial du Conseil international du lac Champlain et de la rivière Richelieu, 43 p.

Environnement et changement climatique Canada (ECCC), 2022. Modèle altimétrique numérique du lac Champlain et de la rivière Richelieu.

État du Vermont, 2022. Emergency Relief and Assistance Fund. https://floodready.vermont.gov/find_funding/emergency_relief_assistance

Flynn, R.H., Rydlund, P.H., Jr. et Martin, D.J., 2016, Network global navigation satellite system surveys to harmonize American and Canadian datums for the Lake Champlain Basin (ver. 1.1, avril 2016): U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2016–5009, 17 p., http://dx.doi.org/10.3133/sir20165009 .

Fortin, J. P., Moussa, R., Bocquillon, C. et Villeneuve, J. P., 1995. Hydrotel, un modèle hydrologique distribué pouvant bénéficier des données fournies par la télédétection et les systèmes d'information géographique. Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, 8 (1): 97–124. https://doi.org/10.7202/705215ar .

Fossey, M., Rousseau, A.N., Bensalma, F., Savary, S. et Royer, A., 2015. Integrating isolated and riparian wetland modules in the PHYSITEL/HYDROTEL modelling platform: model performance and diagnosis. Hydrological Processes, 29(22): 4683-4702.

François, B. et C. Brown, 2022.Analyse d'impact des changements climatiques sur les inondations et sur les décisions de gestion des crues dans le bassin du lac Champlain et de la rivière Richelieu. Rapport à la Commission mixte internationale.

Garde côtière canadienne, Pêches et Océans Canada, 2018. Champlain – Richelieu River Basin (Québec, Canada) Étude de base préparée pour Groupe de travail technique international du lac Champlain et de la rivière Richelieu .

Gosselin, R., Champoux, O., Doghri, M. et Morin, J., 2022. Lake Champlain and Richelieu River steady hydrodynamic modelling. Technical report prepared by the Hydrodynamics and Ecohydraulic Section, National Hydrological Service, Environment and Climate Change Canada. Rapport technique préparé pour le Groupe de travail technique international du lac Champlain et de la rivière Richelieu.

Gouvernement du Québec, ministère des Affaires municipales et de l'Habitation, 2020; Plan de protection du territoire face aux inondations : des solutions durables pour mieux protéger nos milieux de vie. https://www.quebec.ca/gouvernement/politiques-orientations/plan-de-protection-du-territoire-face-aux-inondations .

Grand Conseil de la Nation Waban-Aki (GCNWA), 2021. Study on the use and occupancy of the territory by the W8banakiak and the Kanien'Kehà:Ka in the Richelieu River and Lake Champlain watersheds Rapport à la CMI.

Groupe d'analyse sociale, politique et économique (SPE, 2022). Integrative Report. International Lake Champlain – Richelieu River Study. Rapport à la Commission mixte internationale.

Groupe d'étude international du lac Champlain et de la rivière Richelieu (GEILCRR), 2017. Plan de travail pour la détermination des mesures d'atténuation des inondations et de leurs effets dans le bassin versant du lac Champlain et de la rivière Richelieu. Présenté à la Commission mixte internationale, le 2 octobre 2017. https://www.ijc.org/sites/default/files/2018-10/FR_Final_WP_LCRR.pdf

Groupe d'étude international du lac Champlain et de la rivière Richelieu (GEILCRR), 2019. Causes et Impacts des inondations passées dans le bassin du lac Champlain et la rivière Richelieu - Renseignements historiques sur les inondations. Rapport à la Commission mixte internationale. https://ijc.org/fr/lcrr/causes-et-impacts-des-inondations-passees-dans-le-bassin-du-lac-champlain-et-la-riviere

Groupe d'étude international du lac Champlain et de la rivière Richelieu (GEILCRR), 2022. Rapport sur les points saillants de l'étude sur les inondations dans le bassin du lac Champlain et de la rivière Richelieu de la Commission mixte internationale. Document d'appui en vue des consultations publiques sur l'étude de la Commission mixte internationale sur les inondations dans le bassin du lac Champlain et de la rivière Richelieu. https://ijc.org/sites/default/files/LCRR_Draft_Public_Consultation_Report_FR_022122.pdf

