

Méthodes actives/passives 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 au Groupe d'étude international du lac Champlain
et de la rivière Richelieu**

Déposé par le

Alain N. Rousseau, ing., Ph.D.

Stéphane Savary, ing.jr., M.Sc.

Marie-Laurence Bazinet

Centre Eau Terre et Environnement

Institut national de la recherche scientifique (INRS-ETE)

490, rue de la Couronne, Québec (QC), G1K 9A9

décembre 2021

Version anglaise rédigée par :

Alain N. Rousseau, ing., Ph.D.
Stéphane Savary, ing. jr, M.Sc.
Marie-Laurence Bazinet

Traduction par



Revue par

Alain N. Rousseau
Stéphane Savary

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier Olivier Champoux et Jean Morin d'Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) pour leurs précieux apports techniques tout au long du projet sous la forme des modèles de bilan hydrique du lac Champlain, journaliers et à sept jours. Enfin, les auteurs remercient Pierre-Yves Caux, Ted Yuzik et Bill Werick de la CMI, Serge Villeneuve et Jean-François Cantin d'ECCC, Simon Lachance-Cloutier de la direction de l'expertise hydrique (DEH) Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) et Keith Robinson de l' United States Geological Survey (USGS) New England Water Science pour leur soutien scientifique et administratif.

Ce rapport a été produit avec le soutien des groupes de travail techniques sur la gestion des crues et les mesures d'atténuation (FMMM), la réponse aux ressources (RR) et l'hydrologie, l'hydraulique et la cartographie (HHM) du Comité d'étude international du lac Champlain et de la rivière Richelieu.

GROUPES DE TRAVAIL TECHNIQUES

FMMM, Canada

Ted Yuzik
Syed Moin
Jan Adamowski
Pascal Marceau

FMMM, États-Unis

Bill Werick
Ben Rose
Michael Kline
Matthew Cosby

RR, Canada

Alain Rousseau
Mathieu Roy
Marianne Bachand
Marc Mingelbier

RR, États-Unis

Bernard Doyon
Rose Paul
Phil von Bargen
Timothy Mihuc
Donna Parrish

HHM, Canada

Jean Morin
Milena Dimitrijevic
Olivier Champoux
Dominic Roussel
Simon Lachance-Cloutier

HHM, États-Unis

Jesse Feyen
Bill Saunders
Chris Gazoorian
Tim Calappi
Blaine Hastings



RÉSUMÉ

Les crues records de 2011 dans le bassin du lac Champlain et de la rivière Richelieu (LCRR) ont incité les gouvernements des États-Unis et du Canada à travailler de concert en vue de déterminer comment améliorer la prévision des crues dans ce bassin, comment se préparer à de tels événements et comment les atténuer. Comme le bassin LCRR est transfrontalier, il faudra adopter une approche binationale pour s'attaquer au risque de crue. Il est donc dans l'intérêt des deux pays de trouver et de mettre en œuvre des solutions efficaces pour régler les problèmes des crues en regard des risques constatés dans chaque pays. En septembre 2016, dans un renvoi adressé à la Commission mixte internationale (CMI) en vertu de l'article IX du Traité des eaux limitrophes, les gouvernements des États-Unis et du Canada ont demandé que soit mené à terme le Plan d'étude de 2013 dont l'objet était d'explorer les causes et les répercussions des crues dans le bassin LCRR, ainsi que les risques et les solutions concernant ces risques. Dans la foulée, la Commission a mis sur pied le Groupe d'étude international sur le lac Champlain et la rivière Richelieu pour l'aider à répondre au renvoi.

OBJECTIF DE L'ÉTUDE

L'étude internationale sur le lac Champlain et la rivière Richelieu (l'étude) s'appuie sur un ensemble d'études antérieures ayant porté sur différentes options de gestion et d'atténuation des crues en vue de déboucher sur l'élaboration d'outils devant permettre aux autorités canadiennes et américaines de mieux se préparer aux crues futures et de mieux les gérer. La région visée par la présente étude englobe l'ensemble du bassin LCRR dont la limite aval est influencée par le régime hydrologique du fleuve Saint-Laurent. Il est principalement question d'étudier le lac et la rivière ainsi que leurs berges et zones inondables adjacentes, et d'évaluer un ensemble de mesures structurelles et non structurelles en vue de réduire les niveaux d'eau maximums et les répercussions qui en découlent, d'atténuer la vulnérabilité aux crues et de renforcer la résilience à ce phénomène.

ENQUÊTE SUR LES APPROCHES PASSIVES ET ACTIVES POUR L'ATTÉNUATION DES INONDATIONS

Le présent rapport décrit l'étude des effets associés aux approches passives et actives en matière d'atténuation des crues dans le bassin LCRR. Plus précisément, cette étude a consisté à évaluer le potentiel : i) de stockage des eaux de crue dans des terres agricoles riveraines et ii) d'utilisation des milieux humides actuels, restaurés ou aménagés, des affluents des sous-bassins dans les États du Vermont et de New York afin de réduire le ruissellement, les débits de pointe et les apports nets du bassin du lac Champlain.

L'évaluation a visé à répondre à quatre questions fondamentales ::

- 1** Pourquoi étudier le stockage dans les terres en amont?
- 2** Quelle influence les milieux humides ont-ils sur les apports nets du bassin, les débits et les niveaux d'eau du lac Champlain et de la rivière Richelieu (LCRR)?
- 3** (iii) Quel avantage supplémentaire procurerait l'inondation de terres agricoles?
- 4** Quel effet l'aménagement d'autres milieux humides aurait-il?

La réponse à la première question découle d'études ainsi que d'événements survenus dans le bassin du lac Champlain, qui ont illustré les effets du stockage dans des terres situées en amont comme approche d'atténuation des crues inspirée de la nature. La plateforme de modélisation hydrologique PHYSITEL/HYDROTEL a permis de répondre aux trois autres questions grâce à une évaluation du rôle des milieux humides sur les apports d'eau (ANB) dans le lac Champlain et dans la rivière Richelieu, ainsi que de l'avantage supplémentaire que procure l'inondation de terres agricoles et l'ajout de milieux humides en vue d'atténuer les crues.

La plateforme de modélisation hydrologique PHYSITEL/HYDROTEL permet de discréteriser un bassin versant en segments de cours d'eau et en unités hydrologique de type versant (afin de simuler l'effet d'occupation du sol sur le débit) et d'alimenter en données un modèle de bilan hydrique ou hydrodynamique d'un lac/réservoir en vue de prédire les niveaux d'eau d'un lac ou d'un cours d'eau donné. Dans le cas de l'étude qui nous intéresse, le modèle a été étalonné et validé à l'aide d'une base de données exhaustive alimentée par 25 stations hydrométriques et

64 années de données météorologiques maillées.

Le cadre méthodologique retenu prévoyait l'activation et la désactivation des schémas de paramétrage des milieux humides d'HYDROTEL dans le but de faire ressortir les effets de la régularisation du débit en fonction de la répartition actuelle des milieux humides dans le bassin, et de quantifier l'effet des quatre scénarios de stockage dans le bassin hydrographique (en zones surélevées):

- 1** stockage d'eau sur des terres agricoles dans une zone tampon de 1 000 m le long de tout le réseau hydrographique du bassin LCRR à l'aide des modules de milieux humides isolés/riverains d'HYDROTEL (superficie cumulative de 2 471 km² dans le cas du bassin de la rivière Richelieu (à Fryers) et de 2 256 km² dans celui du bassin du lac Champlain);
- 2** conversion des dépressions topographiques locales en milieux humides suivant différents critères de conception, comme le seuil de capacité de stockage, la superficie en milieux humides et la superficie de drainage à l'exclusion des milieux humides, des plans et des cours d'eau, des zones urbaines et des axes routiers;
- 3** ajout de milieux humides dans des terres présentant un potentiel d'accumulation naturelle d'eau en raison de la topographie et de sols mal ou très mal drainés, cela à l'aide d'un ensemble de données produites par l'USEPA à l'appui de la recherche et des activités de cartographie en ligne en lien avec EnviroAtlas; et
- 4** combinaison des scénarios 2 et 3.

RÉSULTATS ET CONSTATATIONS

Les résultats de la simulation ont été analysés en fonction des ANB (apports de tous les sous-bassins et de tous les versants du bassin hydrographique du lac Champlain, ainsi que des précipitations moins l'évaporation), des débits (débits maximums annuels et saisonniers et débits minimums sur sept jours) ainsi que des niveaux du lac Champlain (LC) et de la rivière Richelieu (RR) à la marina de Saint-Jean-sur-Richelieu. Les niveaux d'eau ont été obtenus à partir des données d'ANB du lac Champlain d'HYDROTEL chargées dans le modèle de bilan hydrique (MBH) à pas de temps journalier, modèle établi par Environnement et Changement climatique Canada pour le lac Champlain.

La présente étude quantifie d'abord les services hydrologiques fournis par les 1 551 km² de milieux humides existants dans le bassin du LC (couvrant 7 % du bassin dont il draine 37 %) et illustre leur rôle dans l'atténuation des ANB, des débits de pointe et des niveaux d'eau. Ces effets ont été observés lors de la crue de 2011 et à l'occasion de simulations théoriques (soit des quatre scénarios de stockage dans le bassin hydrographique à partir de 64 années de données

météorologiques). Les résultats font ressortir que les milieux humides existants peuvent, en général, réduire le débit maximum annuel des 20 affluents du LC de 9 à 52 %. Ces réductions abaissent ensuite de 22 % le débit maximum annuel des ANB du LC, de 6 % le débit maximum annuel de la RR, de 12 cm le niveau d'eau maximum annuel du LC et de 9 cm le niveau d'eau maximum annuel de la RR. De plus, les milieux humides existants contribuent à amplifier les débits minimums.

Les quatre scénarios de stockage dans les bassins versants (correspondant à des superficies de stockage supplémentaires de 2 256 km² en terres agricoles inondées et aux superficies additionnelles de milieux humides suivantes : 647 km², 865 km² et 1 488 km²) ont démontré la possibilité de réaliser des gains supplémentaires pour réduire les ANB et le niveau du LC ainsi que, dans une moindre mesure, les débits de pointe et le niveau de la RR. Précisons, par ailleurs, que les scénarios de stockage ont fait ressortir une série de répercussions sur les débits minimums, surtout sous la forme d'une amplification (augmentation), mais aussi, parfois, d'une atténuation (réduction), l'amplification étant ici le service hydrologique recherché.

Tableau ES-1-1. Réduction moyenne des débits et des niveaux d'eau maximums selon chacun des quatre scénarios de stockage.

Scénario	Réduction moyenne des débits maximums du tributaire (%)	Réduction moyenne du débit maximum des ANB du LC (%)	Réduction moyenne du débit maximum annuel de la RR (%)	Réduction moyenne du niveau d'eau maximum annuel du LC (cm)	Réduction moyenne du niveau d'eau maximum annuel de la RR (cm)
Stockage sur des terres agricoles riveraines	1 - 49	15	2	4	3
Aménagement / restauration de milieux humides à partir de données spatiales.	0,7 - 13	6,3	2,6	5	3
Aménagement de milieux humides sur les terres recensées par l'USEPA.	0,9 – 26,6	8,1	2,6	5	3
Combinaison de scénarios d'aménagement de milieux humides.	2,6 – 28,1	12,7	4,7	8	6

Le tableau ES1-1 présente les réductions moyennes de débits et de niveaux d'eau maximums découlant de chacun des quatre scénarios de stockage. Veuillez noter que le tableau ES1-1 présente des moyennes et ne reflète pas les résultats d'événements d'intensité et de durée. Du point de vue de la modélisation hydrologique pure, l'ajout de milieux humides à grande échelle selon le scénario combiné pourrait contribuer à atténuer considérablement les crues et représenter une méthode/solution efficace de stockage passif de l'eau. Cependant, l'ajout de milieux humides et/ou l'inondation de terres agricoles nécessiterait d'énormes superficies supplémentaires. Compte tenu des politiques, des programmes et des règlements existants au Canada (comme le projet de loi 132 du Québec — Loi concernant la conservation des milieux humides et hydriques) — et/ou aux États-Unis (comme les programmes gérés par le Natural Resources Conservation Service de l'USDA, le US Fish and Wildlife Service et les départements de la conservation de l'environnement des États du Vermont et de New York), le fait de favoriser l'aménagement/la restauration de milieux humides plutôt que d'inonder des terres agricoles pourrait, dans le temps, constituer une solution socialement acceptable pour renforcer la résilience dans le bassin LCRR, du moins au niveau des sous-bassins hydrographiques. La superficie de terres nécessaire pour constater un effet sensible sur les débits et les niveaux d'eau pourrait cependant être rédhibitoire, et ne pas être une solution viable. Nous nous devons ici de faire remarquer qu'une analyse coûts-avantages aurait dépassé la portée de cette étude et du mandat émis à son égard. Il demeure que les résultats de cet exercice de modélisation hydrologique donnent certains repères aux décideurs.

Enfin, le projet aura permis d'élaborer un nouvel outil dans PHYSITEL qui permet de recenser les aires de stockage potentiel à partir d'un volume préétabli d'eaux à stocker. Le projet de modélisation HYDROTEL pour le bassin LCRR se prête à l'évaluation de multiples scénarios de stockage dans des terres en amont, et cela pour chaque sous-bassin du LC. Toutefois, peu importe le scénario dont on parle, il faut mener des études approfondies, notamment :

- un examen des cartes de crues dans le bassin LCRR à partir des extrants HYDROTEL (simulation des débits) servant à alimenter un modèle de régime hydraulique destiné à évaluer l'impact potentiel d'une réduction du niveau des eaux dans le lac Champlain et la rivière Richelieu, selon des valeurs précisées;
- une évaluation de l'effet sur les débits minimums; et
- une analyse coûts-avantages précisant les coûts totaux (p. ex., les constructions, les servitudes et autres) et les avantages totaux (p. ex., dommages évités, évaluation des biens et des services environnementaux, etc.).

Les résultats de cette étude quantifient les répercussions des scénarios de recharge sur le débit et le niveau d'eau par rapport à ce que donneraient des infrastructures classiques d'atténuation des crues, comme des digues et des barrages, et ils illustrent en quoi divers scénarios de stockage dans des terres en amont fondés sur l'aménagement ou la restauration de milieux humides ou l'inondation de terres agricoles riveraines pourraient contribuer à atténuer les crues au niveau des affluents du LC et du bassin LCRR.

LA COMMISSION MIXTE INTERNATIONALE

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



RESTEZ CONNECTÉS ET MOBILISÉS

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

Envoyez un courriel à lcrr@ijc.org

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

Suivez l'Étude sur les médias sociaux

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

 www.facebook.com/internationaljointcommission/

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



TABLE DES MATIÈRES

Remerciements	i
Résumé	iii
Restez connectés et mobilisés	ix
1 INTRODUCTION AU RAPPORT	1
2 OBJECTIFS	3
3 MÉTHODOLOGIE	4
4 COLLECTE/ TRANSFERT ET TRAITEMENT DES DONNÉES AU MOYEN DE PHYSITEL	5
5 ÉTALONNAGE ET VALIDATION HYDROTEL	9
6 EFFETS DES MILIEUX HUMIDES EXISTANTS SUR LE RÉGIME D'ÉCOULEMENT DES COURS D'EAU	17
6.1 EFFETS DES MILIEUX HUMIDES SUR LES DÉBITS MAXIMUMS	18
6.2 EFFETS DES MILIEUX HUMIDES EXISTANTS SUR L'HYDROGRAMME DE DÉBIT MAXIMUM	21
6.3 EFFETS DES MILIEUX HUMIDES EXISTANTS SUR LA CRUE DE 2011	23
7 LES ENSEIGNEMENTS DE LA CRUE DE 2011	27
8 ÉVALUATION DU SCÉNARIO DE STOCKAGE D'EAU SUR DES TERRES AGRICOLES RIVERAINES	29
8.1 EFFETS SUR LES DÉBITS MAXIMUMS	31
8.2 EFFETS SUR LES CRUES DE 2011	34
9 SCÉNARIO D'AMÉNAGEMENT/ DE RESTAURATION DE MILIEUX HUMIDES	36

9.1	SCÉNARIO D'AMÉNAGEMENT/DE RESTAURATION DE MILIEUX HUMIDES D'APRÈS DES DONNÉES SPATIALES	36
9.1.1	Effets sur les débits maximums	37
9.1.2	Effets sur la crue de 2011 du scénario d'aménagement /de restauration de milieux humides	41
9.2	SCÉNARIO RELATIF AUX MILIEUX HUMIDES DE L'USEPA	42
9.2.1	Effet sur les débits maximums	43
9.2.2	Effets du scénario de l'EPA relatif aux milieux humides sur la crue de 2011	47
9.3	COMBINAISON DES SCÉNARIOS RELATIFS AUX MILIEUX HUMIDES	48
9.3.1	Effets sur les débits maximums	50
9.3.2	Effets de la combinaison des scénarios relatifs aux milieux humides sur les crues de 2011	53
10	<u>OUTIL DE CARTOGRAPHIE DU STOCKAGE DE L'EAL</u>	55
10.1	OUTIL DE CALCUL DE STOCKAGE DES EAUL	55
10.1.1	Cartographie du stockage potentiel de l'eau	56
10.1.2	Référence spatiale pour le calcul	56
10.1.3	Cible de stockage d'eau	57
10.1.4	Types de stockage : dynamique et statique	58
10.1.5	Options de stockage de l'eau	59
10.2	ANALYSE DU BASSIN DU LAC CHAMPLAIN ET DE LA RIVIÈRE RICHELIEU ((LCRR)	59
11	<u>PRINCIPALES OBSERVATIONS ET CONCLUSIONS</u>	62
ANNEXE I - Liste des tâches accomplies		
ANNEXE II - Description générale des modules relatifs aux milieux humides d'HYDROTEL		
ANNEXE III - Effets des scénarios relatifs aux milieux humides et au stockage de l'eau sur les débits minimums		

Liste des Figures

Figure 4-1. Modèle numérique d'altitude (MNA) et réseau de cours d'eau et de lacs.....	6
Figure 4-2. Inventaire de l'occupation du sol et des milieux humides.....	6
Figure 4-3. Types de sol.	6
Figure 4-5. Superficie et types d'aires de drainage (isolées et riveraines) des milieux humides dans le bassin LCRR.....	7
Figure 4-4. PHYSITEL - Données d'entrée et traitement des données.....	7
Figure 5-1. Projet LCRR d'HYDROTEL (capture d'écran de l'interface utilisateur graphique).....	9
Figure 5-2. Emplacement des 25 stations hydrométriques dans le bassin LCRR.	10
Figure 5-3. Séries chronologiques [quotidienne (à gauche) et annuelle (à droite) (1992-2013)] des débits observés et simulés et des apports nets du bassin (ANB).	14
Figure 5-4. Hydrogramme annuel moyen de 1992-2013 (à gauche) et hydrogramme de 2011 (à droite) des débits et des apports nets du bassin observés et simulés.	15
Figure 6-1. Principaux sous-bassins du LC >100 km ²).	18
Figure 6-2. Effets des milieux humides actuels sur l'atténuation : des débits maximums dans les 20 sous-bassins du LC; des ANB du LC et du débit de la RR aux rapides Fryers, pour différents pas de temps : a) annuels, b) printaniers et c) estivaux/automnaux.	18
Figure 6-3. Cadre méthodologique utilisé afin : (a) de définir les débits supérieurs à un seuil donné, dans une année donnée (p. ex., Q2); (b) d'extraire et (c) de caractériser les épisodes de crue.....	22
Figure 6-4. Incidence de l'absence de milieux humides sur les débits et les niveaux d'eau dans le bassin LCRR compte tenu des conditions de 2011 en utilisant HYDROTEL et MBH selon un pas de temps journalier.	226
Figure 7-1. Représentation simplifiée de la crue de 2011 par une crue à comportement synthétique et par la forme de crue qui en découle pour des réductions du débit de pointe de 2011 de 5 %, de 10 % et de 20 % à la station des rapides Fryers, entre le 1er avril et le 3 juillet.	27
Figure 8-1. Représentation générale du scénario de stockage de l'eau sur des terres agricoles riveraines.....	29
Figure 8-2. Gain d'atténuation des débits maximums attribuable au stockage d'eau sur des terres agricoles riveraines du bassin LCRR pour les 20 sous-bassins du LC, du débit des ANB du LC et du débit de la RR aux rapides Fryers par rapport aux conditions actuelles pour différents pas de temps : a) annuels, b) printaniers et c) estivaux/automnaux.....	32
Figure 8-3. Effets du stockage de l'eau sur les terres agricoles riveraines du bassin LCRR établi par HYDROTEL en fonction du MBH, en regard des conditions de 2011 et pour un pas de temps journalier.	34
Figure 9-1. Élaboration d'un scénario relatif aux milieux humides à partir d'un MNA et de certains critères de conception (p. ex., superficie des milieux humides ou nombre de cellules convergeant vers les cases les plus profondes et l'aire de drainage ou nombre minimal de cases convergeant vers la zone occupée par les milieux humides)- anglais seulement.	36
Figure 9-2. Représentation générale du scénario relatif aux milieux humides à l'aide du MNA..	37
Figure 9-3. Gain d'atténuation du débit maximum annuel après ajout de 649 km ² de milieux humides dans le bassin	

LCRR pour les 20 sous-bassins du LC, les ANB du LC et le débit de la RR aux rapides Fryers, comparés aux conditions actuelles pour différents pas de temps : a) annuels, b) printaniers et c) estivaux/automnaux.	39
Figure 9-4. Effets du scénario d'aménagement/de restauration de milieux humides dans le bassin LCRR compte tenu des conditions de 2011 en utilisant HYDROTEL et un MBH selon un pas de temps journalier.	41
Figure 9-5. Représentation générale du scénario de l'USEPA relatif aux milieux humides qui présentent le meilleur potentiel....	43
Figure 9-6. Les gains d'atténuation des débits maximums du scénario relatif aux milieux humides à potentiel élevé de l'USEPA dans le bassin LCRR pour les 20 sous-bassins du LC, le débit des ANB du LC et le débit de la RR aux rapides Fryers se comparent aux conditions actuelles pour différents pas de temps : a) annuels, b) printaniers et c) estivaux/automnaux.	45
Figure 9-7. Effet du scénario de l'USEPA relatif aux milieux humides présentant le meilleur potentiel dans le bassin LCRR, compte tenu des conditions de 2011, en utilisant HYDROTEL et un MBH selon un pas de temps journalier.	47
Figure 9-8. Illustration générale d'une combinaison de scénarios relatifs aux milieux humides.	48
Figure 9-9. Gains d'atténuation des débits maximums selon une combinaison des scénarios relatifs aux milieux humides dans le bassin LCRR pour les 20 sous-bassins du LC, les ANB du LC et le débit de la RR aux rapides Fryers, en regard des conditions actuelles et pour différents pas de temps : a) annuels, b) printaniers et c) estivaux/automnaux.	50
Figure 9-10. Effets d'une combinaison de scénarios relatifs aux milieux humides sur le bassin LCRR en regard des conditions de 2011 en utilisant HYDROTEL et MBH à un pas de temps journalier.	53
Figure 10-1. Saisie d'écran de l'interface-utilisateur graphique de l'outil de calcul de stockage des eaux	55
Figure 10-2. Étapes de base pour créer une carte des emplacements potentiels de stockage des eaux (capture d'écran PHYSITEL).	56
Figure 10-3. Carte altimétrique de référence (écran d'impression PHYSITEL).....	57
Figure 10-4. Critères de calcul dans l'outil de cartographie des aires de stockage de l'eau.....	57
Figure 10-5. elation entre niveau et volume d'eau dans le lac Champlain - anglais seulement.	58
Figure 10-6. Accumulation d'eau dans l'aire de stockage.....	58
Figure 10-7. Débits quotidiens de la RR à la station hydrométrique des rapides Fryers pour la période 1938-2017.	59
Figure 10-8. Cartes de stockage d'eau selon quatre conditions modélisées.	60

Appendix II

Figure A2.1 Régime d'échange hydrique via des milieux humides isolés ou riverains (repris de Fossey et al., 2015, sans l'autorisation de l'éditeur).

Appendix III

Figure A3.1. Effets des milieux humides actuels sur l'amplification des faibles débits dans les 20 sous-bassins du LC, sur le débit des ANB du LC et sur le débit de la RR aux rapides Fryers pour différents pas de temps : a) annuels, b) printaniers et c) estivaux/automnaux

Figure A3.2. Gains d'amplification des débits minimums attribuables au stockage de l'eau sur des terres agricoles riveraines dans le bassin LCRR pour les 20 sous-bassins du LC, du débit des ANB dans le LC et du débit de la RR aux rapides Fryers par rapport aux conditions actuelles et pour différents pas de temps : a) annuels, b) hivernaux et c) estivaux/automnaux.

Figure A3.3. Gains d'amplification des débits minimums après ajout de 652 km² de milieux humides dans le bassin LCRR pour les 20 sous-bassins du LC, du débit des ANB du LC et du débit de la RR aux rapides Fryers par rapport aux conditions actuelles et pour différents pas de temps : a) annuels, b) hivernaux et c) estivaux/automnaux.

Figure A3.4. Gains d'amplification des débits minimums attribuables au scénario relatif aux milieux humides de l'USEPA dans le bassin LCRR pour les 20 sous-bassins du 20 LC, du débit des ANB du LC et du débit de la RR aux rapides Fryers, par rapport aux conditions actuelles et pour différents pas de temps : a) annuels, b) hivernaux et c) estivaux et automnaux.