Groupe de travail technique sur l'hydraulique et la cartographie (HHC), 2022. Development of a Binational Flood Forecasting and Real-time Floodplain Mapping System for Operational Implementation

Groupe de travail technique sur la gestion des inondations et les mesures d'atténuation et Groupe de travail technique sur l'hydrologie, l'hydraulique et la cartographie (MGAI et HHC), 2021. Solutions potentielles de nature structurelle pour atténuer l'ampleur des inondations dans le bassin de lac Champlain et de la rivière Richelieu. Rapport à la Commission mixte internationale. https://ijc.org/en/lcrr/potential-structural-solutions-mitigate-flooding-lake-champlain-richelieu-river-basin

Henstra, 2022. (Livre blanc intégratif) Henstra, D. et McIlroy-Young, B., 2022. Risques d'inondation : pratiques exemplaires et recommandations en matière de communication – Bassin du lac Champlain et de la rivière Richelieu – Étude sur la rivière Richelieu. Livre blanc pour la Commission mixte internationale, 35 p. https://ijc.org/sites/default/files/WP_2_Flood-Risk-Communication_FR_031722.pdf

Henstra, D., 2022. Stratégie intégrée de gestion des risques d'inondation dans le bassin du lac Champlain et de la rivière Richelieu. Livre blanc à la Commission mixte internationale. https://ijc.org/sites/default/files/LCRR_Integrated_Flood_Risk_Mngt_Report_FR_032422.pdf

Homer, C. G., Dewitz, J. A., Yang, L., Jin, S., Danielson, P., Xian, G., Coulston, J., Herold, N. D., Wickham, J. D. et Megown, K., 2015. Completion of the 2011 National Land Cover Database for the conterminous United States – Representing a decade of land cover change information. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 81(5): 345-354 https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?dirEntryId=309950 .

Lake Champlain Basin Program (LCBP), 2013. Flood Resilience in the Lake Champlain Basin and Upper Richelieu River, 93 p. http://www.lcbp.org/wp-content/uploads/2013/04/FloodReport2013_en.pdf .

Lake Champlain Basin Program (LCBP), 2015. Lake basins and facts: http://www.lcbp.org/about-the-basin/facts/ .

Lake Champlain Basin Program (LCBP), 2019. Lake Champlain Basin Atlas, https://atlas.lcbp.org/people-economy/population/

Lecompte, T., 2021. Indigenous archeological sites mapping for the LCRR study. Commission mixte international. 12 p.

Loiselle G., Martel J.L., Poulin, A., Lachance-Cloutier, S., Turcotte, R., Mai, J., Fournier, J., Arsenault R., 2021. Improved Wind Set-up Model for Flood Forecasting on Lake Champlain. Hydrological Processes 35(6), dx.doi.org/10.1002/hyp.14240.

Lucas-Picher, P., Arsenault, R., Poulin, A., Ricard, S., Lachance-Cloutier, S., et Turcotte, R., 2020. Application of a high-resolution distributed hydrological model on a U.S.-Canada transboundary basin: Simulation of the multiyear mean annual hydrograph and 2011 flood of the Richelieu River basin. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 12, e2019MS001709. https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2019MS001709 .

Moin, S., Werick, B. et Yuzyk, T., 2022. Evaluation of Potential Structural Solutions in the Richelieu River to Mitigate Extreme Floods. Groupe de travail technique sur les mesures de gestion et d'atténuation des inondations, Groupe d'étude international du lac Champlain et de la rivière Richelieu. 101 p.

Morin, M., 2008. Concepts de base en sécurité civile. Québec, Canada, 60 p.

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), 2011. The Record Floods on Lake Champlain and the Richelieu River. The Nor'easter (Summer 2011): 5-8. National Weather Service Northeast River Forecast Center. Sept. 2011.

New York Department of Environmental Conservation, 20212. Flood Recovery and Resiliency. https://www.dec.ny.gov/lands/121102.html .

Ouarda, T.B.M.J. et Charron, C. 2019. Frequency analysis of Richelieu River flood flows, Lake Champlain flood level and NBS to the Richelieu River Basin. INRS-été pour la Commission mixte internationale dans le cadre de l'étude sur le lac Champlain et la rivière Richelieu. 60 p.