Figure A3.5 Gains d'amplification des débits minimums attribuables aux scénarios combinés relatifs aux milieux humides dans le bassin LCRR pour les 20 sous-bassins du LC, du débit des ANB du LC et du débit de la RR aux rapides Fryers par rapport aux conditions actuelles et pour différents pas de temps : a) annuels, b) hivernaux et c) estivaux/automnaux

Liste des Tableaux

Tableau ES-1-1. Réduction moyenne des débits et des niveaux d'eau maximums selon chacun des quatre scénarios de stockage.	v
Tableau 4-1. Données spatiales de discréttisation des bassins hydrographiques dans PHYSITEL.	5
Tableau 4-2. Superficie des aires de drainage et superficie de chaque type de milieu humide actuel dans le bassin LCRR et dans le bassin du lac Champlain (LC)s.	8
Tableau 5-1. Résultats de l'étalonnage et de la validation d'HYDROTEL.	11
Tableau 6-1. Description des zones occupées par des milieux humides et par leurs aires de drainage pour les 20 sous-bassins du LC et du LCRR (aux rapides Fryers).	19
Tableau 6-2. Effets des milieux humides actuels sur l'atténuation des débits maximums dans les 20 sous-bassins du LC, ainsi que des ANB du LC et du débit de la RR aux rapides Fryers, et des niveaux d'eau du LC et de la RR (à la marina de Saint-Jean-sur-Richelieu).	20
Tableau 6-3. Valeurs médianes de l'effet des milieux humides sur le débit de pointe, la persistance du débit, le débit moyen et le volume de l'écoulement (c.-à-d. le volume des eaux de ruissellement).	24
Tableau 6-4. Taux de fréquence relative de l'effet d'atténuation (valeur négative dans le tableau 6.3) des milieux humides sur le débit de pointe, la persistance du débit, le débit moyen et le volume du débit.	25
Tableau 6-5. Résumé des effets dus à l'absence de milieux humides sur : le débit des ANB, le niveau du LC, le débit de la RR aux rapides Fryers et le niveau de la RR (à la marina de Saint-Jean-sur-Richelieu), en regard des conditions qui régnaienent en 2011.	26
Tableau 7-1. 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 RR en 2011, aux rapides Fryers, suivant deux scénarios de stockage dans des aires additionnelles : 50 cm et 10 cm d'eau.	28
Tableau 8-1. Impact spatial du stockage de l'eau sur les terres agricoles riveraines du bassin LCRR pour les 20 sous-bassins du LC, le débit des ANB du LC et le débit de la RR aux rapides Fryers.	30
Tableau 8-2. Gains d'atténuation des débits maximums, sur une base annuelle, attribuables au stockage de l'eau sur des terres agricoles riveraines du bassin LCRR pour les 20 sous-bassins du LC, du débit des ANB du LC, du débit de la RR aux rapides Fryers et des niveaux du LC et de la RR (à la marina de Saint-Jean-sur-Richelieu), comparativement aux conditions actuelles.	33

Tableau 8-3. Résumé des effets du stockage de l'eau dans des terres agricoles riveraines sur : le débit des ANB, le niveau d'eau du LC, le débit de la RR aux rapides Fryers et le niveau d'eau de la RR (à la marina de Saint-Jean-sur-Richelieu), en regard des conditions de 2011.....	35
Tableau 9-1. Incidence spatiale du scénario relatif aux milieux humides sur le bassin LCRR pour les 20 sous-bassins du LC, le débit des ANB du LC et RR aux rapides Fryers.....	38
Tableau 9-2. Gain d'atténuation du débit maximum annuel après ajout de 649 km ² de milieux humides dans le bassin LCRR pour les 20 sous-bassins du LC, et débit des ANB du LC et de la RR (à la marina de Saint-Jean-sur-Richelieu), comparés aux conditions actuelles.....	40
Tableau 9-3. Résumé des impacts du scénario relatif aux milieux humides sur : le débit des ANB, le niveau d'eau du LC, le débit de la RR aux rapides Fryers et le niveau d'eau de la RR (à la marina de Saint-Jean-sur-Richelieu), en regard des conditions de 2011.	42
Tableau 9-4. Impact spatial du scénario relatif aux milieux humides à potentiel élevé de l'USEPA sur le bassin LCRR pour les 20 sous-bassins du LC, le débit des ANB du LC et le débit de la RR aux rapides Fryers.	44
Tableau 9-5. Gains d'atténuation des débits maximums annuels du scénario de l'USEPA relatif aux milieux humides présentant le meilleur potentiel dans le bassin LCRR pour les 20 sous-bassins du LC, les ANB du LC, le débits de la RR aux rapides Fryers et les niveaux du LC et de la RR (à la marina de Saint-Jean-sur-Richelieu) comparativement aux conditions actuelles.	46
Tableau 9-6. Résumé des impacts des scénarios de l'USEPA relatifs aux milieux humides sur le débit des ANB, le niveau d'eau du LC, le débit de la RR aux rapides Fryers et le niveau de la RR (à la marina de Saint-Jean-sur-Richelieu), en regard des conditions de 2011.	48
Tableau 9-7. Incidence spatiale d'une combinaison de scénarios relatifs aux milieux humides sur le bassin LCRR pour les 20 sous-bassins du LC, les ANB du LC et le débit de la RR aux rapides Fryers.	49
Tableau 9-8. Gains d'atténuation des débits maximums selon une combinaison des scénarios relatifs aux milieux humides dans le bassin LCRR pour les 20 sous-bassins du LC, les ANB du LC et le débit de la RR aux rapides Fryers, ainsi que les niveaux du LC et de la RR (à la marina de Saint-Jean-sur-Richelieu), en regard des conditions actuelles.....	52
Tableau 9-9. Résumé des impacts découlant d'une combinaison de scénarios relatifs aux milieux humides sur : le débit des ANB, le niveau d'eau du LC, le débit de la RR aux rapides Fryers et le niveau de la RR (à la marina de Saint-Jean-sur-Richelieu), en regard des conditions de 2011.	54
Tableau 10-1. Données d'entrée du bassin LCRR et résultats pour la création de cartes de stockage d'eau.....	60
Tableau 11-1. Occupation du sol selon les scénarios de stockage d'eau dans des milieux humides et sur des terres agricoles.....	64

1 INTRODUCTION AU RAPPORT

Ce rapport documente l'étude visant à évaluer l'effet de divers scénarios de stockage en altitude basés sur la construction ou la restauration de zones humides ou l'inondation de terres agricoles riveraines sur les débits des affluents du LC et du RR ainsi que les apports au LC et les niveaux d'eau qui en découlent dans le LC et le RR.

Les sous-bassins de la rivière Richelieu (RR) et du lac Champlain (LC) forment le bassin du lac Champlain et de la rivière Richelieu (LCRR). Selon la CMI (2013), environ 16 % du bassin LCRR de 23 800 km² se trouvent au Canada et 84 % aux États-Unis. Le sous-bassin de la RR représente environ 10 % de toute l'eau qui se déverse annuellement dans le fleuve Saint-Laurent, tandis que les apports totaux du LC représentent les 90 % restants (CMI, 2013). Saad et al. (2016) mentionnent que les importantes quantités de neige tombées au cours de l'hiver 2010-2011, la rapidité à laquelle cette neige a fondu au printemps 2011 — notamment sous l'effet d'épisodes de précipitations intenses accompagnées de vents du sud forts et soutenus dans la vallée du lac Champlain — se sont combinés pour produire une crue printanière record. De leur côté, Riboust et Brissette (2016) ont déterminé que les précipitations totales en avril et en mai 2011 et un manteau neigeux maximal correspondaient, respectivement, à des périodes de récurrence supérieures à 500 ans et à 15 ans. Selon la CMI (2013), indépendamment de ces évaluations statistiques, les collectivités au nord du LC et le long de la RR ont subi des pertes économiques considérables, soit 79 % au Québec, 10 % dans le Vermont et 11 % dans l'État de New York.

S'agissant de l'atténuation des crues, il existe deux approches pour protéger les secteurs critiques du bassin LCRR:

- 1 permettre que l'eau soit naturellement redirigée vers une plaine inondable, à mesure que la hauteur d'eau s'élève jusqu'à atteindre et dépasser le niveau des berges (ce qui correspond au stockage actif-passif);
- 2 permettre la rétention naturelle de l'eau dans des secteurs terrestres ou des plans d'eau particuliers (ce qui correspond au stockage passif); et (2) diriger l'eau par le biais de vannes, de digues, de canaux et d'autres structures pour s'assurer qu'une quantité prédéterminée de cette eau est envoyée vers les terres désignées, loin des zones à protéger (ce qui correspond au stockage actif).

Quand on applique à la fois une approche active et une approche passive, la première complète la seconde. D'autres chercheurs se sont penchés sur la question de la restauration des milieux humides à l'échelle du bassin versant en tant qu'approche de stockage passif en vue de réduire à la fois les débits de pointe (p. ex., Fossey et al., 2016a, b, c) et, dans une moindre mesure, le volume des eaux de ruissellement (p. ex., Blanchette et al., 2019).

En effet, des études de modélisation hydrologique ont montré que les milieux humides réduisent généralement le débit sur la branche montante, qu'ils atténuent le débit de pointe et augmentent légèrement le débit sur la branche descendante d'un hydrogramme. Ces effets ont, par ailleurs, été observés et pas seulement simulés. En effet, Price et al. (2005) ont présenté leurs conclusions à cet égard en ce qui concerne le Canada, tandis que Cole et al. (1997) ont fait des observations semblables.

Dans le bassin du LC, un événement exceptionnel bien documenté a clairement démontré que les milieux humides peuvent atténuer les crues, notamment dans le bassin de la Otter Creek, entre Middlebury et Rutland, au Vermont. Lors de la tempête tropicale Irene, en août 2011, les milieux humides et les plaines inondables ont évité à Middlebury de subir des pertes dues aux crues qui auraient pu atteindre 1,8 millions de dollars US (Watson et al., 2016). Une étude portant sur ce même bassin (Otter Creek) par Watson et al. (2016) a consisté, pour la première fois, à calculer les avantages économiques

que les milieux humides et les plaines inondables ont procurés lors d'une des tempêtes majeures ayant frappé la côte est des États-Unis au cours des dernières années. Après avoir analysé 10 épisodes de crue pour estimer la valeur de la plaine inondable de la rivière Otter Creek, les chercheurs ont déterminé que cette barrière naturelle permet à la ville de Middlebury d'économiser 126 000 à 450 000 \$ US par année, soit jusqu'à 78 % de la valeur des dommages potentiels..

L'objectif général de la présente étude a consisté — notamment à partir des renseignements contextuels susmentionnés — à évaluer l'effet de divers scénarios de stockage dans des terres en amont (reposant sur l'aménagement ou la restauration de milieux humides ou sur l'inondation de terres agricoles riveraines) sur les débits des tributaires du LC et de la RR, ainsi que sur les apports dans le LC et les niveaux d'eau qui en découlent dans le LC et dans la RR.



2 OBJECTIFS

Cette étude avait pour objectif principal d'évaluer l'effet des approches actives-passives combinées des méthodes d'atténuation des crues dans le bassin LCRR, c'est-à-dire de déterminer le potentiel:

- 1 du stockage des eaux de crue sur des terres agricoles riveraines; et
- 2 d'exploiter les milieux humides actuels, restaurés ou aménagés des tributaires des sous-bassins des États du Vermont et de New York afin de réduire le volume des eaux de ruissellement, les débits de pointe et les apports nets du bassin dans le lac Champlain.

La première approche peut être considérée comme une approche active, en ce sens qu'elle consiste à diriger les eaux de ruissellement et de débordement vers des digues. Toutefois, comme les digues n'ont pas été explicitement modélisées dans le cadre de ce projet, il convient davantage de considérer cette approche comme une approche pseudo-active.

L'annexe I donne une liste des tâches accomplies en 2019 et 2020 au titre de ce travail.



3 MÉTHODOLOGIE

Sept (7) grandes activités ont permis de réaliser les objectifs susmentionnés axés sur l'évaluation de l'effet des approches passives-actives combinées:

- 1** Adaptation de l'outil HYDROTEL pour le bassin LCRR — avec le soutien du groupe chargé des mesures de gestion et d'atténuation des crues (MGAC) — ainsi que de tous les ensembles de données utilisés pour élaborer une base à jour à l'aide de PHYSITEL et réaliser une modélisation hydrologique actuelle du bassin LCRR. Il était important de commencer à partir de la même base de données, mais également nécessaire de mettre à jour le projet des MGAC PHYSITEL/HYDROTEL (Lucas-Picher et al., 2020) à l'aide de données plus récentes ou à plus haute résolution spatiale.
- 2** Paramétrage de tous les milieux humides, compte tenu de la plus récente carte d'occupation du sol, suivi de l'étalonnage et de la validation d'HYDROTEL à l'aide d'un logiciel d'optimisation (OSTRICH).
- 3** Élaboration d'un scénario consistant essentiellement à stocker l'eau sur des terres agricoles riveraines en misant sur le réseau hydrographique et sur la proximité de terres agricoles.
- 4** Mise en œuvre des différents scénarios d'aménagement/de restauration des milieux humides par l'application *a priori* d'une approche simplifiée fondée sur des données topographiques (c.-à-d. MNA, carte d'occupation du sol) et d'un scénario pertinent existant, soit le scénario de protection et de restauration des milieux humides élaboré par l'Environmental Protection Agency (EPA) des États-Unis.
- 5** Utilisation d'HYDROTEL pour évaluer l'atténuation potentielle des débits maximums assurée par la configuration actuelle des milieux humides, de même qu'en fonction des scénarios relatifs aux milieux humides aménagés ou restaurés ou des scénarios de stockage d'eau sur des terres agricoles riveraines en ce qui concerne les principaux tributaires des sous-bassins LCRR.
- 6** Évaluation des répercussions de la répartition actuelle des milieux humides ainsi que des scénarios relatifs aux milieux humides aménagés ou restaurés ou des scénarios de stockage d'eau sur des terres agricoles riveraines sur les niveaux d'eau du lac Champlain et sur les débits et niveaux d'eau de la rivière Richelieu, à l'aide des résultats d'HYDROTEL et du modèle de bilan hydrique (MBH) journalier pour le lac Champlain relativement aux apports nets du bassin du lac Champlain.
- 7** Évaluation de la capacité potentielle de stockage d'eau fournie par des terres agricoles à l'aide de l'algorithme MNA ou HAND (Nobre et al., 2016) pour les principaux tributaires du bassin LCRR et à partir de la cartographie PHYSITEL des aires de stockage potentiel loin des zones à protéger.

Ces activités sont décrites dans les sections suivantes.

4 COLLECTE/TRANSFERT ET TRAITEMENT DES DONNÉES AU MOYEN DE PHYSITEL

PHYSITEL est un système d'information géographique (SIG) spécialisé (Turcotte et al., 2001; Rousseau et al., 2011; Royer et al., 2006) mis au point pour déterminer la structure complète de drainage d'un bassin hydrographique à l'aide d'un modèle numérique d'altitude (MNA) et de réseaux de rivières et de lacs numérisés. HYDROTEL est un modèle hydrologique réparti qui simule les débits des cours d'eau et des variables d'état, comme l'équivalent en eau de la neige et la saturation en eau, à l'aide de variables météorologiques de base. La DEHQ¹ avait déjà mis en place un projet PHYSITEL/HYDROTEL pour le bassin LCRR qui a été utilisé par les chercheurs de l'ÉTS² afin de simuler des hydrogrammes annuels moyens sur plusieurs années ainsi que la crue de 2011 dans le bassin LCRR. La DEHQ avait donc établi les limites du bassin hydrographique et du réseau hydrographique, et bâti une base de données hydrométéorologiques. Pour la présente étude, nous avons retenu une résolution horizontale de 30 m, plutôt que la résolution spatiale de 100 m de la DEHQ afin d'exploiter au mieux les cartes d'occupation du sol et des milieux humides alors disponibles. Afin de définir plus finement le bassin dans PHYSITEL, il a fallu intégrer : une carte des occupations classifiées du sol; une carte des types de sol (selon la teneur en sable, en loam et en argile), avec les propriétés hydrodynamiques correspondantes (Rawls et Brakensiek, 1989); de même que les caractéristiques des milieux humides en fonction des cartes d'inventaire existantes.

Le tableau 4.1 présente les renseignements nécessaires à la modélisation hydrologique répartie du bassin LCRR à l'aide de la plateforme de modélisation HYDROTEL/PHYSITEL.

Tableau 4-1. Données spatiales de discréttisation des bassins hydrographiques dans PHYSITEL.

Données d'entrée	Source disponible
Modèle numérique d'altitude (MNA)	United States Geological Survey (USGS) (résolution horizontale de 30 m)
Réseaux de cours d'eau et de lacs	United States Geological Survey (USGS) Réseau hydrographique du Québec (Énergie et Ressources naturelles Québec)
Occupation du sol	National Land Cover Database (NLCD) 2016 (USGS) Cartographie de l'occupation du sol des basses terres du Saint-Laurent 2018 (Données Québec, Gouvernement du Québec)
Type de sol (texture)	Carte générale des sols de l'USGS (STATSGO2) Carte générale des sols Pédo-paysages du Canada v3.2 (gouvernement du Canada) Pédo-paysages du Canada V3.2
Milieux humides	National Wetlands Inventory (U.S. Fish & Wildlife Service) Cartographie détaillée des milieux humides 2017 (Données Québec, Gouvernement du Québec)

Les figures 4.1 à 4.3 présentent les cartes du bassin LCRR obtenues à partir des données d'entrée mentionnées dans le tableau 4.1.

¹ Direction de l'expertise hydrique du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec
² École de technologie supérieure

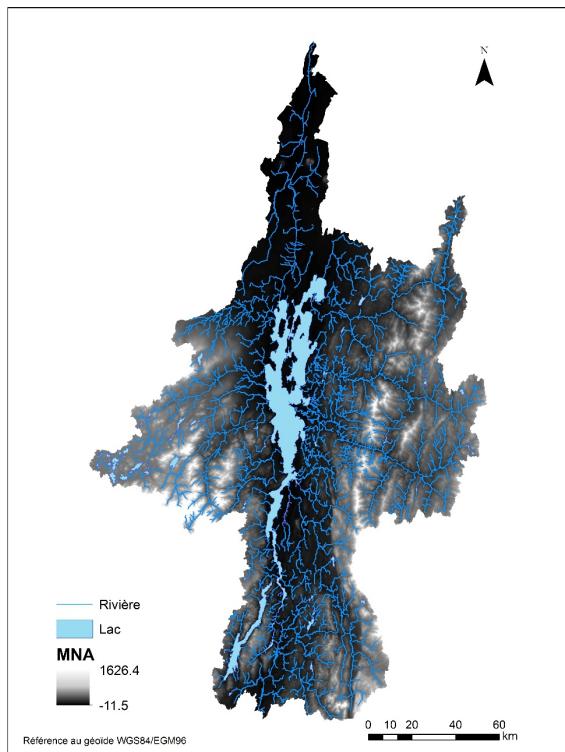


Figure 4-1. Modèle numérique d'altitude (MNA) et réseau de cours d'eau et de lacs.

Pour la modélisation hydrologique, il a fallu disposer de données supplémentaires:

- données météorologiques mesurées aux stations existantes ou reconstruites, distribuées en réseau; et
- données sur les débits des cours d'eau relevés à n'importe laquelle des stations hydrométriques du réseau hydrographique ou données sur les apports reconstitués dans le réservoir ou dans le lac.

C'est donc à partir des données géographiques susmentionnées que PHYSITEL a permis de subdiviser le bassin versant en unités hydrologiques relativement homogènes (UHRH), et à définir les versants et les segments de cours d'eau/de lac qui ont, dès lors, constitué les domaines de calcul d'HYDROTEL. Autrement dit, PHYSITEL a déterminé la structure de drainage interne (pentes et sens de l'écoulement), les limites des bassins versants, les limites des sous-bassins et des versants, et le réseau hydrographique.

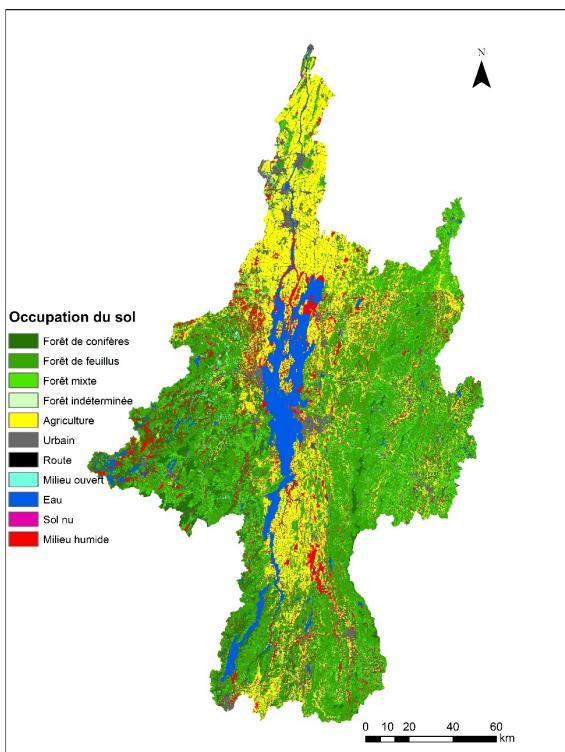


Figure 4-2. Inventaire de l'occupation du sol et des milieux humides.

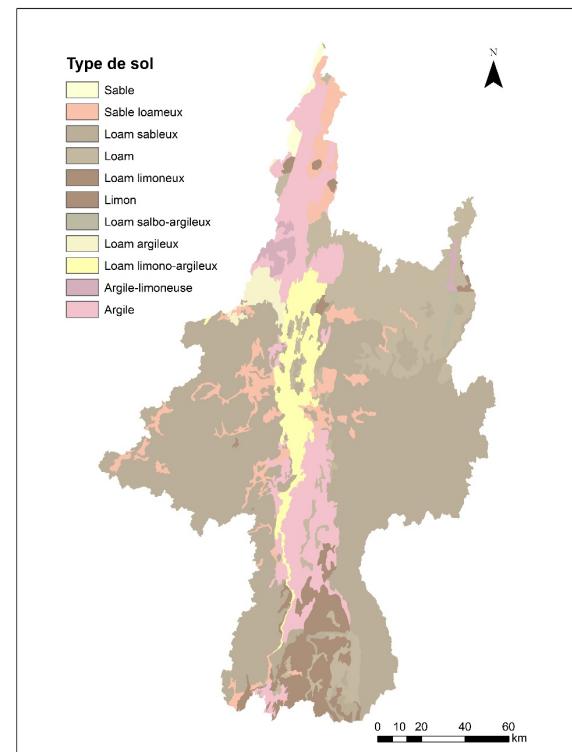


Figure 4-3. Types de sol.

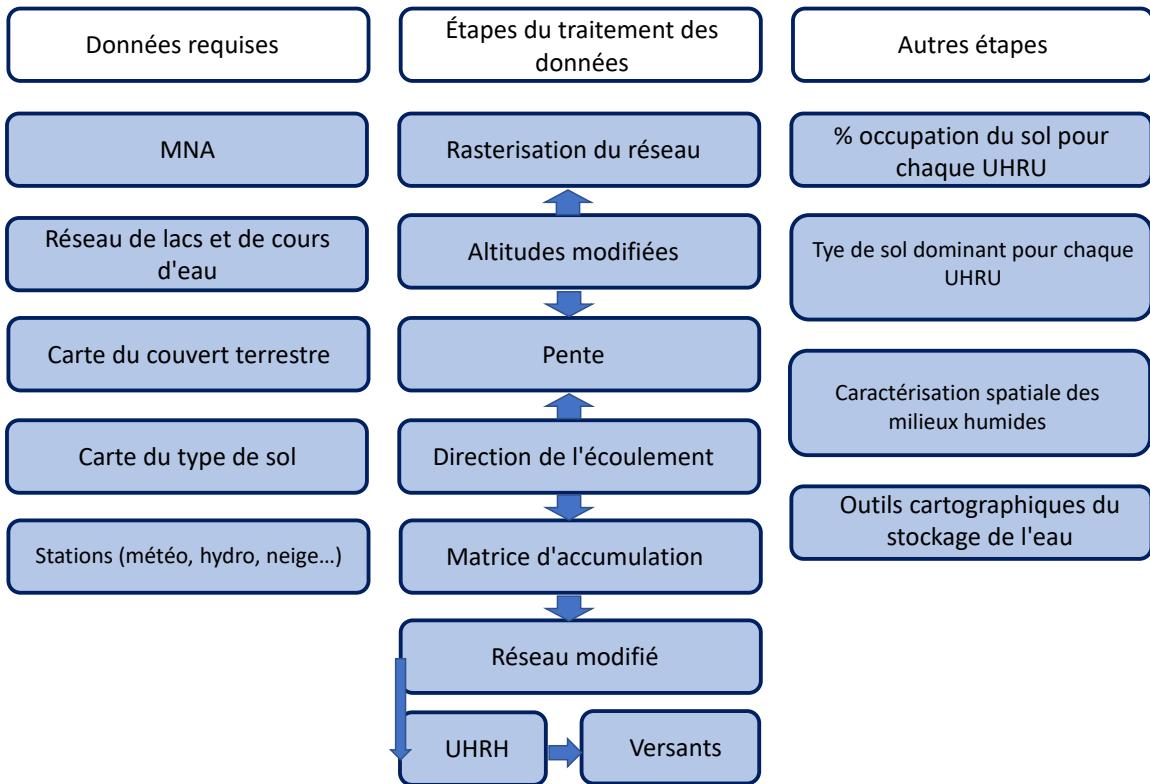


Figure 4-5. PHYSITEL - Données d'entrée et traitement des données.

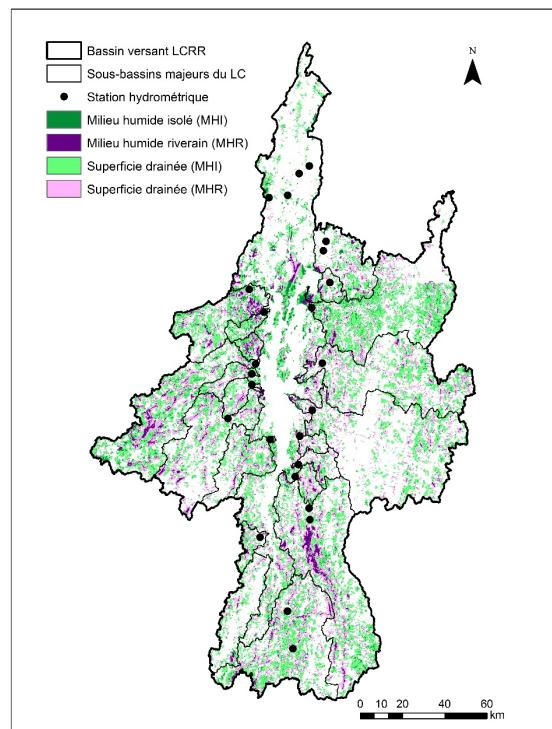


Figure 4-4. Superficie et types d'aires de drainage (isolées et riveraines) des milieux humides dans le bassin LCRR.

Pour chaque UHRH, PHYSITEL a calculé un indice topographique et défini le type de sol dominant, ainsi que les pourcentages de chaque type d'occupation du sol. La figure 4.4 résume les diverses tâches effectuées par PHYSITEL.

PHYSITEL a permis d'établir une caractérisation spatiale des milieux humides en fonction des types de milieux humides existants (voir la figure 4.5) d'après la carte d'occupation du sol. De plus, PHYSITEL délimite les zones isolées et les zones riveraines (en fonction du seuil d'adjacence et de connectivité aux cours d'eau) des milieux humides et des aires de drainage correspondantes.

En complément de ce qui précède, le tableau 4.2 présente la superficie cumulative de drainage pour chaque type de milieu humide dans les bassins LCRR et du lac Champlain (LC). Pour ce qui est de l'ensemble du bassin, la superficie cumulative (totale) et l'aire de drainage des milieux humides du bassin LCRR augmentent respectivement de 7 % et de 34 %; 92 % des milieux humides se trouvent dans le sous-bassin du LC. Il convient de noter que la superficie des aires de drainage n'englobe pas les milieux humides. D'après le tableau 4.2, même à partir d'une superficie de milieux humides limitée, il serait possible de drainer une grande partie d'un bassin hydrographique. La section 5 présente un tableau détaillé de la superficie des milieux humides et de la superficie des aires de drainage pour tous les principaux sous-bassins du bassin LCRR.

Tableau 4-2. Superficie des aires de drainage et superficie de chaque type de milieu humide actuel dans le bassin LCRR et dans le bassin du lac Champlain (LC)s.

Watershed	Superficie (km ²) (fraction du bassin)	
	LCRR	LC
Totalité du bassin	23 799 km ²	21 254 km ²
Milieux humides isolés (MHI)	945 km ² (4 %)	849 km ² (4 %)
Milieux humides riverains (MHR)	740 km ² (3 %)	702 km ² (3 %)
Totalité des milieux humides (MHT)	1 684 km ² (7%)	1 551 km ² (7%)
Aire de drainage MHI	5 537 km ² (23 %)	5 254 km ² (25 %)
Aire de drainage MHR	2 561 km ² (11 %)	2 495 km ² (12 %)
Superficie totale de drainage	8 099 km ² (34%)	7 749 km ² (37%)

5 ÉTALONNAGE ET VALIDATION HYDROTEL

Pour chaque unité et portée de calcul, la modélisation hydrologique d'HYDROTEL (Fortin et al., 2001; Turcotte et al., 2003, 2007; Fossey et al., 2015) calcule : la répartition spatiale des conditions météorologiques; l'évapotranspiration; l'accumulation et la fonte de la neige; l'infiltration de l'eau dans les couches du sol; l'acheminement de l'eau vers les cours d'eau et l'écoulement de l'eau dans le réseau hydrographique. Ces valeurs ont été calculées pour un pas de temps journalier.

HYDROTEL comprend des modules spécifiques permettant de simuler les processus hydrologiques de chaque type de milieu humide (isolé et riverain) compte tenu du bilan hydrique à l'échelle de chaque UHRH. Le module sur les milieux humides simule l'interception de l'eau venant des précipitations, de la fonte des neiges et du ruissellement (de surface et de subsurface) de la zone contributrice (c.-à-d. de l'aire de drainage des milieux humides), de l'évapotranspiration, de la percolation au point bas de chaque milieu humide (qui contribue au débit de base), du stockage de l'eau et du débit à l'exutoire. Pour les milieux riverains humides, en plus des processus susmentionnés, le module simule l'échange direct d'eau et l'interaction avec le segment de cours d'eau adjacent sous la forme du ruissellement et du débordement. De plus, à l'échelle de chaque UHRH, les milieux humides isolés ou riverains sont regroupés numériquement pour former un milieu humide équivalent qui représente l'addition de la superficie totale et de la superficie de drainage des milieux humides isolés et riverains constituant un milieu humide équivalent isolé et un milieu équivalent riverain. Une description plus complète du module sur les milieux humides se trouve à l'annexe II, mais au besoin, le lecteur peut consulter la documentation citée.

Les données hydrométéorologiques sur grille ou provenant d'une station de mesure comprenaient les précipitations, les températures quotidiennes maximales et minimales de l'air et, aux fin d'étalonnage du modèle,

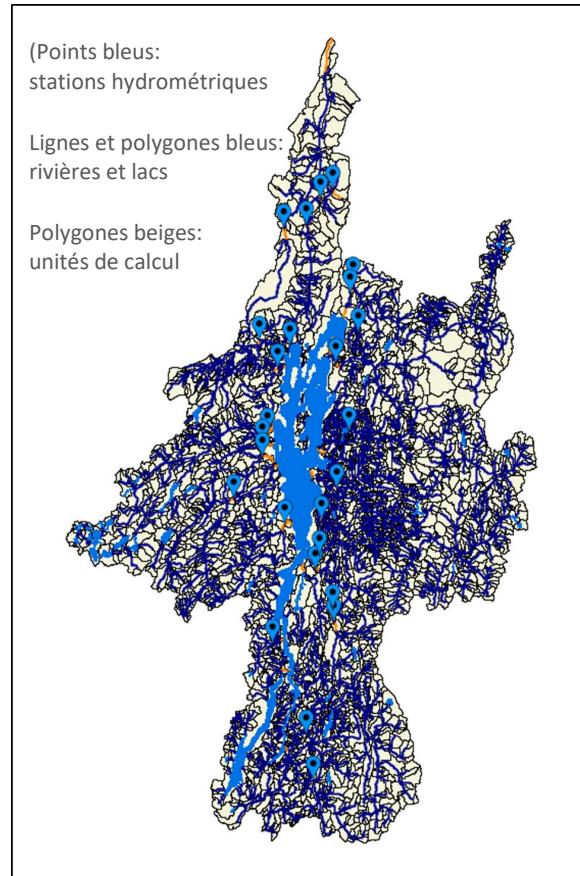


Figure 5.1. Projet LCRR d'HYDROTEL (capture d'écran de l'interface utilisateur graphique).

le débit des cours d'eau, les apports dans le réservoir réaménagés et toute autre variable d'état pertinente (comme l'équivalent en eau de neige ou EEN). Comme nous l'avons vu, le domaine de calcul comprenait des segments de rivière (SR) interconnectés et des versants (unité hydrologique) composées de trois couches de sol (c.-à-d. les UHRH).

La figure 5.1 présente les unités de calcul appliquées au projet de bassin LCRR d'HYDROTEL.

Pour la présente étude, le LCRR a été subdivisé en 8 473 UHRH (c.-à-d. en versants d'une moyenne de 2,81 km²) et en 3 289 segments de cours d'eau/lac (pour une moyenne de 2,81 km; le LC mesurant 170 km de long); il s'agit du domaine de calcul hydrologique.

Les simulations hydrologiques ont été déterminées par les conditions météorologiques maillées de 1950 à 2013, avec 690 points de quadrillage situés dans les limites du bassin hydrographique (données de Livneh et al., 2015). L'étalonnage et la validation du modèle ont été basés sur les données de 25 stations hydrométriques (18 de l'USGS, 6 de la DEHQ et 1 du Gouvernement du Canada) dans le bassin LCRR. Dans le cas du lac Champlain, les apports nets du bassin étaient également connus par quart de mois. Bien qu'HYDROTEL ait été étalonné pour corroborer au plus près le débit de la rivière Richelieu relevé à la station hydrométrique du gouvernement du Canada (Aux Rapides Fryers, no 02OJ007), la démarche pour ce site a consisté à introduire les apports nets du bassin du lac Champlain (selon HYDROTEL) dans la nouvelle version d'ECCC du modèle de bilan hydrique à pas de temps journalier établie pour le lac Champlain.

L'étalonnage du modèle a d'abord été effectué pour la période de 1992 à 2003 avec validation correspondant à la période de 2004 à 2013. Pour quelques stations hydrométriques, les périodes d'étalonnage et de validation n'étaient pas les mêmes en raison d'un manque de données, et il a fallu les déterminer en divisant la période de disponibilité des données en deux. L'étalonnage s'est fait en mode distribué afin de corroborer du mieux possible les débits observés. Pour la plupart des sous-bassins hydrographiques, l'étalonnage s'est fait de façon indépendante; par ailleurs, l'étalonnage du segment le plus aval de la rivière a bénéficié de l'étalonnage des sous-bassins situés en amont. Afin d'évaluer et d'illustrer les impacts de tous les scénarios de stockage d'eau pour des années hydrologiques présentant de fortes crues, un étalonnage spécifique a ensuite été effectué pour l'année 2011.

Les étalonnages ont été effectués à l'aide du Optimization Software Toolkit for Research Involving Computational Heuristics (OSTRICH; Matott, 2017), qui un outil d'optimisation et d'estimation des paramètres à algorithmes multiples, indépendant du modèle employé.

Tout au long du processus d'étalonnage, OSTRICH a modulé les paramètres du modèle en vue d'affiner l'ajustement entre les débits observés et les débits simulés, cela à l'aide d'une fonction multi-objectifs. Les valeurs optimales des paramètres pour chaque sous-bassin hydrographique (au site de la station hydrométrique) ont été trouvées à l'aide de l'indice d'efficacité de Kling-Gupta (EKG) (Gupta et al., 2009), où un (1) représente la valeur optimale de l'EKG, comme premier indicateur de rendement pertinent, et où l'erreur quadratique moyenne (EQM) est le deuxième indicateur de rendement.

La figure 5.2 présente l'emplacement des 25 stations hydrométriques situées dans les limites du bassin LCRR. Le tableau 5.1 présente les résultats de l'étalonnage et de la validation des principaux tributaires du lac Champlain et de la rivière Richelieu, l'accent portant sur le l'EKG pris en tant que premier indicateur de rendement.

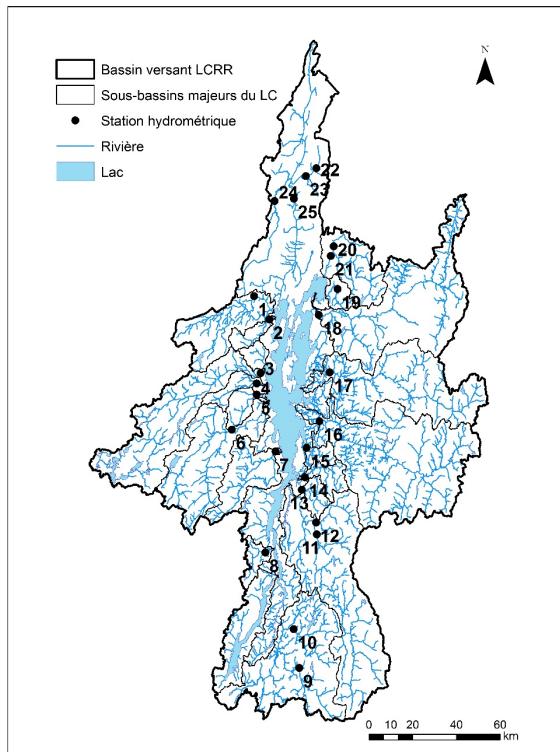


Figure 5.2. Emplacement des 25 stations hydrométriques dans le bassin LCRR.

Tableau 5-1. Résultats de l'étalonnage et de la validation d'HYDROTEL.

#	STATION	BASSIN	DRAINAGE (km ²)	ÉTALONNAGE		VALIDATION	
				PÉRIODE	EKG	PÉRIODE	EKG
1	4271500	GREAT CHAZY	648,73	1992-2003	0,80	2004-2013	0,68
2	4271815	LITTLE CHAZY	132,91	1992-2003	0,71	2004-2013	0,69
3	4273500	SARANAC	1 568,49	1992-2003	0,89	2004-2013	0,72
4	4273700	SALMON	166,99	1992-2003	0,79	2004-2013	0,54
5	4273800	LITTLE AUSABLE	176,99	1992-2003	0,80	2004-2013	0,50
6	4275500	AUSABLE	1 152,60	1992-2003	0,87	2004-2013	0,83
7	4276500	BOUQUET	614,17	1992-2003	0,80	2004-2013	0,83
8	4276842	PUTNAM CREEK	132,75	1992-2003	0,71	2004-2013	0,72
9	4280450	METTAWEE	431,20	1992-2003	0,79	2004-2013	0,61
10	4280000	POULTNEY	486,12	1992-2003	0,78	2004-2013	0,75
11	4282500	OTTER CREEK	1 631,11	1992-2003	0,78	2004-2013	0,73
12	4282525	NEW HAVEN	301,43	1992-2003	0,78	2004-2013	0,77
13	4282650	LITTLE OTTER CREEK	152,46	1992-2003	0,60	2004-2013	0,73
14	4282780	LEWIS CREEK	194,71	1992-2003	0,74	2004-2013	0,76
15	4282795	LAPLATTE RIVER	114,25	1992-2003	0,69	2004-2013	0,63
16	4290500	WINOOSKI	26 96,87	1992-2003	0,82	2004-2013	0,81
17	4292500	LAMOILLE	1 781,09	1992-2003	0,87	2004-2013	0,83
18	4294000	MISSISQUOI	22 03,59	1992-2003	0,79	2004-2013	0,74
19	0030425	DE LA ROCHE	81,60	2002-2007	0,67	2008-2013	0,52
20	0030423	MORPIONS	100,76	2000-2006	0,79	2007-2013	0,65
21	0030424	AUX BROCHETS	596,68	2002-2007	0,79	2008-2013	0,81
22	0030429	À L'OURS	24,47	2007-2010	0,55	2011-2013	0,39
23	0030415	DES HURONS	304,22	1992-2003	0,85	2004-2013	0,76
24	0030421	L'ACADIE	355,51	1992-2003	0,82	2004-2013	0,73
MOYENNE PONDÉRÉE					0,82	0,80	0,76
25	0030401	LCRR (FRYERS)	22 054,83	1992-2003	0,88	2004-2013	0,92

Ici, les aires de drainage prises en compte sont celles couvertes par la station hydrométrique située dans la partie amont du bassin. Comme nous l'avons vu, l'étalonnage a été effectué afin de corroborer au mieux les débits mesurés aux rapides Fryers, mais pour obtenir les résultats concernant cet emplacement (résultats qui sont discutés plus loin) les apports nets du bassin du lac Champlain (selon HYDROTEL) ont servi d'intrants à la nouvelle version d'ECCC du modèle de bilan hydrique à pas de temps journalier établie pour le lac Champlain. Les valeurs moyennes globales indiquées au tableau 5.1 sont des moyennes pondérées fondées sur les aires de drainage.

Pour la plupart des sites et des sous-bassins observés, les résultats sont jugés satisfaisants, mais ils ont tendance à être meilleurs dans les grands sous-bassins. De plus, les résultats sont cohérents dans le temps, car les résultats de validation restent comparables à ceux de l'étalonnage malgré une légère diminution (les valeurs EKG moyennes diminuant de 0,82 à 0,76, de la phase d'étalonnage à celle de la validation). Pour les sous-bassins des Rivières SARANAC, SALMON, LITTLE AUSABLE, METTAWEE, DE LA ROCHE et À L'OURS, le rendement diminue de façon plus marquée pendant la période de validation, tandis que pour d'autres sous-bassins, comme ceux des rivières BOUQUET et LITTLE OTTER CREEK, le rendement est augmenté. Par ailleurs, le rendement de la modélisation à la station FRYERS sur la rivière Richelieu, en aval du lac Champlain, est très bon tant pour ce qui de l'étalonnage (0,88) que de la validation (0,92), et il s'améliore même dans la dernière période.

Afin d'examiner plus à fond le rendement du modèle, les résultats de la simulation ont été comparés aux débits des cours d'eau observés suivant trois approches et moyennant les deux étalonnages de modèle disponibles, soit:

- 1 la somme des observations faites pour les sous-bassins 1 à 18, comme l'indique la figure 5.2, observations qui correspondent essentiellement à tous les principaux apports d'eau dans le lac Champlain (voir les premières rangées des figures 5.3 et 5.4);
- 2 une estimation des apports nets du bassin du lac Champlain (ANB) (comprenant les apports de toutes les rivières qui se déversent dans le lac compte tenu des précipitations sur le lac et de l'évaporation du lac) selon Environnement et Changement climatique Canada (ECCC; Boudreau et al., 2018) fondé sur un pas de temps d'un quart de mois (deuxième rangée des figures 5.3 et 5.4); et
- 3 une comparaison entre débits simulés et débits observés de la rivière Richelieu, en aval du lac Champlain, à la station hydrométrique des rapides Fryers (voir les dernières rangées des figures 5.3 et 5.4) d'après le plus récent modèle de bilan hydrique journalier du lac Champlain alimenté par les ANB d'HYDROTEL.

D'après la série chronologique de 1992 à 2013 sur les débits des rivières des 18 sous-bassins du lac Champlain (par ailleurs appelée « somme des 18 ») (graphique en haut à gauche de la figure 5.3), on observe une tendance constante, avec un maximum au printemps et un minimum en été. On constate aussi que les débits maximums se produisent à l'automne en raison des fortes précipitations ou en hiver quand cette saison est chaude.

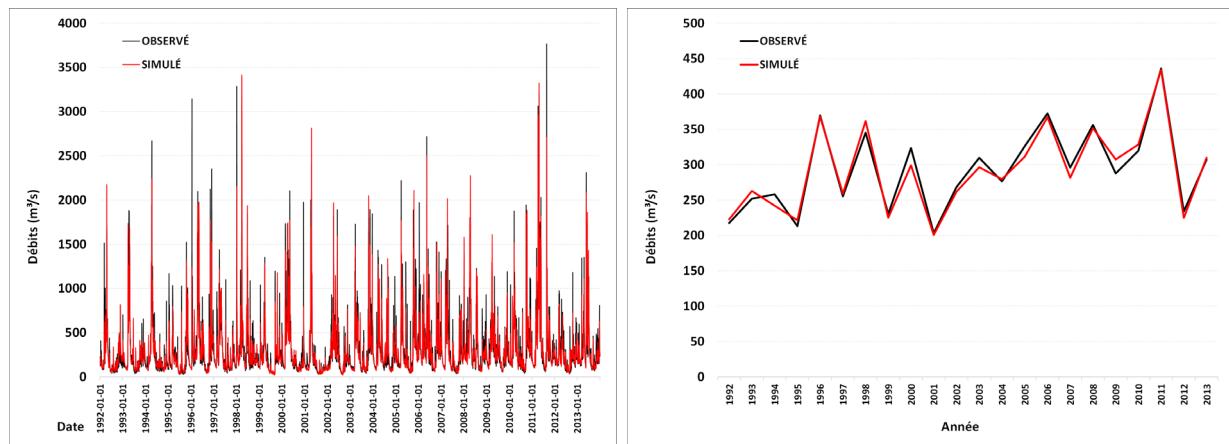
Un indice EKG de 0,93 entre la somme-des 18 simulée et observée reflète la robustesse de la simulation des débits des rivières des 18 sous-bassins considérés. Il s'avère par ailleurs qu'HYDROTEL simule bien les variations de la somme des 18 au cours d'une même année, avec une valeur EKG de 0,98 et un biais de +0,6 % (graphique en haut à droite de la figure 5.3). L'hydrogramme annuel moyen simulé de 1992 à 2013 pour la somme des 18 rejoint les observations, avec un indice EKG de 0,95 (graphique en haut à gauche de la figure 5.4).

La période de crue printanière, avec son pic de débit en avril, ressort clairement sous la forme d'un apport moyen de quatre à cinq fois supérieur à celui de l'été. Les apports importants et continus dans le lac pendant les mois de mars, d'avril et de mai 2011, qui ont mené à la crue, ressortent aussi clairement dans le graphique en haut à droite de la figure 5.4. De plus, le débit très fort, mais de courte durée du début septembre 2011, causé par l'ouragan Irene, a également été capté par HYDROTEL. Pour l'année 2011, un indice EKG de 0,96 avec un biais de +0,4 % est jugé excellent au titre de la comparaison de la somme des 18.

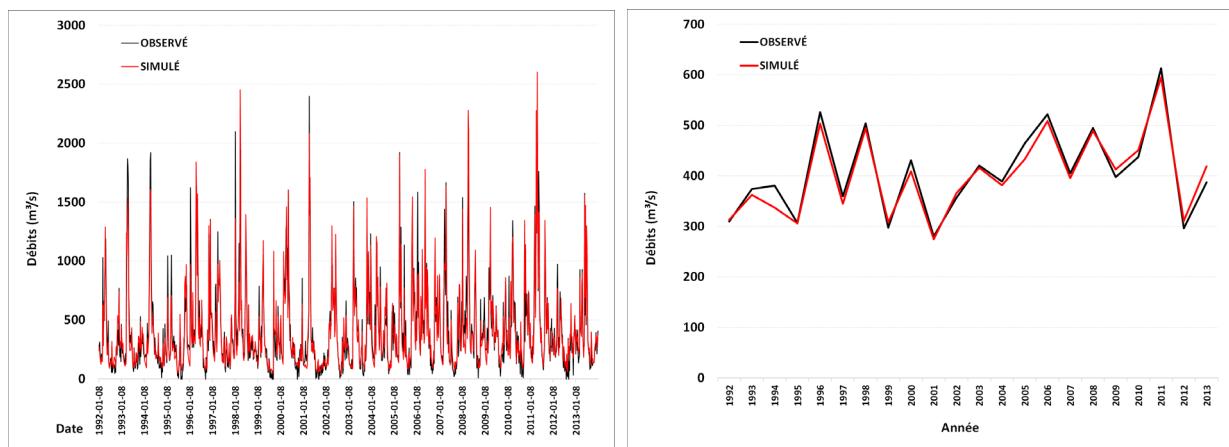
On constate en outre un recouplement satisfaisant entre les ANB simulés et estimés par ECCC de 1992 à 2013, selon un pas de temps d'un quart de mois, et l'indice EKG de 0,94. Encore une fois, les variations dans une même année (variations interannuelles) sont bien représentées, avec un indice EKG de 0,93 et un biais de +1,4 %. Pour ce qui est de l'hydrogramme annuel moyen de 1992-2013 de la figure 5.4 (graphique de gauche au milieu), les ANB simulés sont proches de ceux observés, avec un indice EKG de 0,92. Pour l'année 2011, l'indice EKG reste élevé, à 0,93.

L'hydrogramme annuel moyen simulé des ANB sous-estime légèrement la réalité pendant la période hivernale et la période des débits maximums d'avril et de mai, sauf pour la période de débit de pointe, tandis que le débit minimum moyen est légèrement surestimé en août et en septembre. À la figure 5.4, les pics simulés de 2011 des séries chronologiques sur les ANB sur 7 jours (quart de mois) sont parfois sous-estimés ou surestimés.

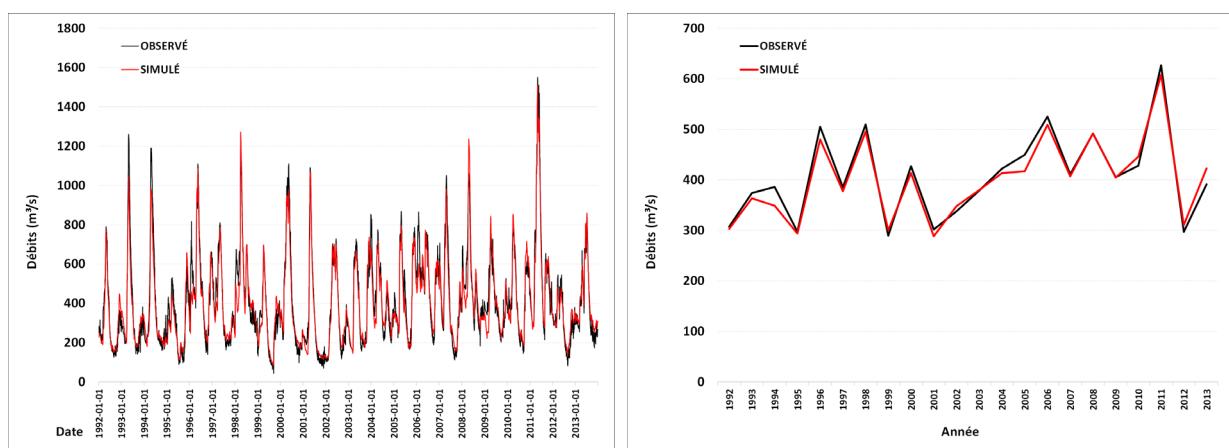
(a) Somme des débits des rivières des 18 sous-bassins du lac Champlain



(b) ANB du lac Champlain



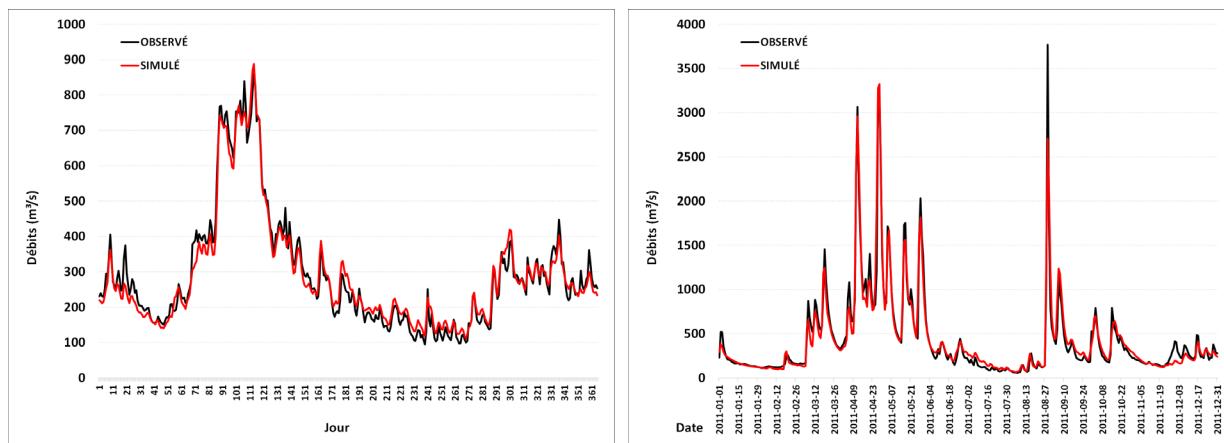
(c) Débits de la rivière Richelieu à la station des rapides Fryers



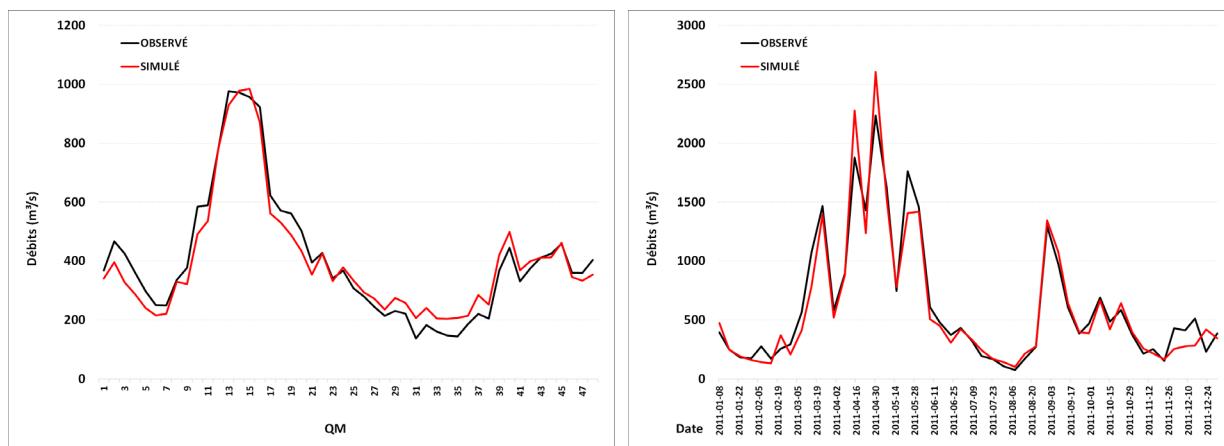
*Les observations sont affichées en noir et les simulations en rouge.

Figure 5-3. Séries chronologiques [quotidienne (à gauche) et annuelle (à droite) (1992-2013)] des débits observés et simulés et des apports nets du bassin (ANB).

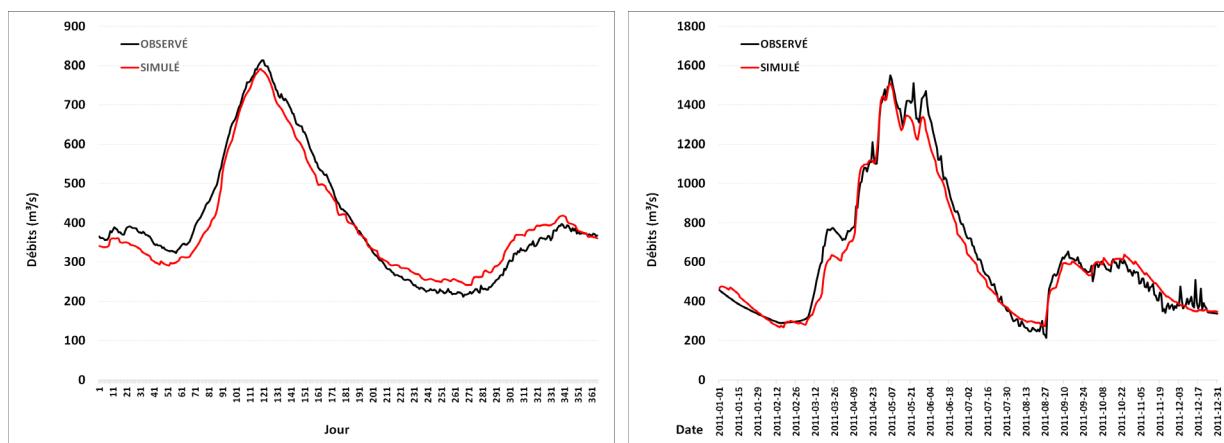
(a) Somme des débits des rivières des 18 sous-bassins du lac Champlain



(b) ANB du lac Champlain



(c) Débits de la rivière Richelieu à la station des rapides Fryers



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

Figure 5-4. Hydrogramme annuel moyen de 1992-2013 (à gauche) et hydrogramme de 2011 (à droite) des débits et des apports nets du bassin observés et simulés.

Enfin, on peut comparer entre eux les débits simulés et les débits relevés de la rivière Richelieu à la station des rapides Fryers, en aval du lac Champlain. L'indice EKG pour la série chronologique journalière de 1992-2013 (graphique en bas à gauche de la figure 5.3) est semblable à celui de la somme des 18 et des ANB, avec 0,90 et un biais de 1,3 %. Là encore, le MBH journalier du lac Champlain alimenté par les données d'HYDROTEL permet de simuler correctement les variations interannuelles de la moyenne annuelle, avec un indice EKG de 0,93 (graphique en bas à droite de la figure 5.4). L'hydrogramme annuel moyen établi pour la station des rapides Fryers (graphique en bas à gauche de la figure 5.4), représente bien la crue moyenne d'avril et mai, mais les débits minimums hivernaux sont sous-estimés et les débits minimums moyens de la fin de l'été (en août et en septembre) sont surestimés.

Compte tenu de ces différences, l'indice EKG de 0,88 pour l'hydrogramme annuel moyen et de 0,92 pour l'hydrogramme annuel de 2011 (graphique en bas à droite de la figure 5.4) est toujours acceptable et généralement considéré comme bon. Au vu de la crue de 2011, la combinaison HYDROTEL-MBH d'ECCC sous-estime légèrement (de $40 \text{ m}^3/\text{s}$) le débit de pointe observé à la station des rapides Fryers qui était de $1550 \text{ m}^3/\text{s}$ au début mai. La simulation des débits à la station des rapides Fryers demeure difficile en raison de l'effet de laminage et du stockage de l'eau en amont du lac Champlain.

Enfin, il est fort probable que d'autres incertitudes soient dues au forçage des données météorologiques maillées et au fait que les débits simulés des autres tributaires du lac Champlain ou de la rivière Richelieu n'aient pas été spécifiquement calibrés par manque de suivi dans le relevé des débits observés.