Pew Charitable Trusts 20196. Vermont's Fund Helps Communities To Become More Flood-Ready. https://www.pewtrusts.org/-/media/assets/2019/11/vermontemergencyfund_brief.pdf. Vermont flood plan?

Québec, 2018. Projet INFO-Crue. https://www.cehq.gouv.qc.ca/zones-inond/info-crue/index.htm .

Riboust, Philippe et Brissette, François, 2016. Analysis of Lake Champlain/Richelieu River's historical 2011 flood. Canadian Water Resources Journal, 41(1-2): 174-185.

Rousseau, A., S. Savary, M-L. Bazinet, 2021. Méthodes active/passive de stockage des eaux de crue. Évaluation des caractéristiques de contrôle des crues par le biais de milieux humides et de terres agricole dans le Bassin Hydrographique du lac Champlain et de la rivière Richelieu. Rapport final 2019-2020 présenté à Environnement et Changement climatique Canada et à la Commission mixte internationale. https://ijc.org/sites/default/files/LCRR_Watershed_Storage_Report_FR_01142022_0.pdf .

Rousseau, A.N., Fortin, J.P., Turcotte, R., Royer, A., Savary, S., Quévy, F., Noël, P. et Paniconi, C., 2011. PHYSITEL, a specialized GIS for supporting the implementation of distributed hydrological models. Water News - Magazine officiel de l'Association Canadienne des ressources hydriques, 31(1), pp.18-20.

Roy, M., Bachand, M., Maranda, A., Gosselin, R., Thériault, D., Poirier, G., Champoux, O., Fortin, N., Julien, M-F., Marcotte, C., Hennebert, A., Oubennaceur K., Morin, J. 2022. Évaluation de mesures structurelles d'atténuation des inondations à l'aide d'indicateurs de performance : Étude sur le lac Champlain et la rivière Richelieu. Section hydrodynamique et écohydrolique, Environnement et changement climatique Canada, QuébecRoy et al., 2022.

Royer, A., A. N. Rousseau, J.-P. Fortin, R. Turcotte, 2006. PHYSITEL, un SIG pour la mise en place de modèles hydrologiques. Affiche présentée au « Deuxième Symposium Scientifique d'Ouranos sur la Climatologie et adaptation à l'échelle régionale », 2 3 novembre 2006, Montréal (Québec), Canada.

Shabman, L. 2022. Shabman, L. 2022. Viser la résilience : le rôle de l'assurance inondation. Ottawa (Ontario), Commission mixte internationale. https://ijc.org/fr/lcrr/viser-la-resilience-le-role-de-lassurance-inondation .

Statistique Canada. 2022. (tableau). Profil du recensement, Recensement de la population de 2021. No 98-316-X2021001 au catalogue de Statistique Canada. Ottawa. Publié le 9 février 2022. https://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2021/dp-pd/prof/index.cfm?Lang=F (consulté le 25 mars 2022).

Thériault, D., Champoux, O, and Morin, J., 2022. Bilan des changements attribuables à 200 ans d'interventions anthropiques dans le cours supérieur de la rivière Richelieu, rapport technique préparé par la Section hydrodynamique et écohydraulique, Service hydrologique national, Environnement et changement climatique Canada. Préparé pour le Groupe de travail technique international du lac Champlain et de la rivière Richelieu, 76 p. https://ijc.org/fr/lcrr/bilan-des-changements-attribuables-200-ans-dinterventions-anthropiques-dans-le-cours-superieur

Thériault, D., Morin, J. et Champoux, O., 2020. Cumulative Impacts of Upstream Anthropogenic Changes on the Richelieu River. Technical report RT – 154, Section hydrodynamique et écohydraulique, Services hydrologiques nationaux, Environnement et Changement climatique Canada, Québec. 86 p.

Therrien, M-C., J-M. Normandin, J. Arnaud et M. Rodrigue Poulin. 2021. "Quebec Amendments to Legal and Policy Framework Regarding Flood Risk Montréal (Québec) : Cité-ID Living Lab.