6 EFFETS DES MILIEUX HUMIDES EXISTANTS SUR LE RÉGIME D'ÉCOULEMENT DES COURS D'EAU

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. À ce titre, ils ont une incidence sur les régimes d'écoulement de surface et de subsurface, car ils modifient les processus hydrologiques, notamment par une augmentation de l'évapotranspiration, du stockage de l'eau et de l'alimentation des aquifères (Bullock et Acreman, 2003). 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.

Les milieux humides existants dans le bassin LCRR fournissent des services hydrologiques très intéressants pour les parties prenantes qui participent à la gestion des ressources hydriques et aux programmes de protection/conservation des milieux humides. Au cours des cinq dernières années, les modules relatifs aux milieux humides d'HYDROTEL ont souvent servi à évaluer de tels services hydrologiques (p. ex., Fossey et al., 2015, 2016a,b,c, Blanchette et al., 2019, Wu et al., 2020a,b). De plus amples renseignements sur les modules d'HYDROTEL relatifs aux milieux humides sont donnés à l'annexe II.

Pour les bassins hydrographiques où les crues sont récurrentes, la capacité naturelle de stockage des milieux humides constitue un atout de taille. Afin d'évaluer les services hydrologiques fournis par la répartition actuelle des milieux humides dans le bassin LCRR, l'équipe de l'étude a utilisé une méthode de comparaison simple fondée sur deux simulations hydrologiques distinctes, l'une avec les modules relatifs aux milieux humides isolés et aux milieux riverains activés et l'autre avec ces

modules désactivés. Dans les situations où les modules relatifs aux milieux humides sont désactivés, les milieux humides se comportent davantage comme des sols saturés et n'offrent aucune capacité tampon et une capacité réduite de rétention. Les deux simulations à long terme ont été effectuées à l'aide de séries de données météorologiques journalières couvrant la période de 1950 à 2013. La comparaison des simulations avec et sans milieu humide a permis d'isoler la régularisation du débit assurée par les milieux humides, notamment l'atténuation des débits maximums et l'amplification des débits minimums.

Voici la formule appliquée pour l'évaluation des services hydrologiques:

- Pour les débits maximums:
$$\frac{\text{Sans les milieux humides existants} - \text{Milieux humides existants}}{\text{Sans milieux humides}}$$
 où un résultat positif correspond à une atténuation.
- Pour les débits minimums:
$$\frac{\text{Avec les milieux humides existants} - \text{Sans milieux humides}}{\text{Sans milieux humides}}$$
 où un résultat positif correspond à une amplification.

Afin de quantifier les services d'atténuation des débits maximums, les variations relatives du débit maximum annuel, printanier et automnal ont été calculées à partir d'une simulation hydrologique continue, avec et sans milieu humide à long terme pour les années 1950 à 2013. D'un autre côté, les services d'amplification des débits minimums ont été évalués en calculant la variation relative du débit minimum annuel, printanier et automnal sur au moins sept jours. De plus, la comparaison des débits entre eux a été effectuée à partir d'épisodes de débits similaires afin d'éviter les erreurs de comparaison.

La figure 6.1 présente les 20 principaux sous-bassins, jaugés et non-jaugés, faisant partie du bassin hydrologique du LC; le tableau 6.1 donne la superficie des milieux humides et de l'aire de drainage connexe pour chacun de ces sous-bassins.

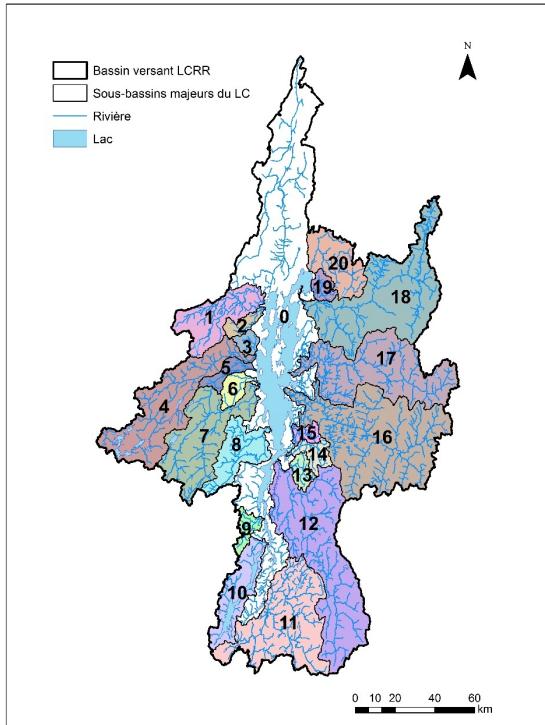
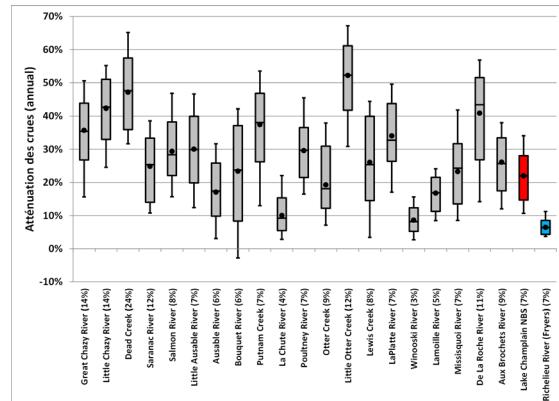


Figure 6.1. Principaux sous-bassins du LC >100 km².

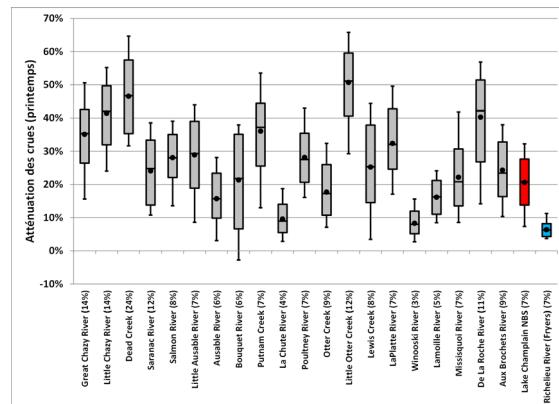
6.1 EFFETS DES MILIEUX HUMIDES SUR LES DÉBITS MAXIMUMS

La figure 6.2 illustre les effets de la répartition actuelle des milieux humides sur les débits maximums, sur une base annuelle (figure 6.2a), ainsi que pour le printemps (figure 6.2b) et pour l'été/automne (figure 6.2c). Comme cette étude met l'accent sur les débits maximums et les risques de crue, l'incidence de la répartition actuelle des milieux humides sur les débits minimums n'est pas abordée ici; toutefois, ces résultats sont présentés à l'annexe III (figure A3.1). Le tableau 6.2 résume l'impact annuel des milieux humides actuels sur (i) les débits maximums des 20 principaux sous-bassins du LC, (ii) les ANB du LC, (iii) le débit de la RR aux rapides Fryers, et (iv) les niveaux d'eau du LC et de la RR (à la marina de Saint-Jean-sur-Richelieu) à partir des

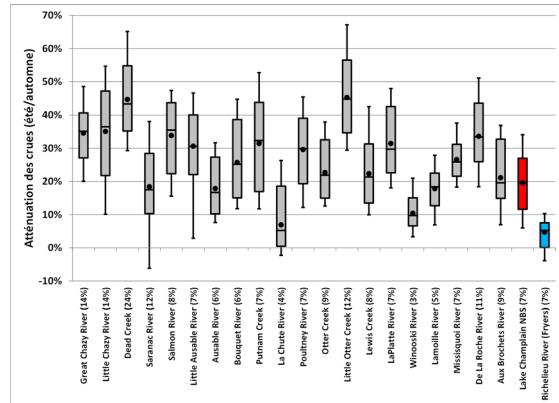
ANB d'HYDROTEL ayant servis à établir le MBH journalier pour le lac Champlain. De plus, le tableau 6.2 fait état des répercussions sur les débits maximums pour certaines années.



(a) (■ Min; ▲ Max; □ 10^e percentile; ▨ 90^e percentile; ■ Médiane; ▨ Moyenne)



(b) (■ Min; ▲ Max; □ 10^e percentile; ▨ 90^e percentile; ■ Médiane; ▨ Moyenne)



(c) (■ Min; ▲ Max; □ 10^e percentile; ▨ 90^e percentile; ■ Médiane; ▨ Moyenne)

Figure 6.2. Effets des milieux humides actuels sur l'atténuation : des débits maximums dans les 20 sous-bassins du LC; des ANB du LC et du débit de la RR aux rapides Fryers, pour différents pas de temps : a) annuels, b) printaniers et c) estivaux/automnaux.

Tableau 6-1. Description des zones occupées par des milieux humides et par leurs aires de drainage pour les 20 sous-bassins du LC et du LCRR (aux rapides Fryers).

#	BASSIN	DRAINAGE (km ²)	MILIEUX HUMIDES		AIRE DE DRAINAGE	
			(km ²)	(%)	(km ²)	(%)
1	Great Chazy	778	107	13,8 %	371	47,6 %
2	Little Chazy	143	20	14,2 %	73	50,9 %
3	Dead Creek	114	27	24,0 %	63	55,3 %
4	Saranac	1579	184	11,6 %	761	48,2 %
5	Salmon	177	15	8,3 %	90	51,0 %
6	Little Ausable	188	13	6,7 %	94	50,2 %
7	Ausable	1 329	76	5,7 %	500	37,6 %
8	Bouquet	621	38	6,1 %	255	41,1 %
9	Putnam Creek	158	12	7,5 %	81	51,4 %
10	La Chute	678	25	3,7 %	174	25,7 %
11	Poultney	1 778	120	6,8 %	775	43,6 %
12	Otter Creek	2 446	224	9,1 %	962	39,3 %
13	Little Otter Creek	153	18	11,8 %	79	51,9 %
14	Lewis Creek	203	16	7,8 %	80	39,6 %
15	LaPlatte	118	8	6,7 %	43	36,5 %
16	Winooski	2 756	79	2,9 %	658	23,9 %
17	Lamoille	1 866	94	5,0 %	707	37,9 %
18	Missisquoi	2 212	155	7,0 %	886	40,1 %
19	De La Roche	144	15	10,7 %	62	43,0 %
20	Aux Brochets	664	57	8,5 %	218	32,8 %
LC		21 254	1 551	7,3%	7 749	36,5%
LCRR (Fryers)		22 055	1 616	7,3%	7 902	35,8%

Tableau 6-2. Effets des milieux humides actuels sur l'atténuation des débits maximums dans les 20 sous-bassins du LC, ainsi que des ANB du LC et du débit de la RR aux rapides Fryers, et des niveaux d'eau du LC et de la RR (à la marina de Saint-Jean-sur-Richelieu).

#	BASSIN (WT %)	MIN		MAX		ANNÉE DE CRUE					MOYENNE	MÉD.
		AN	ATTÉNUATION	YEAR	ATTENUATION	1973	1983	1984	2011	2013		
1	Great Chazy (14%)	1994	16%	2002	51%	31%	29%	24%	40%	50%	36%	35%
2	Little Chazy (14%)	2008	25%	1974	55%	41%	44%	35%	41%	55%	42%	43%
3	Dead Creek (24%)	1994	32%	1996	65%	47%	56%	43%	57%	62%	47%	48%
4	Saranac (12%)	1980	11%	1990	39%	13%	23%	25%	35%	32%	25%	25%
5	Salmon (8%)	1952	16%	1996	47%	29%	30%	23%	34%	36%	29%	28%
6	Little Ausable (7%)	1980	12%	1977	47%	30%	24%	31%	43%	36%	30%	30%
7	Ausable (6%)	1958	3%	1996	32%	20%	5%	12%	7%	19%	17%	17%
8	Bouquet (6%)	2001	-3%	1996	42%	28%	22%	21%	23%	28%	23%	24%
9	Putnam Creek (7%)	1952	13%	1974	54%	36%	26%	27%	38%	32%	37%	38%
10	La Chute (4%)	2012	3%	1995	22%	8%	6%	12%	9%	16%	10%	9%
11	Poultney (7%)	1997	16%	1996	45%	27%	30%	33%	32%	34%	30%	30%
12	Otter Creek (9%)	1958	7%	1964	38%	17%	10%	22%	28%	17%	19%	18%
13	Little Otter Creek (12%)	1953	31%	2011	67%	46%	41%	60%	67%	51%	52%	52%
14	Lewis Creek (8%)	1958	3%	1970	44%	27%	28%	32%	42%	31%	26%	25%
15	LaPlatte (7%)	2001	17%	1996	50%	33%	33%	26%	40%	25%	34%	33%
16	Winooski (3%)	1961	3%	1984	16%	12%	9%	16%	14%	9%	9%	8%
17	Lamoille (5%)	1971	8%	1962	24%	21%	16%	17%	17%	20%	17%	17%
18	Missisquoi (7%)	1954	9%	2002	42%	30%	25%	20%	16%	33%	23%	24%
19	De La Roche (11%)	1976	14%	1996	57%	29%	44%	54%	43%	44%	41%	43%
20	Aux Brochets (9%)	1953	12%	2006	38%	21%	29%	33%	33%	29%	26%	26%
ANB LC (7 %)		1991	11%	1996	34%	17%	22%	23%	14%	26%	22%	22%
RR (à Fryers) (7 %)		1974	4%	1998	11%	5%	5%	6%	6%	4%	6%	6%
Niveau du LC (cm)		1985	6	1998	26	14	9	12	15	10	12	11
Niveau de la RR (cm)		1966	4	1998	21	8	8	8	12	6	9	8

En général, dans les petits sous-bassins dont une importante partie est drainée par des milieux humides (indiqué en pourcentage de milieux humides (MH) dans le tableau 6.2), on constate une forte incidence sur les débits maximums, comparativement aux grands sous-bassins dont un plus faible pourcentage est constitué de milieux humides et d'aires de drainage. De plus, la répartition des milieux humides dans un bassin hydrographique peut avoir un impact majeur sur l'atténuation des débits maximums. La figure 6.2 illustre clairement la gamme des impacts constatés sur les débits maximums, impacts qui varient d'une année à l'autre, comme l'illustre la plage des valeurs d'atténuation pour chaque sous-bassin.

De plus, les impacts annuels et les impacts printaniers sont similaires, puisque les débits maximums se produisent la plupart du temps lors des crues printanières. La figure 6.2 montre que, dans le cas d'un sous-bassin en particulier (celui de la rivière Bouquet), les résultats annuels ou printaniers font état d'effets négatifs (soit une augmentation des débits maximums) et que, pour deux sous-bassins (ceux des rivières Saranac et La Chute), les résultats automnaux présentent aussi des effets négatifs. Les résultats démontrent une cohérence annuelle claire sur le plan des impacts des milieux humides sur les débits maximums. De plus, des impacts négatifs peuvent parfois, bien que rarement, se produire dans des conditions particulières (à savoir les niveaux d'eau initiaux dans les milieux humides et le contenu en eau des sols antérieurement présent) dans des milieux humides avant que les débits maximums ne soient atteints. Le tableau 6.2 montre la variation des atténuations maximales et minimales des milieux humides actuels pour certaines années à débits maximums d'importance (1973, 1983, 1984, 2011, 2013).

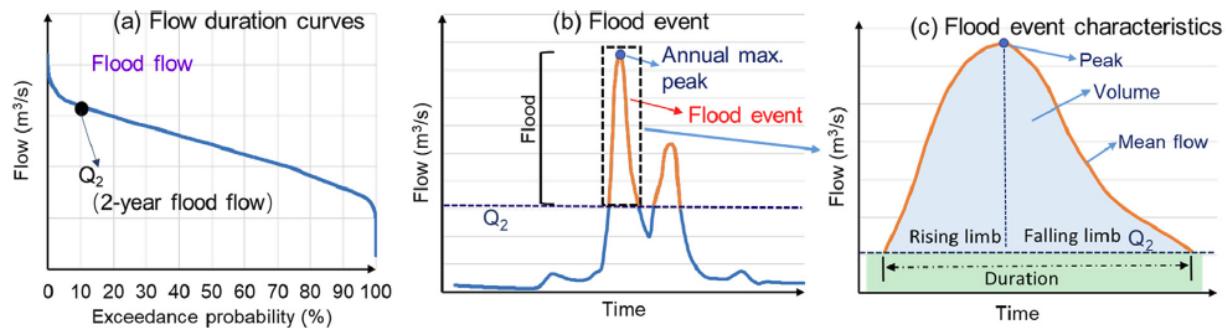
Dans l'ensemble, la répartition actuelle des milieux humides réduit de 22 % les ANB maximums dans le lac Champlain. En aval du LC (qui a un effet d'amortissement), les milieux humides conservent une partie de leur effet et peuvent donc encore réduire de 6 % le débit de la rivière Richelieu aux rapides Fryers. Ces résultats illustrent clairement la forte régularisation du

débit attribuable à la répartition actuelle des milieux humides dans le bassin LCRR.

6.2 EFFETS DES MILIEUX HUMIDES EXISTANTS SUR L'HYDROGRAMME DE DÉBIT MAXIMUM

L'étude a également analysé en quoi les milieux humides peuvent affecter les crues en fonction de quatre indicateurs, à savoir le débit de pointe, le débit moyen des crues, la durée et l'ampleur (volume) de l'écoulement lors d'épisodes de débit maximum. Une évaluation quantitative des effets sur la branche montante et sur la branche descendante de l'hydrogramme de l'événement a été élaborée pour déterminer si les services ont été modifiés ou non. Un seuil de débit maximum correspondant au débit de crue d'une période de retour de deux ans (figure 6.3(a)) a été choisi pour évaluer tous les indices, parce que ce seuil est souvent substitué au débit de pleins bords et au seuil dans d'autres études (Cheng et al., 2013; Xu et al., 2017). Une analyse standard de la fréquence des débits maximums annuels a été effectuée pour chaque affluent afin d'évaluer le débit de crue biennal (période de retour de deux ans) (Q2), à l'aide d'une distribution log-normale.

Pour une année donnée, tous les débits quotidiens supérieurs au Q2 ont été analysés pour voir si la présence de milieux humides avait un effet d'atténuation ou d'amplification. La figure 6.3(a) illustre une probabilité théorique de dépassement d'un Q2 par rapport à la courbe des débits classés de tous les débits journaliers d'une année donnée (et non par rapports à la courbe des débits classés des débits maximums annuels sur plusieurs années). Ainsi, si le débit journalier était supérieur ou égal au débit biennal (1950-2013), il était considéré comme correspondant à un épisode de crue défini dans le temps, débutant au moment où le débit dépasse le seuil et se terminant au moment où le débit passe sous le seuil (figure 6.3(b)). La durée des crues a été définie comme étant le nombre de jours consécutifs de l'épisode. Le débit de pointe a été défini comme étant le débit maximum pendant l'épisode. Le débit moyen a été défini



(Figure reprise sans la permission de l'éditeur de Wu et al., 2020, anglais seulement)

Figure 6-3. Cadre méthodologique utilisé afin : (a) de définir les débits supérieurs à un seuil donné, dans une année donnée (p. ex., Q_2); (b) d'extraire et (c) de caractériser les épisodes de crue.

comme étant le débit journalier moyen pendant l'épisode. La branche montante et la branche descendante de l'hydrogramme faisaient respectivement référence à l'augmentation et à la baisse du débit pendant l'épisode de crue. Pour préciser le risque d'inondation, on a extrait des épisodes de crue qui ont duré au moins cinq jours (figure 6.3(b)). Par ailleurs, le débit moyen, la durée et le volume du débit ont été déterminés sur les branches montante et descendante de l'hydrogramme (figure 6.3c)).

Enfin, les différences entre les valeurs des indicateurs sélectionnés, entre les simulations avec et sans milieux humides, ont été calculées (Wu et al., 2020). Les résultats associés au débit ou au volume sont exprimés sous la forme d'un ruissellement (rapport volume d'eau/aire du sous-bassin hydrographique). L'analyse a été conclue par un calcul de la fréquence des services bénéfiques (soit de la fréquence à laquelle, lors de la série de crues, les milieux humides ont fourni des services positifs comme l'atténuation du débit maximum).

Le tableau 6.3 résume l'effet des milieux humides sur les épisodes de débits maximum en indiquant l'atténuation du débit de pointe, la persistance du débit, le débit moyen et le volume des eaux de ruissellement. Les valeurs

négatives dans le tableau indiquent une atténuation. Le tableau 6.4 présente la fréquence relative de l'atténuation (c'est-à-dire la fréquence à laquelle les indicateurs sélectionnés correspondent aux valeurs négatives).

Le tableau 6.3 montre clairement que les valeurs médianes pour le débit de pointe, le débit moyen et le volume sont principalement réduites sous l'effet des milieux humides existants dans tous les sous-bassins, sauf en ce qui concerne le volume sur la branche montante de l'hydrogramme pour la rivière Lewis Creek et sur la branche descendante pour les rivières Ausable et Bouquet. L'ampleur des réductions est liée à l'importance des milieux humides et des aires de drainage. L'atténuation du débit et du volume est moins importante à une plus grande échelle dans le cas des ANB du lac Champlain et dans celui de la rivière Richelieu. L'atténuation est moins importante sur la durée de l'épisode de débit maximum, quand la durée médiane pour le bassin (exprimée en nombre de jours) est indicative d'une atténuation (valeur négative), de l'absence d'effet ou même d'une amplification (valeur positive).

Le tableau 6.4 montre des tendances similaires avec une fréquence importante d'atténuation du débit et du volume. La fréquence de l'atténuation sur la durée de l'épisode de débit maximum est moins importante, mais le pourcentage de fréquence faible n'implique pas un pourcentage d'amplification élevé, car l'absence d'impact (variation égale à 0 jour) ne mène ni à une atténuation ni à une amplification.

Pour les conditions climatiques de 1950 à 2013, ces résultats illustrent clairement la nécessité de protéger les milieux humides. De plus, ils mettent clairement en évidence les services de régularisation du débit fournis par la répartition actuelle des milieux humides dans le bassin LCRR.

6.3 EFFETS DES MILIEUX HUMIDES EXISTANTS SUR LA CRUE DE 2011

Outre qu'elle a permis d'évaluer l'atténuation globale des crues assurée par les milieux humides, l'étude a évalué les impacts qui auraient pu se produire lors de la crue de 2011 en l'absence des milieux humides existants. La figure 6.4 présente les hydrogrammes simulés de 2011 selon la condition de référence (avec milieux humides existants) et sans la présence de milieux humides. Les résultats sont présentés selon un pas de temps journalier basé sur des ANB simulés par HYDROTEL et sur la la combinaison MBH-HYDROTEL. Les résultats comprennent les effets sur les débits et les niveaux d'eau.

Comme l'indique le tableau 6.5, si les milieux humides existants n'avaient pas été présents en 2011, les conditions de crue auraient été pires. Ce constat justifie les efforts déployés pour conserver et protéger les milieux humides existants.



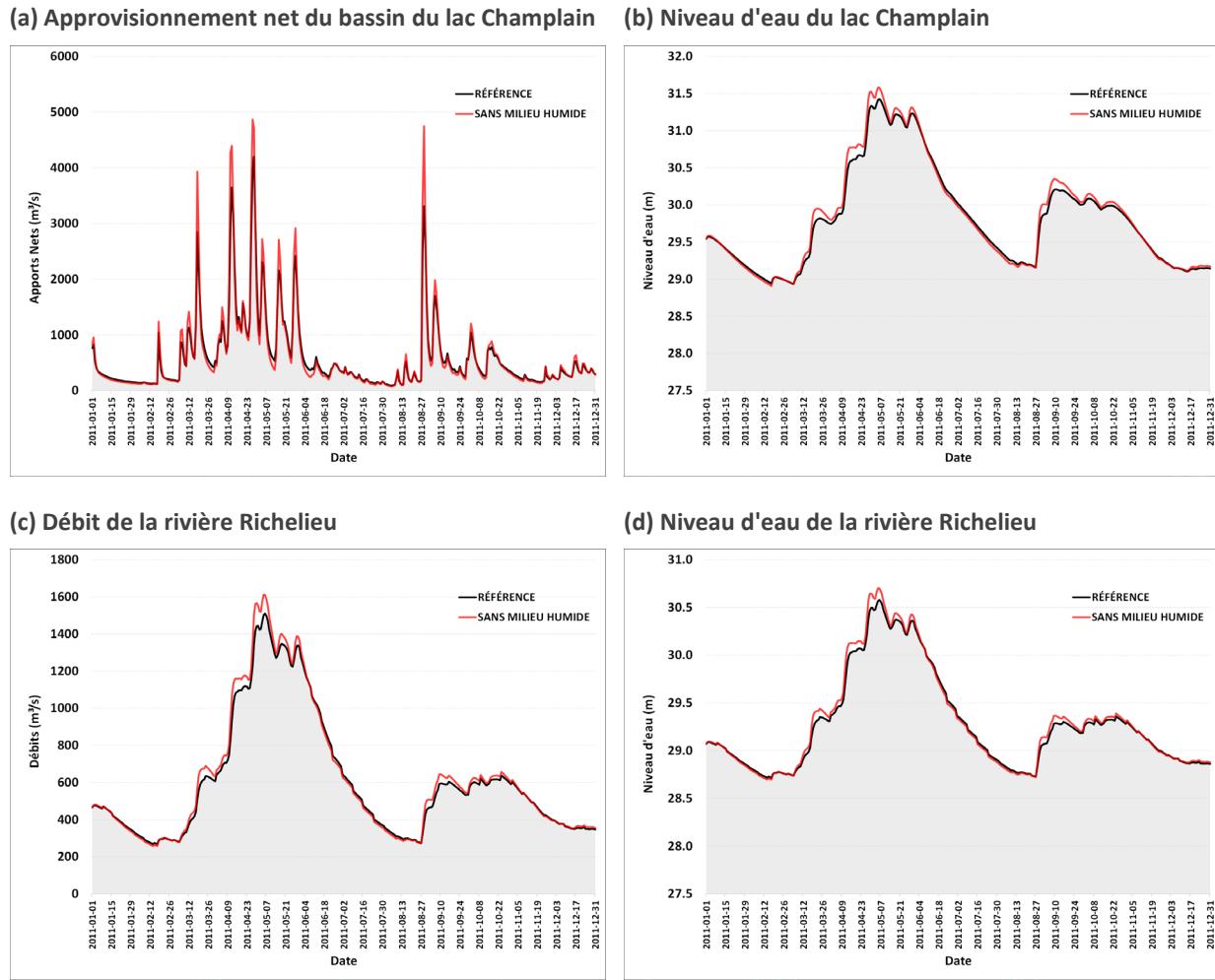
Tableau 6-3. Valeurs médianes de l'effet des milieux humides sur le débit de pointe, la persistance du débit, le débit moyen et le volume de l'écoulement (c.-à-d. le volume des eaux de ruissellement).

#	BASSIN	Débit de pointe (mm)	Durée (d)	Durée D1 (j)	Durée D2 (j)	Débit moyen (mm)	Débit moyen D1 (mm)	Débit moyen D2 (mm)	Volume (mm)	Volume D1 (mm)	Volume D2 (mm)
1	Great Chazy	-6,5	-1	-1	0	-3,0	-3,5	-2,3	-30,6	-29,5	-6,3
2	Little Chazy	-10,7	-2	-1	-1	-6,3	-6,5	-7,4	-56,3	-39,5	-13,8
3	Dead Creek	-10,6	1	1	0	-5,2	-8,0	-3,1	-21,3	-11,8	-10,3
4	Saranac	-3,1	-1	0	-1	-1,7	-2,4	-1,3	-19,3	-7,4	-11,9
5	Salmon	-5,5	0	0	0	-2,3	-2,6	-2,8	-18,8	-18,9	-1,4
6	Little Ausable	-5,2	1	0	0	-3,8	-4,8	-2,2	-9,0	-8,9	-3,3
7	Ausable	-3,9	0	0	1	-2,6	-2,8	-2,0	-11,9	-16,4	6,4
8	Bouquet	-4,4	1	0	1	-2,7	-2,7	-0,8	-6,9	-7,7	17,3
9	Putnam Creek	-7,8	0	0	0	-5,9	-7,6	-3,2	-25,9	-22,3	-15,9
10	La Chute	-0,4	-2	0	-1	-0,1	-0,2	-0,1	-8,7	-3,0	-6,9
11	Poultney	-7,2	0	0	0	-3,0	-3,3	-1,6	-17,2	-11,5	-3,2
12	Otter Creek	-1,8	-1	0	-1	-0,7	-0,8	-0,7	-16,9	-4,9	-8,7
13	Little Otter Creek	-17,3	1	0	1	-10,2	-14,4	-7,3	-20,1	-24,1	-5,6
14	Lewis Creek	-6,1	1	1	1	-3,7	-3,1	-4,4	-2,1	3,8	-5,9
15	LaPlatte	-5,0	-4	-3	-1	-0,4	-0,5	-4,7	-52,6	-47,9	-4,7
16	Winooski	-1,1	0	0	0	-0,7	-1,2	-0,4	-3,9	-2,5	-1,4
17	Lamoille	-2,7	-1	-1	0	-0,9	-1,3	-0,3	-17,2	-19,0	-0,5
18	Missisquoi	-3,2	-1	-1	0	-3,6	-4,7	-0,2	-26,0	-23,9	-0,2
19	De La Roche	-9,3	0	-1	1	-5,9	-6,7	-5,4	-39,6	-38,8	-9,3
20	Aux Brochets	-4,6	0	0	0	-4,0	-3,7	-5,4	-24,8	-15,9	-8,9
ANB du LC		-2,9	-1	0	0	-1,0	-1,2	-0,8	-18,3	-13,5	-0,4
RR (à Fryers)		-0,3	-2	-1	-3	-0,2	-0,2	-0,2	-13,9	-5,3	-10,3

Notes : D1 et D2 font respectivement référence à la branche montante et à la branche descendante d'un hydrogramme d'épisode de crue. Les valeurs négatives indiquent une atténuation

Tableau 6-4. Taux de fréquence relative de l'effet d'atténuation (valeur négative dans le tableau 6.3) des milieux humides sur le débit de pointe, la persistance du débit, le débit moyen et le volume du débit.

#	BASSIN	Débit de pointe (mm)	Durée (d)	Durée D1 (j)	Durée D2 (j)	Débit moyen (mm)	Débit moyen D1 (mm)	Débit moyen D2 (mm)	Volume (mm)	Volume D1 (mm)	Volume D2 (mm)
1	Great Chazy	100%	58%	58%	42%	100%	100%	92%	100%	83%	83%
2	Little Chazy	100%	64%	77%	55%	100%	100%	95%	100%	95%	77%
3	Dead Creek	100%	23%	23%	41%	100%	100%	95%	95%	68%	73%
4	Saranac	100%	58%	35%	65%	100%	100%	100%	96%	81%	96%
5	Salmon	100%	45%	45%	18%	100%	100%	82%	91%	73%	55%
6	Little Ausable	100%	0%	13%	0%	100%	100%	100%	100%	88%	63%
7	Ausable	100%	17%	33%	17%	100%	100%	67%	83%	83%	17%
8	Bouquet	100%	20%	20%	20%	100%	100%	100%	60%	100%	40%
9	Putnam Creek	100%	20%	20%	40%	100%	100%	100%	100%	80%	60%
10	La Chute	100%	75%	46%	71%	96%	79%	83%	100%	71%	92%
11	Poultney	100%	17%	33%	17%	100%	100%	67%	83%	83%	50%
12	Otter Creek	100%	79%	43%	57%	100%	86%	86%	100%	71%	100%
13	Little Otter Creek	100%	36%	36%	36%	100%	100%	100%	100%	100%	64%
14	Lewis Creek	100%	0%	0%	0%	100%	50%	100%	50%	0%	50%
15	LaPlatte	100%	100%	100%	50%	100%	100%	50%	100%	100%	50%
16	Winooski	100%	0%	0%	33%	100%	100%	67%	100%	67%	67%
17	Lamoille	100%	60%	80%	0%	100%	100%	80%	100%	100%	60%
18	Missisquoi	100%	60%	60%	0%	100%	80%	80%	100%	100%	60%
19	De La Roche	100%	40%	50%	30%	100%	90%	100%	90%	90%	60%
20	Aux Brochets	100%	33%	33%	33%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
ANB du LC		100%	80%	40%	40%	100%	100%	100%	100%	80%	80%
RR (Fryers)		100%	88%	59%	78%	100%	98%	98%	100%	73%	100%



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

Figure 6-4. Incidence de l'absence de milieux humides sur les débits et les niveaux d'eau dans le bassin LCRR compte tenu des conditions de 2011 en utilisant HYDROTEL et MBH selon un pas de temps journalier.

Tableau 6-5. Résumé des effets dus à l'absence de milieux humides sur : le débit des ANB, le niveau du LC, le débit de la RR aux rapides Fryers et le niveau de la RR (à la marina de Saint-Jean-sur-Richelieu), en regard des conditions qui régnait en 2011.

Milieux humides	Bassin du lac Champlain	Rivière Richelieu (Fryers)
Superficie (km ²)	21 254	22 055
Superficie des milieux humides (km ²)	1 551	1 616
Aire de drainage des milieux humides (km ²)	7 749	7 902
HYDROTEL + MBH		
(pas de temps journalier)		
Augmentation du pic maximum (%)	15,8 % (ANB)	6,7 % (DÉBIT)
Augmentation du niveau maximum	15 cm (0,49 %)	12 cm (0,40 %)

7 LES ENSEIGNEMENTS DE LA CRUE DE 2011

La crue de 2011 peut être utilisée pour déterminer les scénarios de stockage dans des milieux humides ou d'inondation de terres agricoles qui pourraient réduire les crues. Il est possible de partir des mesures du débit de la rivière Richelieu (à la station hydrométrique du gouvernement du Canada numéro 02OJ007 des Rapides Fryers) pour estimer la quantité d'eau à stocker afin de réduire le débit de pointe de 2011 d'un certain pourcentage et d'estimer la superficie nécessaire de milieux humides supplémentaires ou de terres agricoles à inonder pour stocker l'eau.

La crue de 2011 peut être représentée par une équation polynomiale où l'intégrale des débits mesurés ou des débits de crue synthétique présentent des volumes d'eau identiques sur un intervalle de temps donné. Cette représentation simplifiée des débits de 2011 à la station des rapides Fryers, du 1er avril au 3 juillet, est présentée à la figure 7.1. La courbe de crue synthétique sert ensuite à évaluer les réductions de débit potentielles. La figure 7.1 présente l'hydrogramme synthétique et des réductions du débit de pointe de 5 %, 10 % ou 20 %. Le tableau 7.1 donne des estimations de la superficie supplémentaire de milieux humides dont il faudrait disposer pour réduire de 5 %, de 10 % et de 20 % les débit de pointe de la crue de 2011 mesuré à deux hauteur d'eau de stockage (50 cm et 10 cm).

Comme le montre le tableau 7.1, afin de réduire de 5 % le débit de pointe de 2011 aux rapides Fryers, il faudrait 632 km² de milieux humides supplémentaire présentant une capacité de rétention de 50 cm d'eau; cela correspond à une augmentation de 39 % de la superficie en milieux humides dans le bassin versant, en amont des rapides Fryers, ou de 41 % dans le bassin versant du LC. Compte tenu de la même capacité de rétention d'eau, une diminution de 20 % du débit de pointe nécessiterait d'inonder 68 % des terres agricoles existantes en amont de la station des rapides Fryers ou 79 % de la superficie

des terres agricoles existantes du bassin versant du LC.

Le tableau 7.1 montre que la réduction du débit de pointe de la crue de 2011 dans la RR nécessiterait l'ajout de vastes zones humides ou l'inondation d'importantes superficies de terres agricoles. De plus, la hauteur d'eau à stocker serait déterminante et, comme l'illustrent les estimations en la matière, les superficies de milieux humides ou de terres agricoles additionnelles dont il faudrait disposer deviennent rapidement irréalistes si l'on ne peut miser que sur une capacité de rétention d'eau de 10 cm. Du point de vue de la gestion des crues, cet exercice simple permet de se faire une idée de grandeur de l'aire de stockage nécessaire. On ne peut en aucun cas le considérer comme un exercice de modélisation hydrologique.

Les sections suivantes portent sur l'évaluation de deux scénarios principaux fondé sur HYDROTEL, soit le stockage des eaux sur des terres agricoles riveraines et l'aménagement/la restauration des milieux humides.

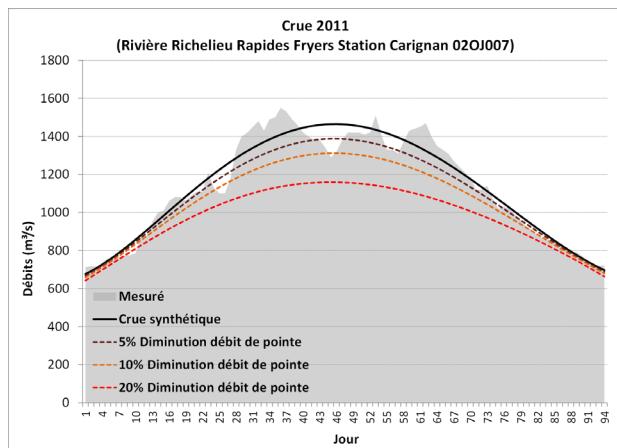


Figure 7-1. Représentation simplifiée de la crue de 2011 par une crue à comportement synthétique et par la forme de crue qui en découle pour des réductions du débit de pointe de 2011 de 5 %, de 10 % et de 20 % à la station des rapides Fryers, entre le 1er avril et le 3 juillet.

Tableau 7-1. 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 RR en 2011, aux rapides Fryers, suivant deux scénarios de stockage dans des aires additionnelles : 50 cm et 10 cm d'eau.

Hauteur d'eau : 50 cm					
Scénario de réduction du pic	Milieux humides supplémentaires (km ²)	Pourcentage d'augmentation par rapport à la superficie existante		Pourcentage de terres agricoles existantes inondées	
		Fryers en amont	Bassin versant du LC	Fryers en amont	Bassin versant du LC
5%	632	39%	41%	17%	20%
10%	1 263	78%	81%	34%	39%
20%	2 527	156%	163%	68%	79%

Hauteur d'eau : 10 cm					
% de réduction du pic de crue	Milieux humides supplémentaires (km ²)	Pourcentage d'augmentation par rapport à la superficie existante		Pourcentage de terres agricoles existantes inondées	
		En amont de Fryers	Bassin du LC	En amont de Fryers	Bassin du LC
5%	3 344	207%	216%	90%	104%
10%	6 688	414%	431%	181%	209%
20%	13 376	828%	862%	361%	418%



8 ÉVALUATION DU SCÉNARIO DE STOCKAGE D'EAU SUR DES TERRES AGRICOLES RIVERAINES

Nous avons commencé par évaluer le recours à des terres agricoles riveraines comme moyen de stocker davantage d'eau. Ce scénario a été produit afin d'évaluer les avantages supplémentaires procurés par l'inondation de terres agricoles. Il a consisté à évaluer les avantages potentiels procurés par des terres agricoles considérées en tant que « milieux humides », sans que celles-ci soient explicitement converties en milieux humides comme tels. Il a plutôt été question d'imiter l'impact potentiel du stockage de l'eau sur des terres agricoles voisines du réseau hydrographique, à une certaine distance de chaque berge. L'aire de stockage supplémentaire a été modélisée à l'aide des modules relatifs aux milieux humides isolés et riverains d'HYDROTEL, par affectation de valeurs paramétrées à des terres agricoles équivalents à ceux des milieux humides existants et dominants dans chaque unité de calcul (RHHU) ou de valeurs paramétrées moyennes (voir l'annexe II) pour les RHHU sans milieux humides existants.

Ce scénario exploratoire a été élaboré dans la perspective de stocker de l'eau sur des terres agricoles situées dans une zone tampon de 1 km le long de chaque rive du réseau hydrographique. Il en est ressorti une aire de stockage supplémentaire de 2 471 km² dans le bassin de la rivière Richelieu, en amont des rapides Fryers (de 1 616 km² à 4 087 km²), dont 2 256 km² dans les limites du bassin versant du lac Champlain (de 1 551 km² à 3 807 km²). La zone tampon de 1 km le long du réseau hydrographique est, certes, vaste, mais ce choix visait à évaluer l'effet du stockage de l'eau sur une importante superficie de terres agricoles, étant entendu que, selon toute vraisemblance, la zone tampon réelle serait plus petite. Il aurait été possible d'effectuer d'autres analyses en fonction d'un très grand nombre de scénarios conçus spécialement pour chaque sous-bassin, mais cela aurait dépassé la portée et le calendrier du projet. La figure 8.1 donne une représentation générale du scénario de stockage de l'eau sur des terres agricoles riveraines.

Le tableau 8.1 décrit, pour chaque sous-bassin, l'incidence de ce scénario de stockage de l'eau sur les milieux humides et les aires de stockage (c.-à-d. les terres agricoles), ainsi que sur leurs aires de drainage respectives. Une simulation hydrologique pour la période de 1950 à 2013 a été effectuée à partir de l'aire de stockage additionnelle, et l'atténuation des débits maximums ainsi que l'amplification des débits minimums (un effet souhaitable) ont été quantifiés. La méthodologie est semblable à celle utilisée pour l'évaluation des services hydrologiques fournis par les milieux humides existants, si ce n'est que celle-ci a porté sur les gains réalisés par rapport à la situation actuelle.

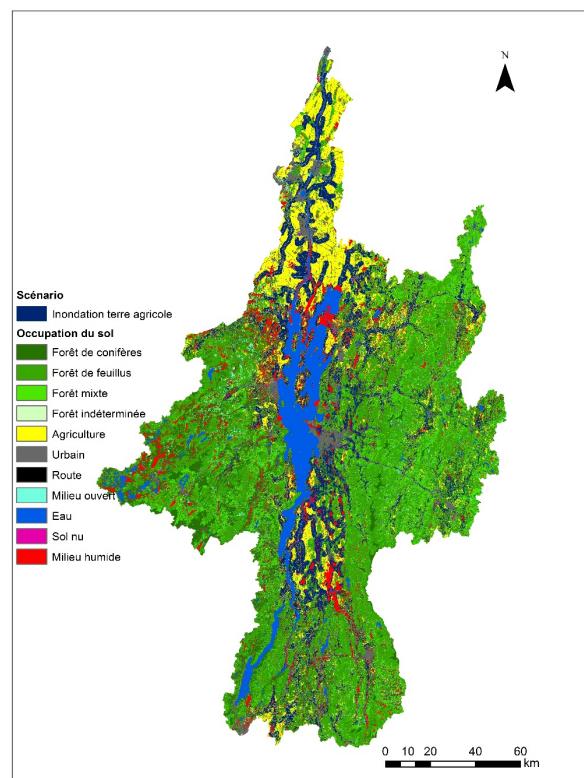


Figure 8-1. Représentation générale du scénario de stockage de l'eau sur des terres agricoles riveraines.

Tableau 8-1. Impact spatial du stockage de l'eau sur les terres agricoles riveraines du bassin LCRR pour les 20 sous-bassins du LC, le débit des ANB du LC et le débit de la RR aux rapides Fryers.

#	BASSIN	DRAINAGE (km ²)	Milieux humides+stockage		c. bassin		Drainage		c. bassin	
			(km ²)	GAIN (km ²)*	(%)	GAIN (%)*	(km ²)	GAIN (km ²)	(%)	GAIN (%)
1	Great Chazy	778	212	105	27,2 %	13,5 %	357	-14	45.9%	-1.7%
2	Little Chazy	143	45	25	31,5 %	17,3 %	69	-4	48.4%	-2.5%
3	Dead Creek	114	47	20	41,3 %	17,3 %	51	-12	45.1%	-10.2%
4	Saranac	1 579	201	18	12,8 %	1,1 %	763	3	48.3%	0.2%
5	Salmon	177	27	12	15,4 %	7,1 %	90	0	51.0%	-0.1%
6	Little Ausable	188	34	22	18,3 %	11,6 %	93	-2	49.4%	-0.9%
7	Ausable	1 329	98	22	7,4 %	1,7 %	508	8	38.2%	0.6%
8	Bouquet	621	72	34	11,5 %	5,5 %	248	-7	39.9%	-1.2%
9	Putnam Creek	158	17	5	10,8 %	3,3 %	83	2	52.7%	1.3%
10	La Chute	678	34	9	5,0 %	1,3 %	187	12	27.5%	1.8%
11	Poultney	1 778	373	253	21,0 %	14,2 %	779	5	43.8%	0.3%
12	Otter Creek	2 446	572	348	23,4 %	14,2 %	958	-3	39.2%	-0.1%
13	Little Otter Creek	153	69	51	45,3 %	33,5 %	66	-14	43.1%	-8.9%
14	Lewis Creek	203	60	44	29,7 %	21,8 %	83	3	41.1%	1.4%
15	LaPlatte	118	50	43	42,7 %	36,0 %	47	3	39.4%	2.9%
16	Winooski	2 756	273	194	9,9 %	7,0 %	868	210	31.5%	7.6%
17	Lamoille	1 866	276	182	14,8 %	9,8 %	804	97	43.1%	5.2%
18	Missisquoi	2 212	398	243	18,0 %	11,0 %	914	28	41.3%	1.3%
19	De La Roche	144	61	45	42,2 %	31,6 %	62	0	42.9%	-0.1%
20	Aux Brochets	664	224	168	33,8 %	25,2 %	250	32	37.6%	4.9%
LC			21 254	3 807	2 256	17,9 %	10,6 %	8 047	298	37.9% 1.4%
RR (Fryers)			22 055	4 087	2 471	18,5 %	11,2 %	8 255	352	37.4% 1.6%

*Les gains sont synonymes d'une augmentation de la superficie de stockage (par exemple, pour le bassin de la Great Chazy avec stockage d'eau sur les terres agricoles : 27,2 % (13,8 % de l'occupation du sol des milieux humides + 13,5 % des terres agricoles inondées) du bassin se trouve dans l'aire de stockage).

Voici la formule appliquée pour ce calcul:

- Pour les débits maximums:

$$\frac{\text{Milieux humides existants} - \text{Scénario de terres agricoles}}{\text{Milieux humides existants}}$$

où un résultat positif correspond à une atténuation.

- Pour les débits minimums:

$$\frac{\text{Scénario de terres agricoles} - \text{Milieux humides existants}}{\text{Milieux humides existants}}$$

où un résultat positif correspond à une amplification.

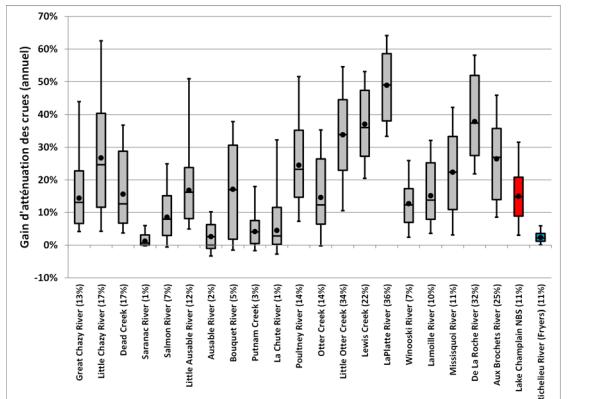
8.1 EFFETS SUR LES DÉBITS MAXIMUMS

La figure 8.2 illustre les effets du scénario de stockage de l'eau sur des terres agricoles sur le gain d'atténuation des débits maximums sur une base : a) annuelle, b) printanière et c) estivale/automnale. Comme cette étude met particulièrement l'accent sur les débits maximums et les risques de crue, les effets du scénario de stockage de l'eau en terres agricoles sur les gains d'atténuation des débits minimums ne sont pas abordés ici; toutefois, ces résultats sont présentés à l'annexe II (figure A3.2).

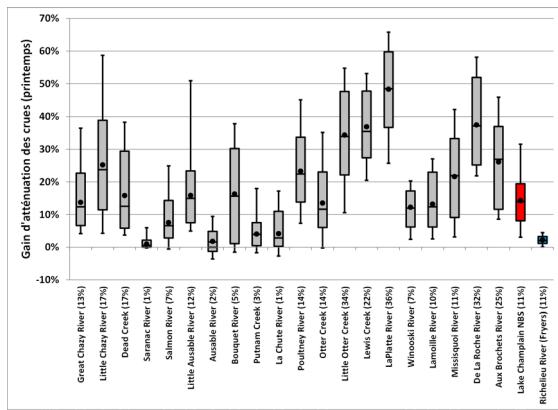
Le tableau 8.2 résume l'effet annuel sur le gain d'atténuation pour : (i) les 20 principaux sous-bassins hydrographiques du LC, (ii) les ANB du LC, (iii) le débit de la RR aux rapides Fryers et (iv) les niveaux d'eau du LC et de la RR (à la marina de Saint-Jean-sur-Richelieu) à partir des ANB simulés par HYDROTEL utilisés comme intrants dans le modèle de bilan hydrique journalier du lac Champlain.

Le tableau 8.2 donne également les Comme de raison, c'est dans les sous-bassins où il est possible d'ajouter proportionnellement plus d'aires de stockage d'eau (par rapport aux sous-bassins où la superficie gagnée est plus faible) qu'on observe un impact sensiblement plus marqué sur les débits maximums. La figure 8.2 présente la variation des impacts d'une année à l'autre dans chaque sous-bassin versant. Les gains d'atténuation annuels et printaniers sont semblables, puisque c'est le plus souvent au printemps qu'on enregistre les débits les plus élevés. La figure 8.2 montre que, pour sept (7) sous-bassins versants (ceux des rivières Saranac, Salmon, Ausable, Bouquet, Putnam Creek, La Chute et Otter Creek), les résultats annuels ou printaniers peuvent se traduire par des effets négatifs (augmentation des débits maximums) et que pour neuf (9) sous-bassins versants (ceux des rivières Great Chazy, Dead Creek, Saranac, Salmon, Little Ausable, Ausable, Bouquet, La Chute et Richelieu (à Fryers)), les résultats de l'automne font état d'impacts négatifs.

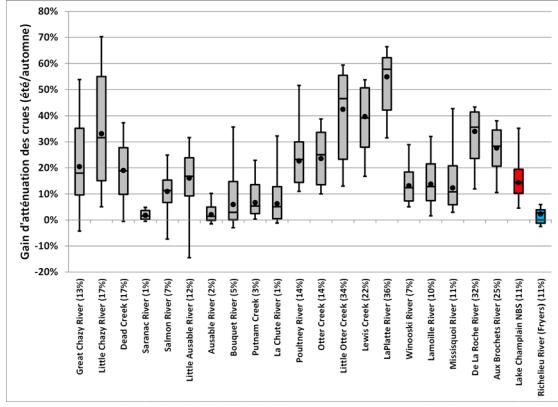
On constate un effet constant et évident de l'impact relatif des milieux humides sur les débits maximums. Cependant, on note aussi quelques cas d'impacts négatifs où des conditions particulières, soit une forte hygrométrie antérieure du sol ou un niveau d'eau élevé des milieux humides, peuvent être préjudiciables. De telles valeurs négatives donnent à penser que, pour une année donnée, le stockage d'eau sur les terres agricoles pourrait aggraver les débits maximums. Cependant, il importe de noter que tous les gains d'atténuation médians ou moyens sont positifs.



(a) (■Min; ▨Max; ▨10^e percentile; ▨90^e percentile; ▨ Médiane; ▨ Moyenne)



(b) (■Min; ▨Max; ▨10^e percentile; ▨90^e percentile; ▨ Médiane; ▨ Moyenne)



(c) (■Min; ▨Max; ▨10^e percentile; ▨90^e percentile; ▨ Médiane; ▨ Moyenne)

Figure 8-2. Gain d'atténuation des débits maximums attribuable au stockage d'eau sur des terres agricoles riveraines du bassin LCRR pour les 20 sous-bassins du LC, du débit des ANB du LC et du débit de la RR aux rapides Fryers par rapport aux conditions actuelles pour différents pas de temps : a) annuels, b) printaniers et c) estivaux/automnaux.

Le tableau 8.2 montre la variation des impacts maximums/minimums sur l'année, pour toute la période de modélisation, ainsi que la contribution évidente du stockage de l'eau sur des terres agricoles dans les années de crue notoire (1973, 1983, 1984, 2011 et 2013). On constate des répercussions négatives quand le niveau d'eau initial des milieux humides et la temporalité des crues causent une augmentation du débit maximum, mais les augmentations relatives du débit maximum sont faibles et limitées. D'après les conditions météorologiques de 1950 à 2013, le stockage massif d'eau dans les terres agricoles riveraines peut atténuer les effets de la crue en réduisant les débits de pointe.

En effet, comparativement aux conditions actuelles, l'accroissement de la superficie consacrée au stockage de l'eau (7,3 % à 17,9 % de la superficie totale du bassin du LC) pourrait entraîner une diminution moyenne de 15 % du débit de pointe le plus élevé des ANB, à un pas de temps journalier, et de 2 % en moyenne du débit de pointe aux rapides Fryers, sur la rivière Richelieu.

De telles réductions sont également constatées dans le cas des niveaux du lac Champlain et de la rivière Richelieu (en moyenne, 4 cm dans le LC et 3 cm à la marina de Saint-Jean-sur-Richelieu). Ainsi, à un pas de temps journalier, le stockage massif d'eau sur des terres agricoles riveraines pourrait s'avérer une mesure d'atténuation tout à fait valable.

Tableau 8-2. Gains d'atténuation des débits maximums, sur une base annuelle, attribuables au stockage de l'eau sur des terres agricoles riveraines du bassin LCRR pour les 20 sous-bassins du LC, du débit des ANB du LC, du débit de la RR aux rapides Fryers et des niveaux du LC et de la RR (à la marina de Saint-Jean-sur-Richelieu), comparativement aux conditions actuelles.