Thomas, I. et Gagnon, A., 2020. Analyse de la vulnérabilité et de la résilience des communautés locales: Résumé - Rapport #5 SPE4. Téléchargé de https://www.ariaction.com/nos-rapports .

Turcotte, R., Fortin, J.-P., Rousseau, A.N., Massicotte, S., Villeneuve, J.-P., 2001. Determination of the drainage structure of a watershed using a digital elevation model and a digital river and lake network. Journal of Hydrology. 240: 225–242.

Turcotte, R., Fortin, L.G., Fortin, J.P., Fortin, V., Villeneuve, J.-P., 2007. Operational analysis of the spatial distribution and the temporal evolution of the snowpack water equivalent in southern Quebec, Canada, Nordic Hydrology, 38(3), 211-234.

Turcotte, R., Rousseau, A.N., Fortin, J.-P., Villeneuve, J.-P., 2003. A process-oriented multiple-objective calibration strategy accounting for model structure. In: Q. Duan, V.K. Gupta, S. Sorooshian, A.N. Rousseau et R. Turcotte (éditeurs), Calibration of watershed models. American Geophysical Union, Washington, p. 153-163.

U.S. Army Corps of Engineers, 1995. National Study of Water Management During Drought: The Report to the U.S. Congress. Water Resources Support Center, Institute for Water Resources, 56 p. http://www.iwr.usace.army.mil/Portals/70/docs/iwrreports/94-NDS-12.pdf .

Vermont Agency of Natural Resources, 2017. River Corridor, Floodplain & Shoreland Protection Programs, Biennial Report to the General Assembly, 14 p. https://dec.vermont.gov/sites/dec/files/wsm/lakes/docs/2017-01-04-DEC-Shorelands-Report.pdf .

Werick, B., 2022 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. https://www.ijc.org/fr/lcrr/strategie-pour-composer-avec-lincertitude-climatique-liee-aux-inondations-dans-le-bassin-du .

ANNEXE C - Participants à l'Étude

Nom du groupe	Co-président(e) et membres (États-Unis)	Co-président(e) et membres (Canada)
Groupe d'étude	Deborah H. Lee, Keith Robinson* Kristine Stepenuck, Eric Day, Ann Ruzow-Holland, Pete Laflamme	J-F Cantin Madeleine Papineau, Michel Jean, Richard Turcotte, Daniel Leblanc
Gestionnaires	Mae Kate Campbell, Rob Flynn*	Serge Lepage, Serge Villeneuve*
Agents de liaison de la CMI	Michael Laitta	Paul Allen, Pierre-Yves Caux*
Coordinatrice	-	Céline Desjardins
GTT HHC	Jesse Feyen William Saunders, Bill Coon, Tim Callapi, Blaine Hasting, Dan Titze, Dima Beletsky	Jean Morin Vincent Fortin, Olivier Champoux, Simon Ricard, Dominic Roussel, Simon Lachance-Cloutier
GTT MGAI	Bill Werick Matthew Cosby, Michael Kline, Fletcher Potter*, Ben Rose, Jason Shea*	Ted Yuzyk Jan Adamowski, Pascal Marceau, Syed Moin, Brian Morse*
GTT RR	Perry Thomas*, Rose Paul* Timothy Mihuc, Phil Von Bargen, Donna Parrish, Jarlath O'Neil-Dunne, Nina Safavi	Mathieu Roy, Glenn Benoy* Marianne Bachand, Alain Rousseau, Marc Mingelbier, Bernard Doyon
GTT SPE	Curt Gervich Chris Koliba, Jarlath O'Neil-Dunne, Hadar Pepperstone, Emily Pindilli, Charles Rhodes, Emma Spett, Shannon Thayer*	Marie-Christine Therrien Matis Allali, Joris Arnaud, Claudine Beaudoin*, Charles Bélanger, Pier-André Bouchard St-Amant, Alexis-Nicolas Brabant*, Rim Chehab*, Guillaume Dumais, Anne-Laure Fakiroff*, Alexandre Gagnon, Charles-Antoine Gosselin *, Laurent Goyette-Levac, Caroline Larrivee, Julie-Maude Normandin*, Michel Poulin*, Frank Tchokouagueu, Isabelle Thomas, Santiago Varsi
GCP	Kristine Stepenuck, Lesley-Ann Dupigny-Giroux*, Eric Howe Philip Von Bargen, Marla Emery, Lori Fisher, Ann Ruzow Holland*, Mark Malchoff, Steve Peters	Madeleine Papineau Frédéric Chouinard, Teresa Gagnon, Josée Julien*, Pierre Leduc*, Jérémie Letellier, Julie Robert, Renée Rouleau, Harm Sloterdijk