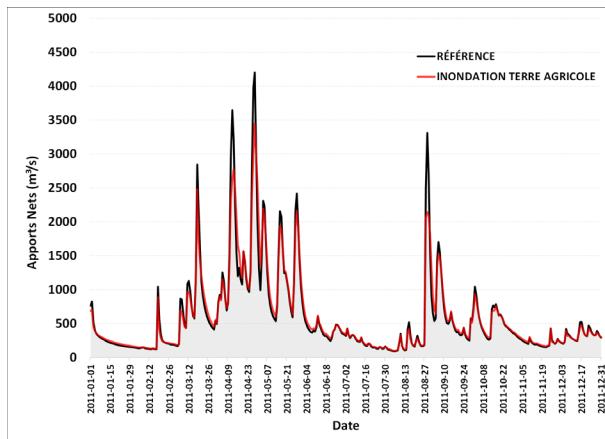
#	BASSIN (WT GAIN %)	MIN		MAX		ANNÉE DE CRUE					MOYENNE	MÉDIANE
		ANNÉE	ATTÉNUATION	ANNÉE	ATTÉNUATION	1973	1983	1984	2011	2013		
1	Great Chazy (13%)	1983	4,2 %	1996	43,9 %	10,1 %	4,2 %	9,2 %	36,5 %	32,9 %	14%	13%
2	Little Chazy (17%)	1964	4,2 %	1957	62,5 %	22,4 %	16,9 %	29,0 %	57,2 %	48,4 %	27%	25%
3	Dead Creek (17%)	2007	3,7 %	1965	36,8 %	4,7 %	16,4 %	11,7 %	11,3 %	11,6 %	16%	13%
4	Saranac (1%)	1959	-0,2 %	2003	6,0 %	2,4 %	4,0 %	1,1 %	0,3 %	4,1 %	1%	1%
5	Salmon (7%)	1969	-0,6 %	1998	24,9 %	6,3 %	11,7 %	6,3 %	14,4 %	16,2 %	9%	8%
6	Little Ausable (12%)	1954	4,9 %	1987	50,9 %	7,8 %	16,8 %	15,5 %	24,9 %	23,9 %	17%	16%
7	Ausable (2%)	1974	-3,3 %	2004	10,2 %	0,4 %	0,2 %	5,8 %	1,1 %	3,9 %	3%	3%
8	Bouquet (5%)	1999	-1,5 %	1982	37,9 %	28,1 %	18,0 %	26,1 %	27,1 %	6,2 %	17%	17%
9	Putnam Creek (3%)	1974	-1,7 %	1977	18,0 %	1,4 %	4,1 %	9,6 %	6,4 %	7,4 %	4%	4%
10	La Chute (1%)	1963	-2,7 %	1957	32,3 %	1,9 %	0,9 %	4,7 %	6,8 %	1,6 %	5%	3%
11	Poultney (14%)	1967	7,3 %	2011	51,6 %	28,0 %	16,8 %	41,1 %	51,6 %	23,7 %	24%	23%
12	Otter Creek (14%)	1991	-0,2 %	1965	35,3 %	13,2 %	9,1 %	13,9 %	25,1 %	10,7 %	15%	12%
13	Little Otter Creek (34%)	1983	10,6 %	2012	54,6 %	34,1 %	10,6 %	29,4 %	37,7 %	33,4 %	34%	34%
14	Lewis Creek (22%)	1967	20,5 %	1998	53,1 %	37,2 %	27,6 %	33,6 %	39,2 %	40,9 %	37%	36%
15	LaPlatte (36%)	2005	33,3 %	1980	64,1 %	45,1 %	35,9 %	43,1 %	50,2 %	49,2 %	49%	49%
16	Winooski (7%)	1961	2,4 %	2011	25,9 %	17,7 %	8,7 %	17,3 %	25,9 %	11,9 %	13%	12%
17	Lamoille (10%)	1980	3,6 %	2010	32,1 %	25,9 %	15,0 %	16,3 %	22,0 %	27,1 %	15%	14%
18	Missisquoi (11%)	1980	3,1 %	1982	42,1 %	15,8 %	12,8 %	9,0 %	27,8 %	25,8 %	22%	22%
19	De La Roche (32%)	1971	21,8 %	1977	58,1 %	45,5 %	32,4 %	40,0 %	30,2 %	33,6 %	38%	37%
20	Aux Brochets (25%)	1992	8,6 %	1982	45,8 %	31,1 %	28,7 %	34,5 %	30,2 %	36,1 %	26%	27%
ANB DU LC (11 %)		1980	3,0 %	1982	31,6 %	15,0 %	11,3 %	19,4 %	17,9 %	21,7 %	15%	15%
RR (Fryers) (11 %)		1975	0,1 %	1957	5,9 %	1,7 %	2,0 %	3,3 %	2,0 %	2,5 %	2%	2%
Niveau du LC (cm)		1985	0	1998	10	5	4	6	5	5	4	4
Niveau de la RR (cm)		1975	0	1998	7	2	3	4	4	3	3	3

8.2 EFFETS SUR LES CRUES DE 2011

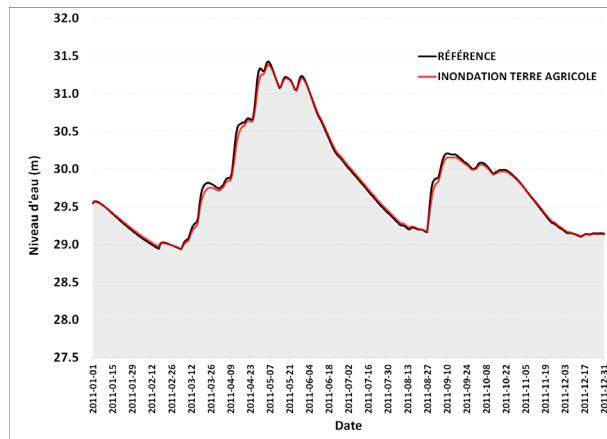
La présente section porte sur les hydrogrammes de 2011 à diverses échelles spatiales et compare les résultats de simulations en ce qui a trait à l'effet actuel des milieux humides et au scénario de stockage d'eau sur des terres agricoles riveraines. Ici, les résultats sont présentés à un pas de temps journalier pour ce qui est des ANB simulés par HYDROTEL, ainsi que des débits et des niveaux d'eau dérivés du MBH fondé sur les ANB susmentionnés.

La figure 8.3 illustre les effets du stockage de l'eau dans des terres agricoles riveraines du bassin LCRR sur (a) le débit des ANB, (b) le niveau d'eau du LC, (c) le débit de la RR aux rapides Fryers et (d) le niveau d'eau de la RR (à la marina de Saint-Jean-sur-Richelieu), en regard des conditions de 2011. Le tableau 8.3 résume l'impact du scénario de stockage des eaux sur des terres agricoles, en regard des conditions de 2011.

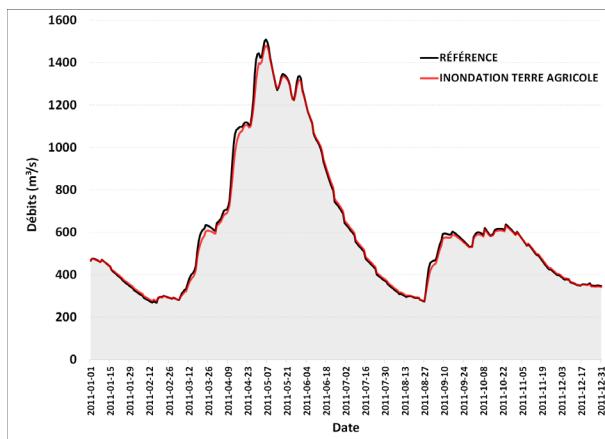
(a) Approvisionnement net du bassin du lac Champlain



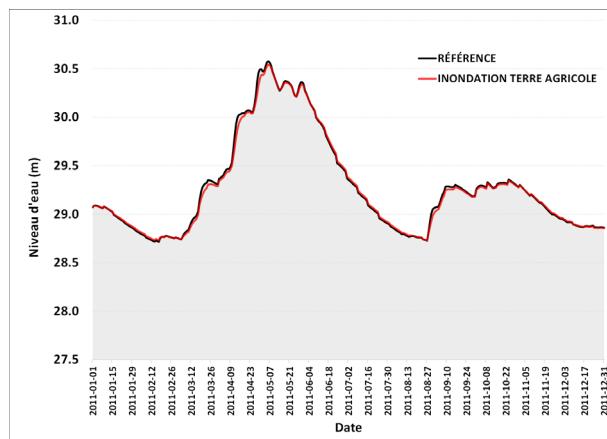
(b) Niveau d'eau du lac Champlain



(c) Débit de la rivière Richelieu



(d) Niveau d'eau de la rivière Richelieu



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

Figure 8.3. Effets du stockage de l'eau sur les terres agricoles riveraines du bassin LCRR établi par HYDROTEL en fonction du MBH, en regard des conditions de 2011 et pour un pas de temps journalier.

Tableau 8-3. Résumé des effets du stockage de l'eau dans des terres agricoles riveraines sur : le débit des ANB, le niveau d'eau du LC, le débit de la RR aux rapides Fryers et le niveau d'eau de la RR (à la marina de Saint-Jean-sur-Richelieu), en regard des conditions de 2011.

Milieux humides	Bassin du lac Champlain	Rivière Richelieu (Fryers)
Superficie (km ²)	21 254	22 055
Superficie des milieux humides + aires de stockage (km ²)	3 807 (1 551)	4 087 (1 616)
Aire de drainage des milieux humides (km ²)	8 047 (7 749)	8 255 (7 902)
HYDROTEL + MBH (pas de temps journalier)		
Diminution du pic maximum (%)	-17,9 % (ANB)	-2,0 % (DÉBIT)
Diminution du niveau maximum	-5 cm (-0,14 %)	-4 cm (-0,12 %)

() indique la superficie des milieux humides existants/la diminution du niveau d'eau relatif

L'augmentation de la superficie de stockage d'eau sur des terres agricoles riveraines a permis de réduire de 17,9 % le débit de pointe des ANB du lac Champlain, et d'abaisser ainsi le niveau du lac de 5 cm. Les avantages constatés ne sont pas proportionnels dans le cas du débit de la rivière Richelieu (-2 %), mais la réduction du niveau d'eau est la même (- 4 cm). Ainsi, en 2011, le stockage massif d'eau dans les terres agricoles riveraines selon un pas de temps journalier aurait pu apporter un soulagement appréciable. 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 km² de terres agricoles riveraines nécessiterait de vastes travaux et prendrait beaucoup de temps.

9 SCÉNARIO D'AMÉNAGEMENT/ DE RESTAURATION DE MILIEUX HUMIDES

9.1 SCÉNARIO D'AMÉNAGEMENT/DE RESTAURATION DE MILIEUX HUMIDES D'APRÈS DES DONNÉES SPATIALES

Cette étude a permis d'élaborer des scénarios d'aménagement/de restauration de milieux humides à partir de données spatiales facilement accessibles. L'approche adoptée repose sur deux composantes spatiales précises : le modèle numérique d'altitude (MNA) et la carte d'occupation du sol.

L'approche, qui est résumée à la figure 9.1, peut être décrite comme suit :

- 1 Repérage de dépressions (fosses) dans le MNA (lettre B dans le cadre gauche de la figure 9.1).
- 2 À l'aide de la matrice d'écoulement, identification des cellules qui convergent vers une fosse. Les cellules adjacentes à la fosse représentent la capacité d'une dépression de niveau 1 (1) (numérotée 1 dans le cadre de gauche de la figure 9.1).
- 3 Reconstitution de la cavité de la fosse, niveau par niveau. Les cellules adjacentes et convergentes au niveau un (1) représentent le niveau deux (2); la répétition de ce processus permet de délimiter toutes les zones de dépression potentielle du MNA (numérotées de 1 à 10 dans le cadre gauche de la figure 9.1).
- 4 Identification des diverses dépressions selon différents critères de conception (p. ex., seuil de capacité de stockage, superficie en milieux humides représentée par le nombre de cellules convergeant vers la cellule la plus profonde, (indiquée en vert sur l'image de gauche de la figure 9.1) et l'aire de drainage/de contribution (cellules bleues à la figure 9.1) représentant les cellules convergeant vers le milieu humide.
- 5 Les scénarios relatifs aux milieux humides tiennent compte de quelques catégories d'occupation du sol (forêts, terres agricoles), à l'exclusion donc des milieux humides existants, des zones urbaines et des routes.

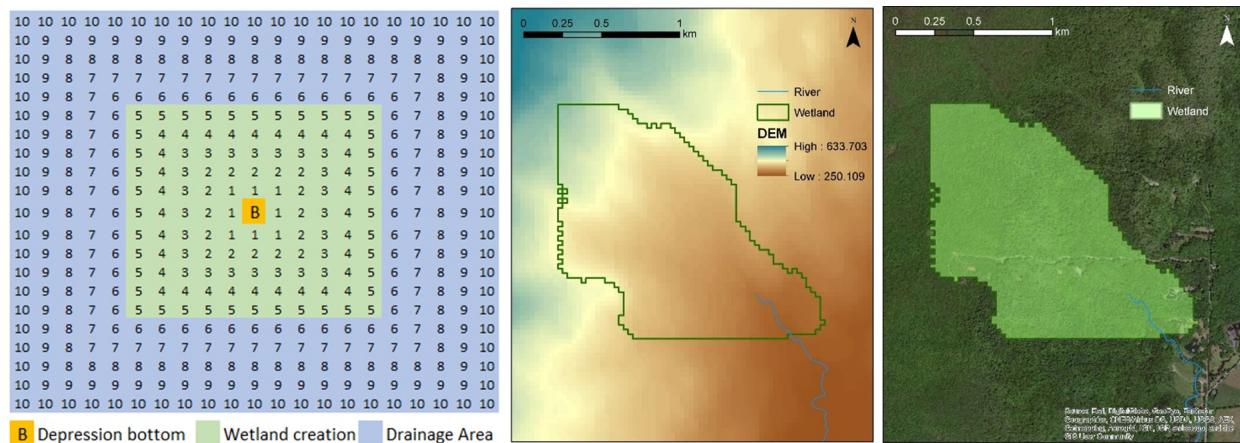


Figure 9-1. Élaboration d'un scénario relatif aux milieux humides à partir d'un MNA et de certains critères de conception (p. ex., superficie des milieux humides ou nombre de cellules convergeant vers les cases les plus profondes et l'aire de drainage ou nombre minimal de cases convergeant vers la zone occupée par les milieux humides)- anglais seulement.

La figure 9.1 présente l'aménagement et l'emplacement d'un nouveau milieu humide à partir d'un MNA (illustration du centre) et de l'affichage qui en découle sur une vue satellite du terrain (illustration de droite).

C'est suivant cette approche qu'a été élaboré un scénario d'aménagement/de restauration de milieux humides pour lequel la valeur ajoutée a été évaluée. L'estimation faite à la section 7 indique qu'il faut ajouter 632 km² de milieux humides avec une hauteur d'eau de 50 cm pour réduire de 5 % le débit maximal de 2011 aux rapides Fryers. À partir de cette estimation, on a élaboré un scénario correspondant à l'ajout de 649 km² de milieux humides dans le bassin versant de la rivière Richelieu, en amont des rapides Fryers, dont 647 km² dans le bassin versant du lac Champlain. La figure 9.2 est une représentation générale de ce scénario.

9.1.1 Effets sur les débits maximums

Le tableau 9.1 décrit les effets d'un ajout total de 652 km² de milieux humides sur les milieux humides du bassin LCRR et sur leurs aires de drainage. Pour ce scénario, une simulation hydrologique a été effectuée pour des intervalles temporels de 1950 à 2013. Les gains d'atténuation des débits maximums ou d'amplification des débits minimums ont été évalués au moyen d'une comparaison entre l'atténuation des débits maximums et l'amplification des débits minimums associés à ce scénario et ceux obtenus par la répartition des milieux humides actuels dans le bassin LCRR.

La méthodologie était donc semblable à celle utilisée à la section 8, c'est-à-dire que la formule appliquée pour ce calcul a été la suivante:

- Pour les débits maximums:

Milieux humides existants–Scénario de milieux humides
Milieux humides existants

où un résultat positif correspond à une atténuation des débits maximums.

- Pour les débits minimums:

Scénario de milieux humides–Milieux humides existants
Milieux humides existants

où un résultat positif correspond à une amplification des débits minimums.

La figure 9.3 met en évidence les effets (annuels, printaniers, estivaux/automnaux) du scénario de recours à des milieux humides sur l'atténuation des débits maximums. Comme cette étude met l'accent sur les débits maximums et les risques de crue, l'incidence du scénario relatif aux milieux humides sur le gain d'amplification des débits minimums n'est pas abordée ici; toutefois, ces résultats sont présentés à l'annexe III (figure A3.3). Le tableau 9.2 résume l'impact annuel du scénario relatif aux milieux humides sur (i) les gains d'atténuation des débits maximums pour les 20 principaux sous-bassins hydrographiques du LC, (ii) les ANB du LC, (iii) le débit de la RR aux rapides Fryers et (iv) les niveaux d'eau du LC et de la RR (à la marina de Saint-Jean-sur-Richelieu) suivant la méthodologie décrite précédemment; c'est-à-dire, à partir des ANB d'HYDROTEL servant de données d'entrée au MBH journalier du lac Champlain. De même, le tableau 9.2 indique les impacts lors d'années de crue notoires.

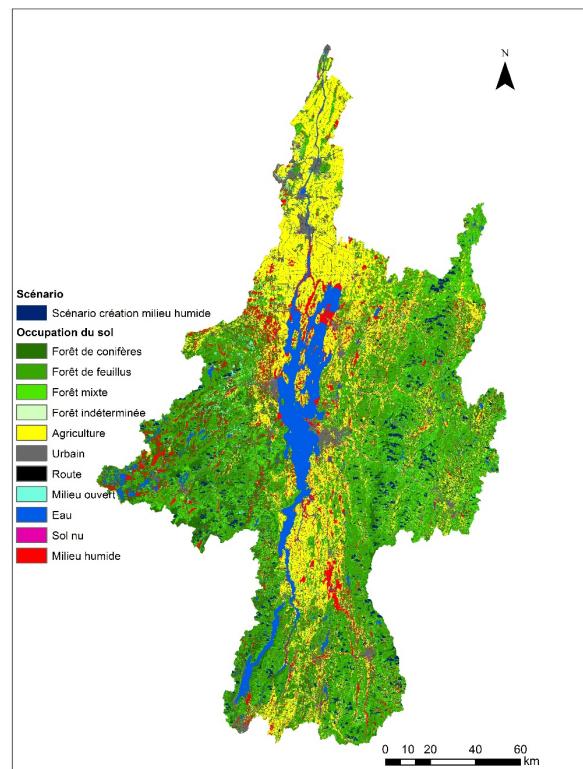


Figure 9.2. Représentation générale du scénario relatif aux milieux humides à l'aide du MNA..

Tableau 9-1. Incidence spatiale du scénario relatif aux milieux humides sur le bassin LCRR pour les 20 sous-bassins du LC, le débit des ANB du LC et RR aux rapides Fryers.

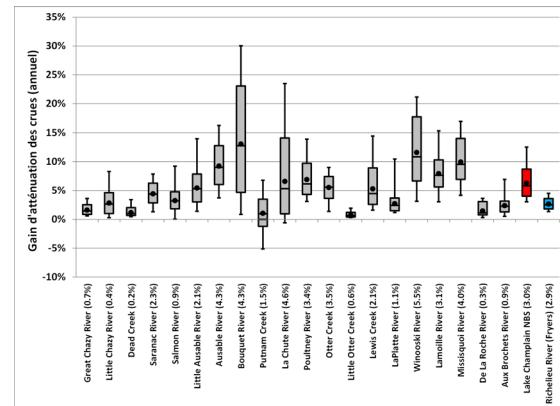
#	BASSIN	DRAINAGE (km ²)	Milieux humides (km ²)		c. bassin (%)		MH drainé (km ²)		c. bassin (%)	
			GAIN (km ²)*	GAIN (%)*	GAIN (%)*		GAIN (km ²)*	GAIN (%)*	GAIN (%)	
1	Great Chazy	778	112	5	14,4 %	0,7 %	376	6	48,4 %	0,8 %
2	Little Chazy	143	21	1	14,6 %	0,4 %	76	3	53,1 %	2,2 %
3	Dead Creek	114	28	0	24,2 %	0,2 %	64	1	56,5 %	1,2 %
4	Saranac	1579	220	36	13,9 %	2,3 %	780	19	49,4 %	1,2 %
5	Salmon	177	16	2	9,2 %	0,9 %	95	5	53,6 %	2,6 %
6	Little Ausable	188	17	4	8,8 %	2,1 %	103	8	54,8 %	4,5 %
7	Ausable	1329	133	57	10,0 %	4,3 %	558	58	42,0 %	4,4 %
8	Bouquet	621	64	27	10,4 %	4,3 %	284	28	45,7 %	4,6 %
9	Putnam Creek	158	14	2	8,9 %	1,5 %	83	2	52,5 %	1,1 %
10	La Chute	678	57	31	8,4 %	4,6 %	200	26	29,5 %	3,8 %
11	Poultney	1778	181	61	10,2 %	3,4 %	836	61	47,0 %	3,5 %
12	Otter Creek	2446	310	86	12,7 %	3,5 %	1092	130	44,6 %	5,3 %
13	Little Otter Creek	153	19	1	12,3 %	0,6 %	80	0	52,1 %	0,2 %
14	Lewis Creek	203	20	4	10,0 %	2,1 %	89	8	43,8 %	4,2 %
15	LaPlatte	118	9	1	7,8 %	1,1 %	48	5	40,9 %	4,5 %
16	Winooski	2756	231	152	8,4 %	5,5 %	882	224	32,0 %	8,1 %
17	Lamoille	1866	153	59	8,2 %	3,1 %	804	97	43,1 %	5,2 %
18	Missisquoi	2212	243	89	11,0 %	4,0 %	994	108	44,9 %	4,9 %
19	De La Roche	144	16	0	11,0 %	0,3 %	64	2	44,2 %	1,2 %
20	Aux Brochets	664	63	6	9,4 %	0,9 %	239	21	35,9 %	3,1 %
LC		21254	2199	647	10,3 %	3,0 %	8595	846	40,4 %	4,0 %
RR (Fryers)		22055	2265	649	10,3 %	2,9 %	8768	865	39,8 %	3,9 %

*Les gains réalisés signifient que la superficie du bassin en milieux humides (après ajout de milieux humides) passe — dans le cas du bassin de la rivière Grand Chazy, par exemple — à 14,4 % (dont 13,8 % occupés par des milieux humides) soit un gain de 0,7 % en milieux humides.

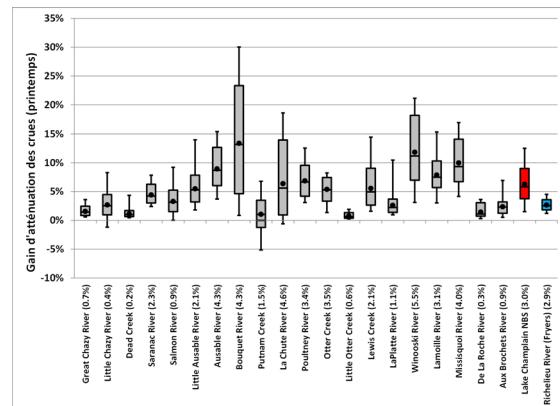
Dans les sous-bassins où les gains en milieux humides, exprimés en pourcentage, sont élevés, on a observé une augmentation proportionnelle de l'atténuation des débits maximums, comparativement aux sous-bassins où l'augmentation de la superficie en milieux humides est plus faible. La figure 9.3 montre la variation des impacts d'une année à l'autre dans chaque sous-bassin versant. Les gains d'atténuation annuels et printaniers sont semblables, puisque le débit le plus élevé se produit la plupart du temps au printemps. La figure 9.3 montre que, pour trois (3) sous-bassins versants (rivières Little Chazy, Putnam Creek et La Chute), les résultats annuels ou printaniers font état d'effets négatifs (augmentation des débits maximums). Pour sept (7) sous-bassins versants. (rivières Saranac, Salmon, Little Ausable, Putnam Creek, La Chute, Little Otter Creek et Richelieu (à Fryers)), les résultats d'automne font aussi état d'impacts négatifs. De telles valeurs négatives donnent à penser que, certaines années, une augmentation de la superficie de milieux humides pourrait aggraver les débits maximums. Cependant, il est important de noter que tous les résultats relatifs aux gains d'atténuation médians ou moyens sont positifs.

Le tableau 9.2 montre les impacts maximums/minimums variables sur l'année, pour toute la période de modélisation, ainsi que la contribution évidente de l'ajout de milieux humides lors d'années de crue notoire (1973, 1983, 1984, 2011 et 2013). Une augmentation de la superficie des milieux humides calculée selon les conditions météorologiques de 1950 à 2013, peut donner lieu à une réduction des débits de pointe. En effet, l'augmentation de la superficie des milieux humides de 7,3 % à 10,3 % de la superficie totale du bassin du LC pourrait occasionner une diminution moyenne de 6,3 % du débit de pointe le plus élevé des ANB, à un pas de temps journalier, et de 2,6 % en moyenne du débit de pointe aux rapides Fryers de la rivière Richelieu. De telles réductions sont également observées sur les niveaux d'eau du lac Champlain et de la rivière Richelieu (en moyenne, 5 cm pour le LC et 3 cm pour la RR à la marina de Saint-Jean-sur-Richelieu). Par conséquent, compte tenu des résultats obtenus grâce à cet exercice de modélisation hydrologique fondé sur pas de temps

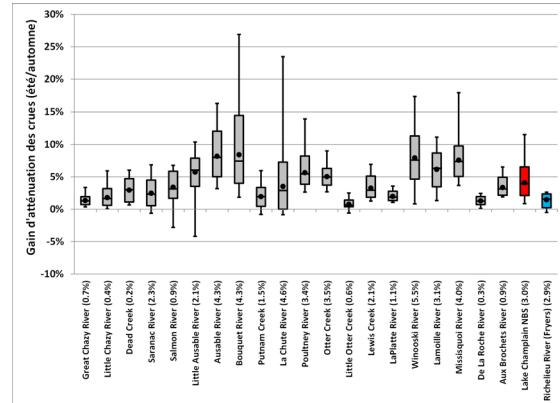
journalier, l'augmentation de 3 % de la superficie de milieux humides pourrait s'avérer une mesure d'atténuation utile.



(a) (■ Min; ▨ Max; ▨ 10^e percentile; ▨ 90^e percentile; ■ Médiane; ▨ Moyenne)



(b) (■ Min; ▨ Max; ▨ 10^e percentile; ▨ 90^e percentile; ■ Médiane; ▨ Moyenne)



(c) (■ Min; ▨ Max; ▨ 10^e percentile; ▨ 90^e percentile; ■ Médiane; ▨ Moyenne)

Figure 9.3. Gain d'atténuation du débit maximum annuel après ajout de 649 km² de milieux humides dans le bassin LCRR pour les 20 sous-bassins du LC, les ANB du LC et le débit de la RR aux rapides Fryers, comparés aux conditions actuelles pour différents pas de temps : a) annuels, b) printaniers et c) estivaux/automnaux.

Tableau 9-2. Gain d'atténuation du débit maximum annuel après ajout de 649 km² de milieux humides dans le bassin LCRR pour les 20 sous-bassins du LC, et débit des ANB du LC et de la RR (à la marina de Saint-Jean-sur-Richelieu), comparés aux conditions actuelles.

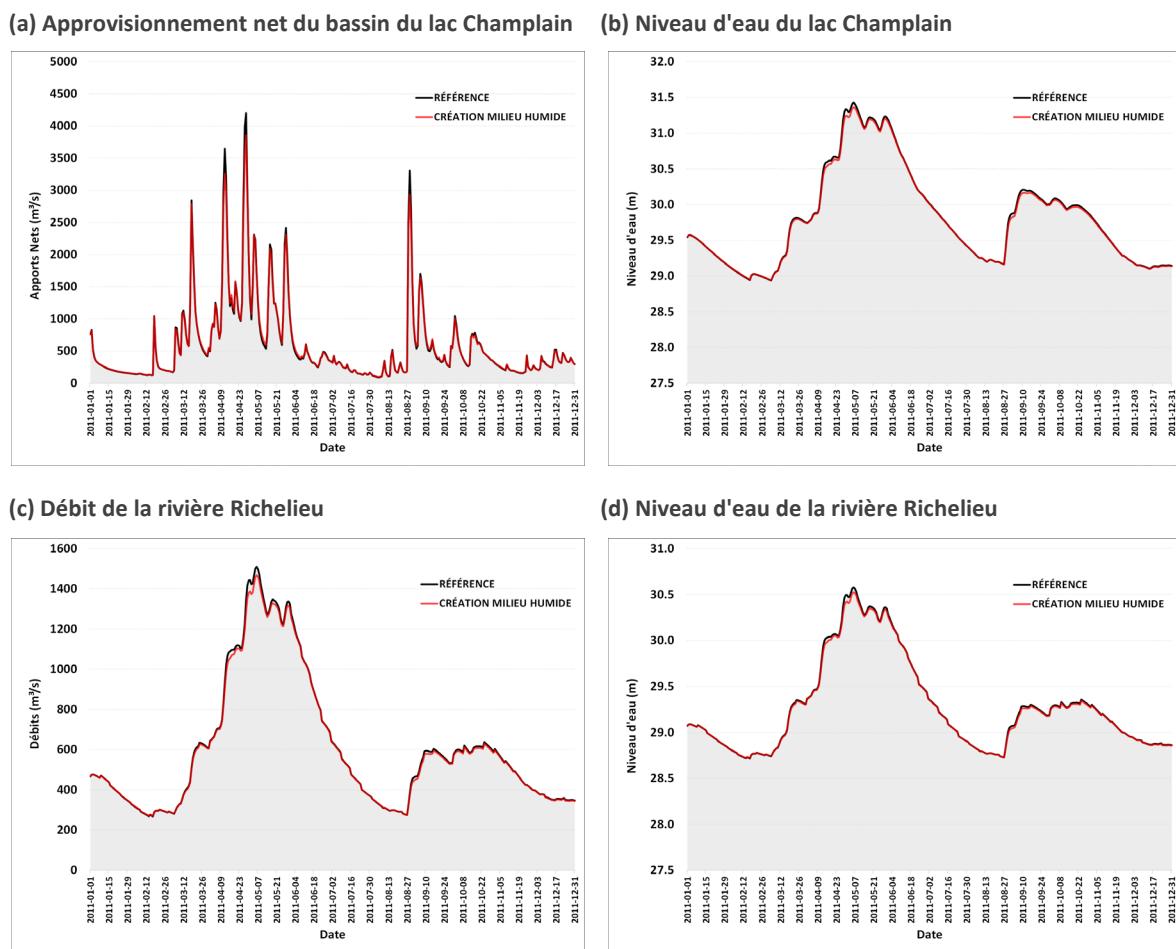
#	BASSIN (WT GAIN %)	MIN		MAX		ANNÉE DE CRUE					MOYENNE	MÉDIANE
		ANNÉE	ATTÉNUATION	ANNÉE	ATTÉNUATION	1973	1983	1984	2011	2013		
1	Great Chazy (0,7%)	1961	0,6 %	2013	3,6 %	1,6 %	1,1 %	1,7 %	2,5 %	3,6 %	1,6 %	1,5 %
2	Little Chazy (0,4%)	1967	0,3 %	2013	8,3 %	2,5 %	3,3 %	1,9 %	4,5 %	8,3 %	2,8 %	2,7 %
3	Dead Creek (0,2%)	1969	0,5 %	1995	3,4 %	0,6 %	0,9 %	0,9 %	0,7 %	0,8 %	1,2 %	1,0 %
4	Saranac River (2,3%)	1965	1,3 %	1998	7,8 %	3,9 %	3,1 %	3,2 %	5,5 %	4,9 %	4,4 %	4,4 %
5	Salmon (0,9%)	1994	0,0 %	1998	9,2 %	3,3 %	2,9 %	4,0 %	3,4 %	5,9 %	3,3 %	3,2 %
6	Little Ausable (2,1%)	2003	1,4 %	1998	14,0 %	3,8 %	3,1 %	5,3 %	6,7 %	4,3 %	5,4 %	5,3 %
7	Ausable (4,3%)	1965	3,7 %	1996	16,3 %	10,7 %	5,7 %	11,3 %	10,0 %	6,5 %	9,2 %	9,0 %
8	Bouquet (4,3%)	1959	0,9 %	2001	30,0 %	13,1 %	13,5 %	15,7 %	11,5 %	5,4 %	13,0 %	12,8 %
9	Putnam Creek (1,5%)	1970	-5,1 %	1990	6,8 %	4,2 %	1,6 %	0,7 %	2,0 %	2,0 %	1,0 %	1,0 %
10	La Chute (4,6%)	1964	-0,6 %	1957	23,5 %	2,9 %	2,3 %	1,6 %	8,4 %	0,2 %	6,6 %	5,3 %
11	Poultney (3,4%)	1966	3,1 %	2011	13,9 %	5,3 %	6,0 %	9,6 %	13,9 %	5,1 %	6,9 %	6,1 %
12	Otter Creek (3,5%)	1997	1,4 %	2011	9,0 %	7,4 %	2,8 %	5,3 %	9,0 %	2,8 %	5,5 %	5,6 %
13	Little Otter Creek (0,6%)	1980	0,3 %	1998	1,9 %	0,7 %	0,4 %	0,6 %	0,7 %	0,6 %	0,7 %	0,7 %
14	Lewis Creek (2,1%)	2002	1,6 %	1958	14,4 %	4,9 %	2,9 %	4,1 %	4,6 %	3,7 %	5,3 %	4,5 %
15	LaPlatte (1,1%)	1970	1,2 %	1998	10,5 %	2,4 %	2,1 %	1,9 %	2,4 %	3,3 %	2,7 %	2,4 %
16	Winooski (5,5%)	1991	3,1 %	1998	21,2 %	6,8 %	5,2 %	10,0 %	17,3 %	7,6 %	11,6 %	10,8 %
17	Lamoille (3,1%)	1966	3,0 %	1982	15,3 %	8,2 %	5,5 %	6,6 %	10,3 %	7,4 %	7,9 %	7,6 %
18	Missisquoi (4,0%)	2000	4,2 %	1990	17,0 %	6,9 %	7,0 %	9,1 %	13,9 %	9,8 %	9,9 %	9,5 %
19	De La Roche (0,3%)	1991	0,3 %	1975	3,6 %	1,5 %	1,1 %	1,0 %	0,9 %	1,0 %	1,5 %	1,1 %
20	Aux Brochets (0,9%)	1972	0,5 %	1982	6,9 %	1,6 %	2,2 %	2,1 %	2,0 %	3,0 %	2,4 %	2,3 %
ANB DU LC (3,0 %)		1966	3,0 %	1992	12,5 %	5,8 %	4,3 %	6,4 %	8,2 %	6,5 %	6,3 %	5,8 %
RR (Fryers) (2,9 %)		1966	1,3 %	1998	4,5 %	2,4 %	1,9 %	2,4 %	2,7 %	1,9 %	2,6 %	2,5 %
Niveau du LC (cm)		2004	1	1998	11	5	4	4	6	3	5	4
Niveau de la RR (cm)		1965	1	1998	8	4	3	3	5	2	3	3

9.1.2 Effets sur la crue de 2011 du scénario d'aménagement /de restauration de milieux humides

Cette section évalue les hydrogrammes de 2011 pour diverses échelles spatiales, suivant une comparaison entre les résultats de simulations liés à l'effet actuel des milieux humides et les résultats de ce scénario d'aménagement/de restauration des milieux humides. Ici, les résultats sont présentés selon un pas de temps journalier pour ce qui est des ANB simulés par HYDROTEL ainsi que des débits et des niveaux d'eau dérivés du MBH journalier, les ANB susmentionnés étant utilisés comme intrants.

La figure 9.4 montre les effets du scénario d'aménagement/de restauration des milieux humides dans le bassin LCRR sur : (a) le débit des ANB, (b) le niveau d'eau du LC, (c) les débits de la RR aux rapides Fryers et (d) le niveau d'eau de la RR (à la marina de Saint-Jean-sur-Richelieu). Le tableau 9.3 résume les résultats du scénario relatifs aux milieux humides compte tenu des conditions de 2011.

L'expansion de l'aire de stockage par l'ajout de milieux humides réduit les débits de pointe des apports nets du bassin du lac Champlain, ce qui fait baisser le niveau du lac. L'effet d'amortissement du lac Champlain limite les avantages sur les débits de pointe de la rivière Richelieu, mais les réductions des niveaux d'eau sont les mêmes. Ainsi, un tel scénario d'aménagement de milieux humides pourrait être une pratique bénéfique pertinente à l'échelle du lac Champlain.



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

Figure 9-4. Effets du scénario d'aménagement/de restauration de milieux humides dans le bassin LCRR compte tenu des conditions de 2011 en utilisant HYDROTEL et un MBH selon un pas de temps journalier.

Tableau 9-3. Résumé des impacts du scénario relatif aux milieux humides sur : le débit des ANB, le niveau d'eau du LC, le débit de la RR aux rapides Fryers et le niveau d'eau de la RR (à la marina de Saint-Jean-sur-Richelieu), en regard des conditions de 2011.

Milieux humides	Bassin du lac Champlain	Rivière Richelieu (Fryers)
Superficie (km ²)	21 254	22 055
Superficie des milieux humides (km ²)	2 199 (1 551)	2 265 (1 616)
Aire de drainage des milieux humides (km ²)	8 595 (7 749)	8 768 (7 902)
HYDROTEL + MBH (pas de temps journalier)		
Diminution du pic le plus élevé (%)	-8,2 % (ANB)	-2,7 % (DÉBIT)
Diminution du niveau d'eau le plus élevé	-6 cm (-0,20 %)	-5 cm (-0,17 %)

(¹) indique la superficie des milieux humides existantes ou la diminution du niveau d'eau relatif

9.2 SCÉNARIO RELATIF AUX MILIEUX HUMIDES DE L'USEPA

Il y a deux siècles, une grande partie des milieux humides a été transformée en champs agricoles ou en zones urbaines, mais les milieux humides jouent un rôle important dans l'élimination de la pollution de l'eau, la régulation du stockage et du débit de l'eau et la création d'habitats fauniques. La restauration des milieux humides pourrait aider à rétablir ces avantages. L'ensemble de données de l'Environmental Protection Agency des États-Unis (USEPA) sur les milieux humides à potentiel élevé (PWA) de l'EnviroAtlas montre les emplacements possibles de milieux humides supplémentaires pour le Vermont et les États de New York à une résolution de 30 mètres. Les milieux humides potentiels ont été identifiés comme des zones d'accumulation naturelle d'eau en raison de la topographie et qui, historiquement, avaient des sols

sous-jacents mal ou très mal drainés. Cet ensemble de données a été produit par l'USEPA pour appuyer les activités de recherche et de cartographie en ligne liées à l'EnviroAtlas, ce qui permet à l'utilisateur d'interagir avec une application de cartographie en ligne facile à utiliser pour visualiser et analyser de multiples services écosystémiques dans des États américains contigus³. L'ensemble de données est disponible sous forme de données téléchargeables⁴ ou de service cartographique EnviroAtlas. Des renseignements descriptifs supplémentaires sur chaque attribut de cet ensemble de données se trouvent dans la fiche d'information EnviroAtlas connexe⁵. Dans le cadre de ce projet, les emplacements géographiques des milieux humides présentant le plus grand potentiel de développement ont été superposés sur la carte actuelle d'occupation du sol pour créer un scénario de milieux humides de l'USEPA, y compris l'ajout de 865 km² de milieux humides dans le bassin du lac Champlain.

³ <https://www.epa.gov/enviroatlas>

⁴ <https://edg.epa.gov/data/Public/ORD/EnviroAtlas>

⁵ <https://www.epa.gov/enviroatlas/enviroatlas-fact-sheets>

La figure 9.5 donne une présentation générale des milieux humides à potentiel élevé de l'USEPA.

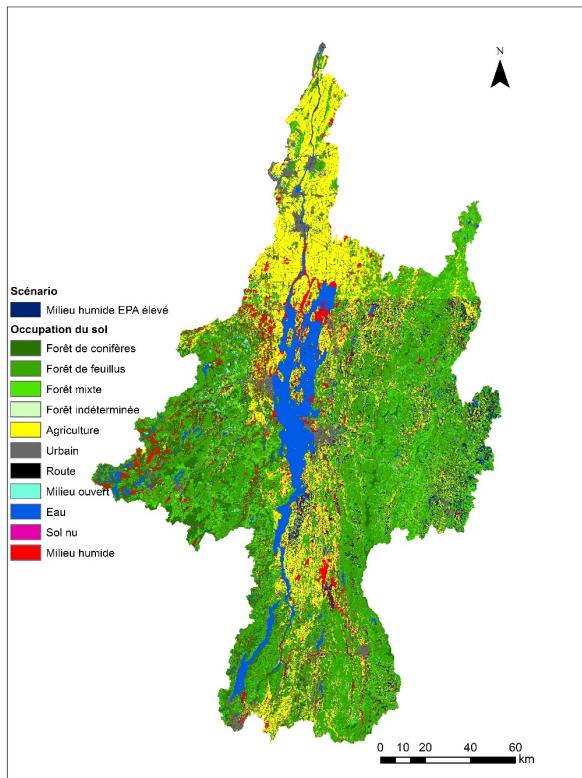


Figure 9.5. Représentation générale du scénario de l'USEPA relatif aux milieux humides qui présentent le meilleur potentiel.

9.2.1 Effet sur les débits maximums

Le tableau 9.4 décrit, pour chaque sous-bassin hydrographique, l'incidence du scénario de l'USEPA relatif aux milieux humides présentant le meilleur potentiel sur la superficie en milieux humides et sur la superficie de drainage des milieux humides dans le bassin LCRR. Pour ce scénario, une simulation hydrologique a été effectuée pour la période allant de 1950 à 2013. Les gains d'atténuation des débits maximums ou d'amplification des débits minimums ont été évalués au moyen d'une comparaison entre l'atténuation des débits maximums et l'amplification des débits minimums associés à ce scénario et ceux obtenus par l'actuelle répartition des milieux humides dans le bassin hydrographique LCRR.

La méthodologie était donc semblable à celle exposée à la section 8, c'est--dire que la formule appliquée pour ce calcul a été la suivante:

- Pour les débits maximums:

Milieux humides existants–Scénario de milieux humides
Milieux humides existants

où un résultat positif correspond à une atténuation.

- Pour les débits minimums:

Scénario de milieux humides–Mieux humides existants
Milieux humides existants

où un résultat positif correspond à une amplification.

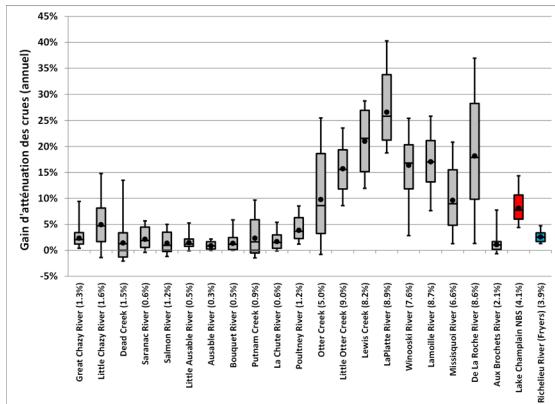
La figure 9.6 met en évidence l'impact (annuel, printanier, estival/automnal) du scénario de l'USEPA relatif aux milieux humides présentant le meilleur potentiel d'atténuation du débit maximum. Comme cette étude porte sur les débits maximums et les risques de crue, les répercussions du scénario de l'USEPA relatif aux milieux humides présentant le meilleur potentiel de gain d'amplification des débits minimums ne sont pas abordées ici; toutefois, ces résultats sont présentés à l'annexe III (figure A3.4). Le tableau 9.4 résume l'incidence annuelle du scénario de l'EPA sur : (i) les gains d'atténuation des débits maximums pour les 20 principaux sous-bassins hydrographiques du LC, (ii) les ANB du LC, (iii) le débit de la RR aux rapides Fryers et (iv) les niveaux d'eau du LC et de la RR (à la marina de Saint-Jean-sur-Richelieu) selon la méthodologie décrite précédemment qui est fondée sur le MBH alimenté par les ANB d'HYDROTEL pour le lac Champlain. De même, le tableau 9.5 donne les répercussions pour certaines années de crue notoire.

Avec ce scénario de l'USEPA, on a constaté que, dans les sous-bassins où le gain de milieux humides exprimé en pourcentage est élevé (surtout au Vermont), l'impact sur les débits maximums est nettement plus important que dans des sous-bassins où les gains en pourcentage sont plus faibles.

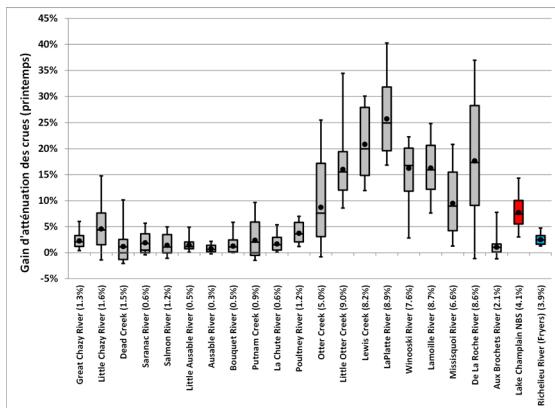
Tableau 9-4. Impact spatial du scénario relatif aux milieux humides à potentiel élevé de l'USEPA sur le bassin LCRR pour les 20 sous-bassins du LC, le débit des ANB du LC et le débit de la RR aux rapides Fryers.

#	BASSIN	DRAINAGE (km ²)	Milieux humides		c. bassin		MH drainé		c. bassin hydrographique	
			(km ²)	GAIN (km ²)*	(%)	GAIN (%)*	(km ²)	GAIN (km ²)	(%)	GAIN (%)
1	Great Chazy	778	117	10	15,1 %	1,3 %	380	10	48,8 %	1,2 %
2	Little Chazy	143	23	2	15,8 %	1,6 %	74	1	51,7 %	0,8 %
3	Dead Creek	114	29	2	25,5 %	1,5 %	63	0	55,6 %	0,3 %
4	Saranac	1 579	194	10	12,3 %	0,6 %	776	16	49,2 %	1,0 %
5	Salmon	177	17	2	9,5 %	1,2 %	91	0	51,2 %	0,2 %
6	Little Ausable	188	13	1	7,1 %	0,5 %	96	2	51,3 %	1,0 %
7	Ausable	1 329	81	5	6,1 %	0,3 %	505	5	38,0 %	0,4 %
8	Bouquet	621	41	3	6,6 %	0,5 %	262	6	42,2 %	1,0 %
9	Putnam Creek	158	13	1	8,4 %	0,9 %	84	3	53,2 %	1,8 %
10	La Chute	678	29	4	4,3 %	0,6 %	187	13	27,6 %	1,9 %
11	Poultney	1 778	142	22	8,0 %	1,2 %	807	32	45,4 %	1,8 %
12	Otter Creek	2 446	346	122	14,2 %	5,0 %	1 076	114	44,0 %	4,7 %
13	Little Otter Creek	153	32	14	20,8 %	9,0 %	88	9	57,6 %	5,7 %
14	Lewis Creek	203	32	17	16,0 %	8,2 %	96	15	47,2 %	7,5 %
15	LaPlatte	118	18	11	15,6 %	8,9 %	59	16	49,9 %	13,4 %
16	Winooski	2 756	287	208	10,4 %	7,6 %	1 030	371	37,4 %	13,5 %
17	Lamoille	1 866	257	163	13,8 %	8,7 %	862	154	46,2 %	8,3 %
18	Missisquoi	2 212	300	145	13,6 %	6,6 %	931	45	42,1 %	2,0 %
19	De La Roche	144	28	12	19,2 %	8,6 %	73	11	50,5 %	7,5 %
20	Aux Brochets	664	70	14	10,6 %	2,1 %	219	2	33,0 %	0,3 %
LC		21 254	2 416	865	11,4 %	4,1 %	8 655	906	40,7 %	4,3 %
RR (Fryers)		22 055	2 481	865	11,3 %	3,9 %	8 810	907	39,9 %	4,1 %

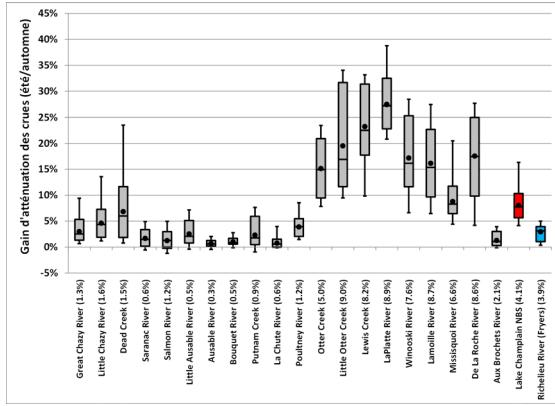
* Les gains réalisés signifient que la superficie du bassin en milieux humides (après ajout de milieux humides) passe — dans le cas du bassin de la rivière Grand Chazy, par exemple — à 15,1 % (dont 13,8 % occupés par des milieux humides) soit un gain de 1,3 % en milieux humides.



(a) (■ Min; ▨ Max; ▨ 10^e percentile; ▨ 90^e percentile; ■ Médiane; ▨ Moyenne)



(b) (■ Min; ▨ Max; ▨ 10^e percentile; ▨ 90^e percentile; ■ Médiane; ▨ Moyenne)



(c) (■ Min; ▨ Max; ▨ 10^e percentile; ▨ 90^e percentile; ■ Médiane; ▨ Moyenne)

Figure 9-6. Les gains d'atténuation des débits maximums du scénario relatif aux milieux humides à potentiel élevé de l'USEPA dans le bassin LCRR pour les 20 sous-bassins du LC, le débit des ANB du LC et le débit de la RR aux rapides Fryers se comparent aux conditions actuelles pour différents pas de temps : a) annuels, b) printaniers et c) estivaux/automnaux.

La figure 9.6 illustre la variation des impacts d'une année à l'autre dans chaque sous-bassin versant. Les gains d'atténuation annuels et printaniers sont semblables,

puisque le débit le plus élevé se produit la plupart du temps au printemps. La figure 9.6 montre que pour dix (10) sous-bassins hydrographiques (ceux des rivières Little Chazy, Dead Creek, Saranac, Salmon, Ausable, Putnam Creek, Otter Creek, De La Roche, Aux Brochets et La Chute) (principalement situés dans l'État de New York), les résultats annuels ou printaniers font état d'effets négatifs (augmentation des débits maximums) et que, pour six (6) sous-bassins (ceux des rivières Saranac, Salmon, Little Ausable, Putnam Creek, La Chute et Aux Brochets), ce sont les résultats pour la saison automnale qui font état d'impacts négatifs. Les impacts peuvent être négatifs quand le niveau d'eau initial des milieux humides et la temporalité des crues risquent de faire augmenter le débit maximum, mais les augmentations relatives des débits maximums sont faibles et limitées. De telles valeurs négatives suggèrent que pour certaines années, l'ajout de milieux humides pourraient aggraver les débits maximums, mais il est important de noter que tous les gains d'atténuation médians ou moyens sont positifs.

Le tableau 9.5 montre la variation des impacts maximums/minimums sur l'année, pour toute la période de modélisation, ainsi que la contribution évidente de l'ajout de milieux humides à potentiel élevé lors d'années de crue notoire (1973, 1983, 1984, 2011 et 2013). D'après les conditions météorologiques de 1950 à 2013, l'ajout d'un milieu humide à potentiel élevé pourrait également contribuer à réduire les débits de pointe. En effet, l'augmentation de la superficie des milieux humides qui représenteraient alors 7,3 % à 11,4 % de la superficie totale du bassin du LC réduit en moyenne de 8,1 % les débits de pointe quotidiens les plus élevés des ANB et de 2,6 % en moyenne le débit de pointe aux rapides Fryers de la rivière Richelieu par rapport aux conditions actuelles. De telles réductions sont également observées dans le cas des niveaux d'eau du lac Champlain et de la rivière Richelieu. Ces résultats démontrent que le scénario de l'EPA des États-Unis pourrait donner lieu à une atténuation efficace des crues, en particulier dans l'État du Vermont.

Tableau 9-5. Gains d'atténuation des débits maximums annuels du scénario de l'USEPA relatif aux milieux humides présentant le meilleur potentiel dans le bassin LCRR pour les 20 sous-bassins du LC, les ANB du LC, le débits de la RR aux rapides Fryers et les niveaux du LC et de la RR (à la marina de Saint-Jean-sur-Richelieu) comparativement aux conditions actuelles.

#	BASSIN (WT GAIN %)	MIN		MAX		ANNÉE DE CRUE					MOYENNE	MÉDIANE
		ANNÉE	ATTÉNUATION	ANNÉE	ATTÉNUATION	1973	1983	1984	2011	2013		
1	Great Chazy (1,3%)	1999	0,4 %	1996	9,4 %	2,5 %	0,7 %	3,3 %	6,0 %	5,3 %	2,3 %	2,1 %
2	Little Chazy (1,6%)	1978	-1,4 %	2013	14,8 %	5,9 %	4,8 %	4,8 %	7,4 %	14,8 %	4,9 %	4,7 %
3	Dead Creek (1,5%)	1967	-2,1 %	1965	13,5 %	0,0 %	1,5 %	0,1 %	0,1 %	1,5 %	1,4 %	1,3 %
4	Saranac (0,6%)	1958	-0,4 %	2003	5,7 %	2,1 %	2,9 %	2,4 %	0,9 %	4,5 %	2,1 %	1,9 %
5	Salmon (1,2%)	2009	-1,2 %	1961	5,0 %	1,5 %	0,2 %	0,7 %	4,0 %	2,2 %	1,4 %	1,0 %
6	Little Ausable (0,5%)	2003	-0,1 %	1965	5,3 %	1,0 %	0,6 %	1,1 %	2,2 %	2,1 %	1,5 %	1,2 %
7	Ausable (0,3%)	1994	0,0 %	1968	2,2 %	0,9 %	0,3 %	1,4 %	0,5 %	0,8 %	0,9 %	0,9 %
8	Bouquet (0,5%)	1997	0,0 %	1982	5,9 %	1,1 %	0,7 %	2,6 %	2,0 %	1,6 %	1,3 %	1,2 %
9	Putnam Creek (0,9%)	2005	-1,5 %	1991	9,7 %	7,1 %	1,5 %	3,8 %	6,6 %	0,7 %	2,3 %	1,6 %
10	La Chute (0,6%)	1995	-0,1 %	2010	5,4 %	0,6 %	1,0 %	0,8 %	3,4 %	0,1 %	1,7 %	1,5 %
11	Poultney (1,2%)	1966	1,2 %	2011	8,6 %	6,5 %	2,6 %	6,7 %	8,6 %	3,7 %	3,9 %	3,7 %
12	Otter Creek (5,0%)	1991	-0,8 %	1963	25,5 %	9,2 %	6,8 %	7,1 %	16,9 %	8,9 %	9,8 %	8,6 %
13	Little Otter Creek (9,0%)	1983	8,6 %	1965	23,6 %	15,1 %	8,6 %	13,7 %	18,4 %	12,1 %	15,7 %	15,6 %
14	Lewis Creek (8,2%)	1989	11,9 %	1954	28,7 %	21,9 %	14,8 %	17,0 %	18,7 %	23,9 %	21,0 %	21,6 %
15	LaPlatte (8,9%)	1972	18,8 %	1979	40,3 %	25,9 %	20,8 %	21,6 %	26,6 %	28,4 %	26,6 %	25,8 %
16	Winooski (7,6%)	1991	2,8 %	2011	25,4 %	17,3 %	10,4 %	20,4 %	25,4 %	13,6 %	16,4 %	16,8 %
17	Lamoille (8,7%)	1978	7,6 %	2010	25,8 %	24,9 %	13,8 %	18,2 %	20,4 %	21,1 %	17,1 %	17,0 %
18	Missisquoi (6,6%)	1985	1,3 %	2006	20,8 %	9,1 %	7,9 %	7,6 %	19,0 %	9,2 %	9,6 %	9,0 %
19	De La Roche (8,6%)	1994	1,3 %	1977	37,0 %	19,0 %	17,6 %	19,7 %	10,3 %	15,2 %	18,2 %	17,9 %
20	Aux Brochets (2,1%)	1953	-0,7 %	1982	7,8 %	1,1 %	1,4 %	0,4 %	1,6 %	1,1 %	1,1 %	1,0 %
ANB DES FACTEURS (4,1 %)		1955	4,4 %	2006	14,3 %	8,0 %	6,1 %	10,1 %	9,7 %	10,5 %	8,1 %	7,8 %
RR (Fryers) (3,9 %)		1966	1,3 %	2006	4,7 %	2,3 %	2,1 %	3,3 %	3,3 %	3,1 %	2,6 %	2,5 %
Niveau du LC (cm)		1985	2	1998	11	5	4	6	8	6	5	4
Niveau de la RR (cm)		1966	1	1998	8	3	3	4	6	4	3	3

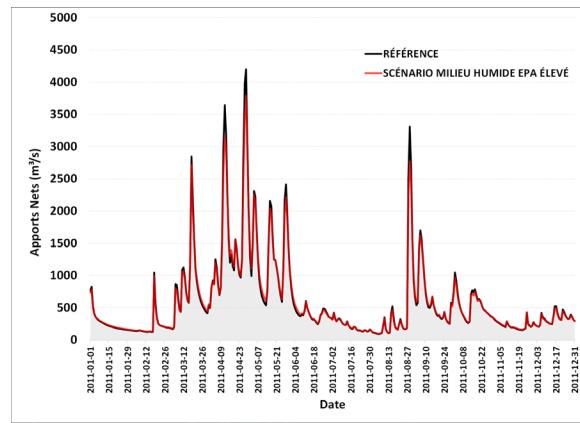
9.2.2 Effets du scénario de l'EPA relatif aux milieux humides sur la crue de 2011

Les hydrogrammes de 2011 ont été évalués à diverses échelles spatiales, selon une comparaison entre les résultats d'une simulation de l'impact des actuels milieux humides et le scénario de l'USEPA. Ici, les résultats sont présentés selon un pas de temps journalier pour les ANB simulés par HYDROTEL et pour les débits et niveaux d'eau du MBH journalier alimenté par les ANB susmentionnés. La figure 9.7 montre l'effet du scénario de l'USEPA relatif aux milieux humides présentant le meilleur potentiel dans le bassin LCRR sur : (a) le débit des ANB, (b) le niveau d'eau du LC, (c) le débit de la RR aux rapides Fryers et (d) le niveau de la RR (à la marina de Saint-Jean-sur-Richelieu), en regard des conditions de

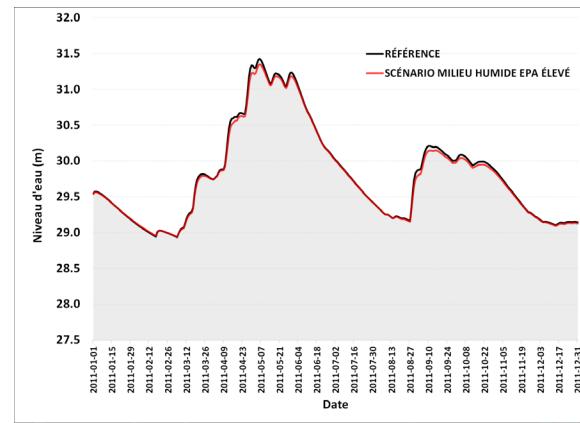
2011 en utilisant HYDROTEL et un MBH à un pas de temps journalier. Le tableau 9.6 résume le scénario de l'USEPA en regard des conditions de 2011.