Nom du groupe	Co-président(e) et membres (États-Unis)	Co-président(e) et membres (Canada)
Sous-groupe chargé d'examiner la participation des peuples autochtones à l'Étude	Michael Laitta, Kris Stepenuck, Marla Emery, Emma Spett, Bill Richmond, Mae Kate Campbell, Robert Flynn*, Perry Thomas*, Rose Paul*, Eric Howe*	Pierre-Yves Caux, Madeleine Papineau, Céline Desjardins, André Champoux, Mathieu Roy, Marianne Bachand, Joris Arnaud, Serge Villeneuve*, Tristan Lecompte*, Frédérick Chouinard*
GTC	Frank Bevaqua, Jeff Kart John Brodt, Kevin Bunch, Mae Kate Campbell, Rob Flynn, Curt Gervich, Bill Richmond, Keith Richmond, Kristine Stepenuck	Christina Chiasson, Randi Morry*, Michele D'Amours* Joris Arnaud, André Champoux, Jean-Michel Fiset, Tristan Lecompte, Madeleine Papineau, Serge Lepage, Sarah Lobrichon, Serge Villeneuve*, Nick Heisler
DPC	Lacey Mason Jesse Feyen, Charles Rhodes, Kristine Stepenuck	Erika Klyszejko Syed Moin, Jean Morin, Mathieu Roy, Madeleine Papineau
IRG	William Howland Davis Mears, Todd Redder*, Lisa Bourget*, James Barton	André St-Hilaire Pascale Biron, Diane Dupont, Pierre Aubé
Production de rapports, prise de notes, traduction	Kathy Hall, John Bratton, Amanda Flynn, Katie Darr, Ellen Kujawa*	Jean-Pierre Dany (TCI Inc.) Yvonne Klintborn, Marc Auger, Ghislain Dion, Marion Mellou
Services RH - TI - juridiques - Finances de la CMI	Susan Daniel, Adam Greeley, Brian Malone, Ed Virden, Alice Ross	Maxime Beauchamp, Glenn Benoy, Rob Caldwell, Marlène Huard, Jeff Laberge, Lisa Landriault, Isabelle Reid

** Anciens membres*

ANNEXE D – Sigles

1/4 DE MOIS	Quart de mois
ANB	Apports nets du bassin
CLIMEX	Extrêmes climatiques
CMI	Commission mixte internationale
CMIP	Coupled Model Inter-comparison Project (comparaisons corrélatives des modèles couplés)
CMP	Crue maximale probable
CORDEX	Coordinated Regional Downscaling Experiment
COVABAR	Comité de concertation et de valorisation du bassin de la rivière Richelieu
CPR	Chemin de fer Canadien Pacifique
DLGC	Division des levés géodésiques du Canada
ECCC	Environnement et changements climatique Canada
CMK	Conseil Mohawk de Kahnawà:ke
ENAP	École nationale d'administration publique
ETS	École de technologie supérieure
FEMA	Federal Emergency Management Agency (É.-U.) (Agence fédérale des situations d'urgence)
GCNWA	Grand Conseil de la Nation Waban-Aki
GEIGLA	Groupe d'étude international sur les Grands lacs d'amont
GEILCRR	Groupe d'étude international du lac Champlain et de la rivière Richelieu
GEI	Groupe d'examen indépendant
GRC	Gestion des risques de crue

GTACC	Groupe de travail sur l'adaptation aux changements climatiques
GTT	Groupe de travail technique
H2D2	Simulation hydraulique bidimensionnelle et de dispersion
HHC	Hydrologie, hydraulique et cartographie
ICRB	International Champlain-Richelieu Board
INRS-ETE	Institut national de la recherche scientifique-Centre Eau Terre Environnement
IP	Indicateur de performance
IPCC5	Cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
ISEE	Intégration sociale, économique et environnementale
LCBP	Lake Champlain Basin Program
LCRR	Lac Champlain et rivière Richelieu
MAN	Modèle altimétrique numérique
MBH	Modèle de bilan hydrologique
MCG	Modèle de circulation générale
MELCC	Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements climatiques
NAVD88	Référence altimétrique nord-américaine de 1988
MGAI	Mesures de gestion et d'atténuation des inondations
NFIP	US National Flood Insurance Program
NGVD29	Système géodétique national de 1929
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration; agence américaine d'observation océanique et atmosphérique
NWS	US National Weather Service
OCAD	Outil collaboratif d'aide à la décision

RCP	Voie de concentration représentative
SIG	Système d'information géographique
SJsR	Saint-Jean-sur-Richelieu
SPE	Groupe d'analyse sociale, politique et économique Traité sur
TEL	les eaux limitrophes
UOT	Utilisation et occupation traditionnelle du territoire
US$	US Dollars
USACE	United States Army Corps of Engineers
USGS	United States Geological Survey
USWRC	United States Water Resources Council
WRF	Weather Research and Forecasting

ANNEXE E - Facteurs de conversion

Multiplier	Par	Pour obtenir
Longueur		
1 centimètre (cm)	0,3937	1 pouce (po)
1 millimètre (mm)	0,03937	1 pouce (po)
1 micron (µm)	0,0003937	1 pouce (po)
1 mètre (m)	3,281	1 pied (pi)
1 kilomètre (km)	0,6214	1 mille (mi)
Aire		
1 mètre carré (m^2)	0,0002471	1 acre
1 hectare (ha)	2,471	1 acre
1 kilomètre carré (km^2)	247,1	1 acre
1 centimètre carré (cm^2)	0,001076	1 pied carré (pi^2)
1 mètre carré (m^2)	10,76	1 pied carré (pi^2)
1 centimètre carré (cm^2)	0,1550	1 pouce carré (pi^2)
1 hectare (ha)	0,003861	1 mille carré (mi^2)
1 kilomètre carré (km^2)	0,3861	1 mille carré (mi^2)
Volume		
1 litre (L)	33,82	1 once liquide (fl. oz)
1 litre (L)	2,113	1 pinte (pt)
1 litre (L)	1,057	1 quart (qt)

Volume		
1 litre (L)	0,2642	1 gallon (gal)
1 mètre cube (m^3)	264,2	1 gallon (gal)
1 mètre cube (m^3)	0,0002642	1 million de gallons (Mgal)
1 litre (L)	61,02	1 pouce cube (in^3)
1 mètre cube (m^3)	35,31	1 pied cube (pi^3)
1 mètre cube (m^3)	1,308	1 verge cube (yd^3)
1 mètre cube (m^3)	0,0008107	1 acre-pied (acre-pi)
Débit		
1 mètre par seconde (m/s)	3,281	1 pied par seconde (pi/s)
1 mètre cube par seconde (m^3/s)	70,07	1 acre-pied par jour (acre-pi/j)
1 mètre cube par seconde (m^3/s)	35,31	1 pied cube par seconde (pi^3/s)
1 mètre cube par seconde (m^3/s)	22,83	1 million de gallons par jour (Mgal/j)
Masse		
gramme (g)	0,03527	1 once (oz)

Préfixes SI:

centi = 10^{-2} milli = 10^{-3} micro = 10^{-6} nano = 10^{-9} pico = 10^{-12}

La température en degrés Celsius (°C) peut être convertie en degrés Fahrenheit (°F) comme suit :

$°F = (1,8 \times °C) + 32$

Les coordonnées verticales sont données par rapport au **système de référence vertical nord-américain de 1988 (NAVD88)**.

Les coordonnées horizontales sont données par rapport au **système de référence nord-américain de 1983 (NAD83)**.

Dans le présent rapport, l'altitude correspond à la distance au-dessus du point de référence vertical.

INTERNATIONAL JOINT COMMISSION • COMMISSION MIXTE INTERNATIONALE
1909