Selon le scénario de l'USEPA, une augmentation du volume d'eau stockée par l'ajout de milieux humides pourrait réduire de 9,7 % le débit de pointe des ANB du lac Champlain, ce qui entraînerait une réduction du niveau d'eau du lac de 8 cm. Les avantages ne seraient pas les mêmes pour ce qui est du débit de la rivière Richelieu (-3,3 %), mais la réduction du niveau d'eau serait la même (-6 cm), ce qui n'est certainement pas négligeable. Ce scénario est donc pertinent pour le lac Champlain et pourrait avoir des effets bénéfiques, à l'échelle locale, sur divers tronçons de rivière situés dans l'État du Vermont.

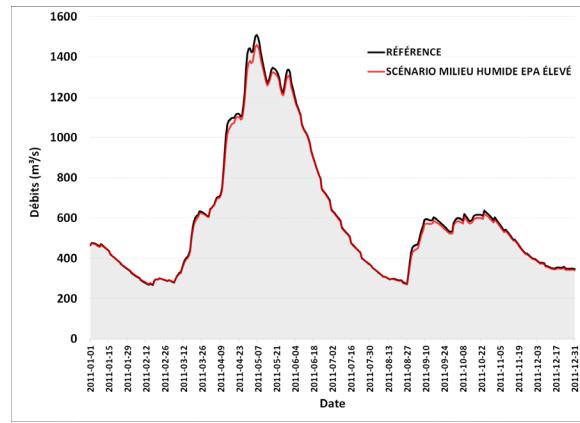
(a) Approvisionnement net du bassin du lac Champlain



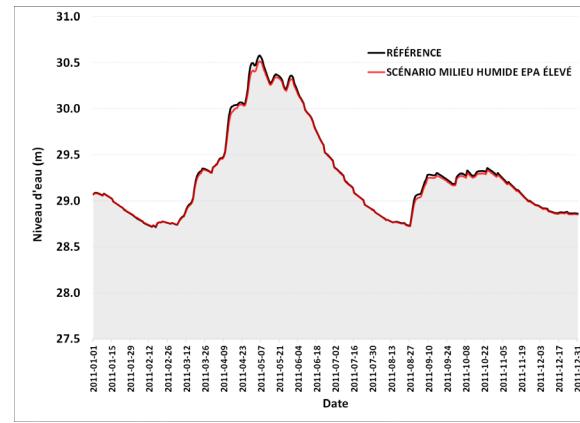
(b) Niveau d'eau du lac Champlain



(c) Débit de la rivière Richelieu



(d) Niveau d'eau de la rivière Richelieu



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

Figure 9-7. Effet du scénario de l'EPA relatif aux milieux humides présentant le meilleur potentiel dans le bassin LCRR, compte tenu des conditions de 2011, en utilisant HYDROTEL et un MBH selon un pas de temps journalier.

Tableau 9-6. Résumé des impacts des scénarios de l'USEPA relatifs aux milieux humides sur le débit des ANB, le niveau d'eau du LC, le débit de la RR aux rapides Fryers et le niveau de la RR (à la marina de Saint-Jean-sur-Richelieu), en regard des conditions de 2011.

Milieux humides	Bassin du lac Champlain	Rivière Richelieu (Fryers)
Superficie (km ²)	21 254	22 055
Superficie des milieux humides (km ²)	2 416 (1 551)	2 481 (1 616)
Aire de drainage des milieux humides (km ²)	8 655 (7 749)	8 810 (7 902)
HYDROTEL + MBH (pas de temps journalier)		
Diminution du pic le plus élevé (%)	-9,7 % (ANB)	-3,3 % (DÉBIT))
Diminution du niveau d'eau le plus élevé	-8 cm (-0,24 %)	-6 cm (-0,20 %)

() indique la superficie des milieux humides existantes ou la diminution du niveau d'eau relatif

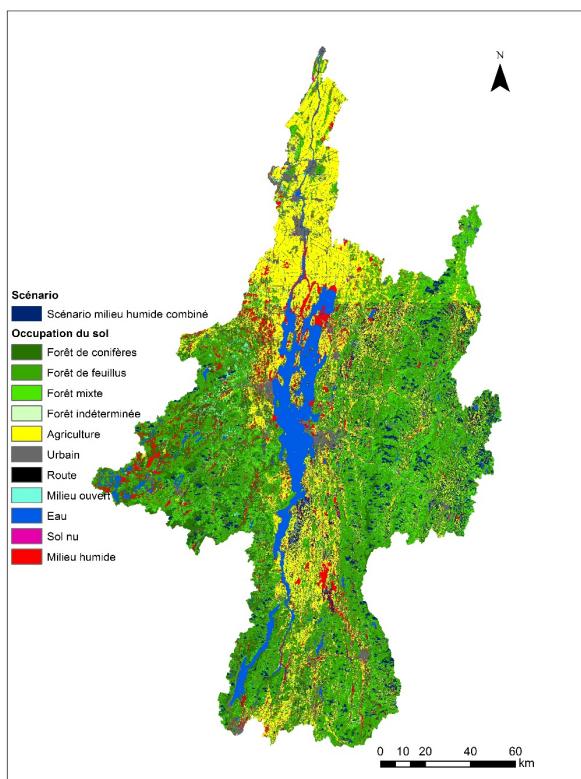


Figure 9-8. Illustration générale d'une combinaison de scénarios relatifs aux milieux humides.

9.3 COMBINAISON DES SCÉNARIOS RELATIFS AUX MILIEUX HUMIDES

Le dernier scénario, qui est en fait une combinaison du scénario basé sur le MNA et du scénario de l'USEPA, donne lieu à l'ajout possible de 1 493 km² de milieux humides dans le bassin du lac Champlain (voir la figure 9.8).

Le tableau 9.7 présente, pour chaque sous-bassin versant, la répartition résultante des milieux humides et des aires de drainage des milieux humides. La même approche a été utilisée pour évaluer les résultats des scénarios combinés.

La formule de calcul est toujours la même:

- Pour les débits maximums:

$$\frac{\text{Milieux humides existants} - \text{Scénario de milieux humides}}{\text{Milieux humides existants}}$$

où un résultat positif correspond à une atténuation.

- Pour les débits minimums:

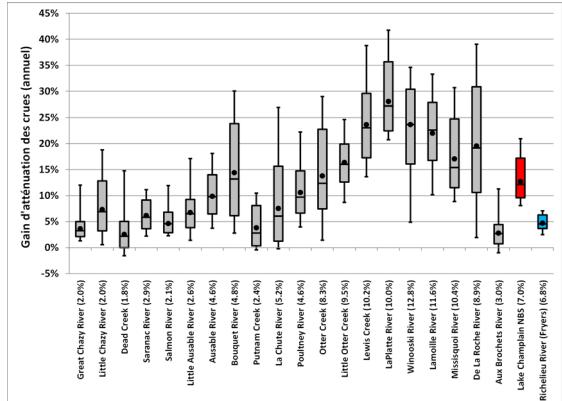
$$\frac{\text{Scénario de milieux humides} - \text{Milieux humides existants}}{\text{Milieux humides existants}}$$

où un résultat positif correspond à une amplification.

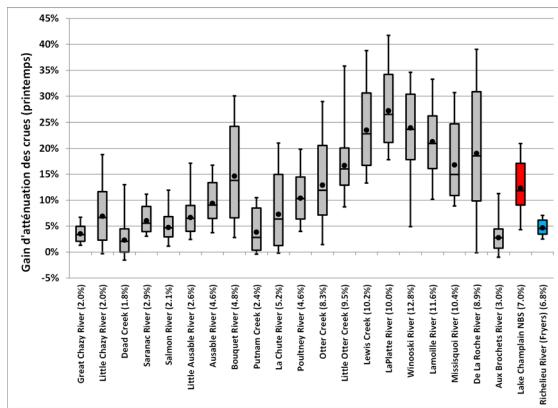
Tableau 9-7. Incidence spatiale d'une combinaison de scénarios relatifs aux milieux humides sur le bassin LCRR pour les 20 sous-bassins du LC, les ANB du LC et le débit de la RR aux rapides Fryers.

#	BASSIN	DRAINAGE (km ²)	Milieux humides		c. bassin		MH drainé		c. bassin	
			(km ²)	GAIN (km ²)*	(%)	GAIN (%)*	(km ²)	GAIN (km ²)	(%)	GAIN (%)
1	Great Chazy	778	123	15	15,7 %	2,0 %	384	14	49,4 %	1,8 %
2	Little Chazy	143	23	3	16,2 %	2,0 %	77	4	53,9 %	3,1 %
3	Dead Creek	114	29	2	25,8 %	1,8 %	65	2	56,8 %	1,5 %
4	Saranac	1 579	230	46	14,6 %	2,9 %	791	30	50,1 %	1,9 %
5	Salmon	177	18	4	10,4 %	2,1 %	95	5	53,7 %	2,7 %
6	Little Ausable	188	17	5	9,3 %	2,6 %	105	10	55,7 %	5,5 %
7	Ausable	1 329	137	61	10,3 %	4,6 %	562	62	42,3 %	4,7 %
8	Bouquet	621	68	30	10,9 %	4,8 %	290	35	46,7 %	5,6 %
9	Putnam Creek	158	16	4	9,8 %	2,4 %	86	4	54,2 %	2,8 %
10	La Chute	678	61	35	8,9 %	5,2 %	210	35	31,0 %	5,2 %
11	Poultney	1 778	203	82	11,4 %	4,6 %	865	91	48,7 %	5,1 %
12	Otter Creek	2 446	428	204	17,5 %	8,3 %	1 181	219	48,3 %	8,9 %
13	Little Otter Creek	153	33	15	21,3 %	9,5 %	88	9	57,7 %	5,8 %
14	Lewis Creek	203	37	21	18,0 %	10,2 %	100	19	49,2 %	9,6 %
15	LaPlatte	118	20	12	16,6 %	10,0 %	62	19	52,6 %	16,1 %
16	Winooski	2 756	431	352	15,6 %	12,8 %	1 169	511	42,4 %	18,5 %
17	Lamoille	1 866	310	216	16,6 %	11,6 %	916	209	49,1 %	11,2 %
18	Missisquoi	2 212	385	231	17,4 %	10,4 %	1 015	129	45,9 %	5,8 %
19	De La Roche	144	28	13	19,5 %	8,9 %	74	12	51,1 %	8,1 %
20	Aux Brochets	664	76	20	11,5 %	3,0 %	239	21	35,9 %	3,2 %
LC		21 254	3 039	1 488	14,3 %	7,0 %	9 296	1 548	43,7 %	7,3 %
RR (Fryers)		22 055	3 106	1 489	14,1 %	6,8 %	9 469	1 567	42,9 %	7,1 %

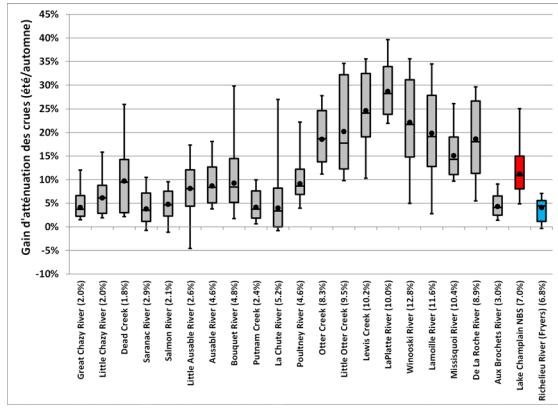
*Les gains réalisés signifient que la superficie du bassin en milieux humides (après ajout de milieux humides) passe — dans le cas du bassin de la rivière Grand Chazy, par exemple — à 15,7 % (dont 13,8 % occupés par des milieux humides), soit un gain de 2 % en milieux humides..



(a) (■Min; ▨Max; ▨10^e percentile; ▨90^e percentile; ━ Médiane; ● Moyenne)



(b) (■Min; ▨Max; ▨10^e percentile; ▨90^e percentile; ━ Médiane; ● Moyenne)



(c) (■Min; ▨Max; ▨10^e percentile; ▨90^e percentile; ━ Médiane; ● Moyenne)

Figure 9-9. Gains d'atténuation des débits maximums selon une combinaison des scénarios relatifs aux milieux humides dans le bassin LCRR pour les 20 sous-bassins du LC, les ANB du LC et le débit de la RR aux rapides Fryers, en regard des conditions actuelles et pour différents pas de temps : a) annuels, b) printaniers et c) estivaux/automnaux.

9.3.1 Effets sur les débits maximums

La figure 9.9 met en évidence l'impact (annuel, printanier, estival/automnal) des scénarios combinés sur l'atténuation des débits maximums. De même, les gains d'amplification des débits minimums sont présentés à l'annexe III (figure A3.5). Le tableau 9.8 résume l'effet annuel sur (i) l'atténuation du débit maximum pour les 20 principaux sous-bassins hydrographiques du LC, (ii) les ANB du LC, (iii) le débit de la RR aux rapides Fryers et (iv) les niveaux d'eau du LC et de la RR (à la marina de Saint-Jean-sur-Richelieu); les résultats pour des années de crue notoire sont également présentés.

Dans le cas des sous-bassins où le gain de superficie en milieux humides exprimé en pourcentage est élevé, on observe une incidence beaucoup plus marquée sur les débits maximums, comparativement aux sous-bassins où le gain en pourcentage est plus faible, ce qui est particulièrement vrai pour les sous-bassins du Vermont. La figure 9.9 illustre la variation des impacts d'une année à l'autre dans chaque sous-bassin versant. Les gains d'atténuation annuels et printaniers sont semblables, puisque le débit le plus élevé se produit la plupart du temps au printemps.

La figure 9.9 montre que pour quatre (4) sous-bassins (ceux des rivières Dead Creek, Putnam Creek, La Chute et Aux Brochets), les résultats annuels ou printaniers font état d'effets négatifs (augmentation des débits maximums). Par ailleurs, les effets peuvent aussi être négatifs en automne pour quatre (4) sous-bassins (ceux des rivières Saranac, Salmon, Little Ausable et La Chute). Il peut y avoir des répercussions négatives lorsque le niveau d'eau initial des milieux humides et la temporalité des crues peuvent augmenter le débit maximum, mais les augmentations relatives des débits maximums sont faibles et limitées.

De telles valeurs négatives donnent à penser que, pour certaines années, l'ajout de milieux humides pourraient aggraver les débits maximums, mais il est important de noter que tous les gains d'atténuation médians ou moyens sont positifs.

Le tableau 9.8 montre la variation des impacts maximums/minimums sur l'année, pour toute la période de modélisation, ainsi que la contribution évidente de l'ajout de milieux humides à potentiel élevé lors d'années de crue notoire (1973, 1983, 1984, 2011 et 2013). À partir des conditions météorologiques de 1950 à 2013, la combinaison des scénarios relatifs aux milieux humides permet de mettre en évidence d'autres réductions possibles des débits de pointe. En effet, comparativement à la répartition actuelle des milieux humides, l'augmentation de la superficie des milieux

humides de 7,3 % à 14,3 % de la superficie totale du bassin du LC pourrait donner lieu à une diminution moyenne de 12,7 % du débit de pointe le plus élevé des ANB, selon un pas de temps journalier; et le débit de pointe aux rapides Fryers sur la rivière Richelieu (RR) pourrait baisser de 4,7 % en moyenne.

De telles réductions sont également observées du côté des niveaux d'eau du lac Champlain et de la rivière Richelieu (en moyenne, 8 cm de moins pour le LC et 6 cm pour la RR à la marina de Saint-Jean-sur-Richelieu). Du point de vue de la modélisation hydrologique pure, l'ajout de milieux humides basé sur une combinaison des scénarios de stockage massif d'eau pourrait contribuer considérablement à l'atténuation des crues et constituer une solution efficace en termes de stockage passif de l'eau.



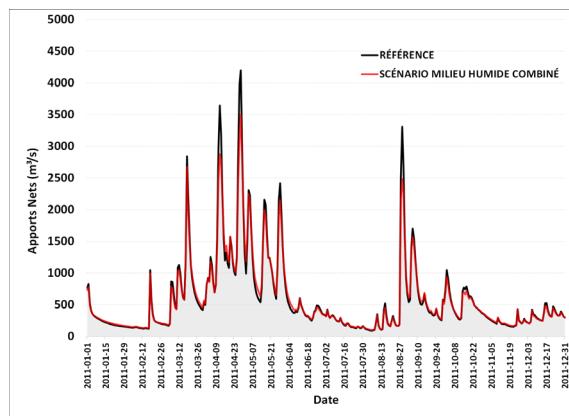
Tableau 9-8. Gains d'atténuation des débits maximums selon une combinaison des scénarios relatifs aux milieux humides dans le bassin LCRR pour les 20 sous-bassins du LC, les ANB du LC et le débit de la RR aux rapides Fryers, ainsi que les niveaux du LC et de la RR (à la marina de Saint-Jean-sur-Richelieu), en regard des conditions actuelles.

#	BASSIN (WT GAIN %)	MIN		MAX		ANNÉE DE CRUE					MOYENNE	MÉDIANE
		ANNÉE	ATTÉNUATION	ANNÉE	ATTÉNUATION	1973	1983	1984	2011	2013		
1	Great Chazy (2,0%)	1961	1,3 %	1996	12,0 %	3,8 %	1,8 %	4,9 %	4,7 %	6,7 %	3,6 %	3,3 %
2	Little Chazy (2,0%)	1967	0,6 %	2001	18,8 %	8,1 %	6,4 %	6,7 %	13,4 %	15,3 %	7,3 %	6,9 %
3	Dead Creek (1,8%)	1969	-1,5 %	1965	14,8 %	0,4 %	2,5 %	1,0 %	2,4 %	2,2 %	2,6 %	2,2 %
4	Saranac (2,9%)	1965	2,2 %	2006	11,2 %	5,5 %	4,8 %	5,3 %	3,5 %	8,6 %	6,2 %	5,8 %
5	Salmon (2,1%)	2007	2,3 %	1998	11,9 %	4,7 %	2,7 %	4,7 %	5,9 %	7,0 %	4,7 %	4,6 %
6	Little Ausable (2,6%)	2003	1,4 %	1998	17,1 %	4,6 %	3,7 %	6,5 %	7,6 %	5,0 %	6,7 %	6,5 %
7	Ausable (4,6%)	1965	3,7 %	1996	18,1 %	10,8 %	5,8 %	11,7 %	13,0 %	7,2 %	9,9 %	9,8 %
8	Bouquet (4,8%)	1959	2,8 %	2001	30,0 %	15,4 %	14,8 %	17,9 %	15,7 %	6,6 %	14,4 %	13,2 %
9	Putnam Creek (2,4%)	1975	-0,4 %	1969	10,5 %	8,6 %	2,5 %	6,5 %	6,7 %	2,5 %	3,8 %	2,8 %
10	La Chute (5,2%)	1964	-0,2 %	1957	27,0 %	3,5 %	2,6 %	1,7 %	19,7 %	0,1 %	7,5 %	6,1 %
11	Poultney (4,6%)	1966	4,0 %	2011	22,2 %	11,7 %	8,2 %	15,6 %	22,2 %	8,3 %	10,6 %	9,7 %
12	Otter Creek (8,3%)	1991	1,4 %	1963	29,0 %	13,0 %	9,0 %	11,9 %	21,2 %	10,6 %	13,8 %	12,4 %
13	Little Otter Creek (9,5%)	1983	8,7 %	1965	24,6 %	15,7 %	8,7 %	14,3 %	19,6 %	12,8 %	16,4 %	16,0 %
14	Lewis Creek (10,2%)	1967	13,6 %	1998	38,8 %	22,7 %	15,9 %	19,1 %	35,6 %	26,1 %	23,6 %	23,0 %
15	LaPlatte (10,0%)	1972	20,7 %	1979	41,7 %	27,5 %	22,0 %	22,5 %	35,9 %	30,1 %	28,1 %	27,2 %
16	Winooski (12,8%)	1991	4,9 %	2001	34,6 %	25,0 %	13,0 %	26,2 %	30,3 %	18,3 %	23,7 %	23,7 %
17	Lamoille (11,6%)	1978	10,2 %	2011	33,3 %	28,6 %	16,7 %	21,2 %	33,3 %	25,9 %	22,0 %	22,6 %
18	Missisquoi (10,4%)	1951	8,9 %	1992	30,7 %	13,6 %	12,6 %	14,2 %	25,6 %	17,0 %	17,1 %	15,4 %
19	De La Roche (8,9%)	1994	1,9 %	2011	39,0 %	21,9 %	18,5 %	20,7 %	39,0 %	15,9 %	19,5 %	19,2 %
20	Aux Brochets (3,0%)	1959	-1,0 %	1982	11,3 %	2,3 %	3,0 %	1,9 %	1,7 %	3,8 %	2,8 %	2,7 %
ANB DU LC (7,0 %)		1954	8,1 %	2006	20,9 %	12,2 %	9,1 %	14,7 %	16,7 %	15,5 %	12,7 %	12,2 %
RR (Fryers) (6,8 %)		1966	2,5 %	2006	7,1 %	4,3 %	3,7 %	5,0 %	5,4 %	4,5 %	4,7 %	4,5 %
Niveau du LC (cm)		2004	3	1998	19	10	7	9	12	8	8	8
Niveau de la RR (cm)		1966	2	1998	11	6	5	6	10	6	6	6

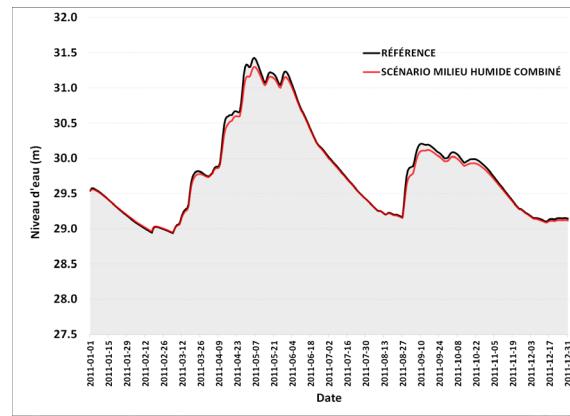
9.3.2 Effets de la combinaison des scénarios relatifs aux milieux humides sur les crues de 2011

Les hydrogrammes de 2011 ont été évalués afin de comparer les effets de la répartition actuelle des milieux humides avec ceux d'une combinaison de scénarios relatifs aux milieux humides au moyen de l'approche méthodologique susmentionnée. Celle-ci a consisté à appliquer un MBH journalier alimenté par les ANB du LC simulés selon un pas de temps journalier par HYDROTEL. La figure 9.10 montre les effets d'une combinaison de scénarios relatifs aux milieux humides dans le cas : (a) du débit des ANB du bassin LCRR, (b) des niveaux d'eau du LC, (c) du débit de la RR aux rapides Fryers et (d) des niveaux de la RR à la marina de Saint-Jean-sur-Richelieu, en regard des conditions de

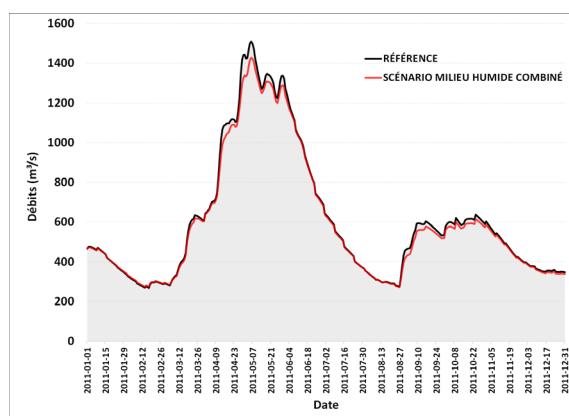
(a) Approvisionnement net du bassin du lac Champlain



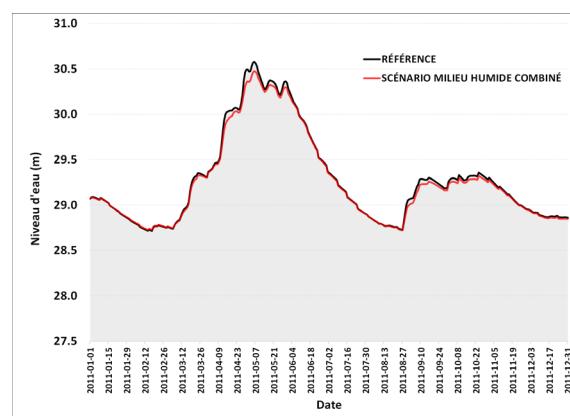
(b) Niveau d'eau du lac Champlain



(c) Débit de la rivière Richelieu



(d) Niveau d'eau de la rivière Richelieu



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

Figure 9-10. Effets d'une combinaison de scénarios relatifs aux milieux humides sur le bassin LCRR en regard des conditions de 2011 en utilisant HYDROTEL et MBH à un pas de temps journalier.

2011. Le tableau 9.9 résume les effets des scénarios combinés.

Si les scénarios relatifs aux milieux humides présentés dans la présente section avaient été combinés, le débit de pointe des ANB du lac Champlain aurait été réduit de 16,7 % et le niveau du lac Champlain aurait diminué de 12 cm. Les répercussions positives sur le débit de la rivière Richelieu n'auraient pas été aussi importantes (5,4 %), mais la réduction du niveau d'eau aurait été semblable (10 cm). Ainsi, mesuré sur un pas de temps journalier, le stockage massif d'eau dans des milieux humides aurait pu apporter un soulagement important en 2011. Il est important de noter qu'un tel scénario repose sur l'ajout d'une superficie de stockage considérable, au point qu'il serait difficile de le mettre en œuvre.

Tableau 9-9. Résumé des impacts découlant d'une combinaison de scénarios relatifs aux milieux humides sur : le débit des ANB, le niveau d'eau du LC, le débit de la RR aux rapides Fryers et le niveau de la RR (à la marina de Saint-Jean-sur-Richelieu), en regard des conditions de 2011.

Milieux humides	Bassin du lac Champlain	Rivière Richelieu (Fryers)
Superficie (km ²)	21 254	22 055
Superficie des milieux humides (km ²)	3 039 (1 551)	3 106 (1 616)
Aire de drainage des milieux humides (km ²)	9 296 (7 749)	9 469 (7 902)
HYDROTEL + MBH (pas de temps journalier)		
Diminution du pic le plus élevé (%)	-16,7 % (ANB)	-5,4 % (DÉBIT)
Diminution du niveau d'eau le plus élevé	-12 cm (-0,39 %)	-10 cm (-0,33 %)

() indique la superficie des milieux humides existantes ou la diminution du niveau d'eau relatif



10 OUTIL DE CARTOGRAPHIE DU STOCKAGE DE L'EAL

La conception manuelle d'un scénario spécifique censé représenter le stockage de l'eau sur des terres agricoles ou d'autres paysages peut s'avérer une tâche colossale et exiger énormément de temps, ce qui aurait été au-delà de la portée de cette étude. Une approche novatrice et alternative a été élaborée dans le cadre de ce projet en vue d'évaluer et de cartographier les capacités de stockage d'eau sur des terres appropriées, à partir des données spatiales pertinentes et selon des objectifs potentiels différents. Un outil de SIG a été spécifiquement élaboré pour ce projet qui a été intégré à PHYSITEL afin de produire des cartes de stockage d'eau.

10.1 OUTIL DE CALCUL DE STOCKAGE DES EAUL

Pour le décrire globalement, nous dirons que l'outil de calcul de stockage des eaux est en fait un algorithme qui permet de faire varier graduellement le volume d'eau stockée sur des terres données afin d'atteindre des cibles ou des objectifs précis dans diverses conditions ou limites, cela au moyen d'une interface-utilisateur graphique (GUI) (voir la figure 10.1). (Pour le moment, l'interface-utilisateur graphique n'existe qu'en français.) Les sections suivantes décrivent les différents aspects de l'outil.

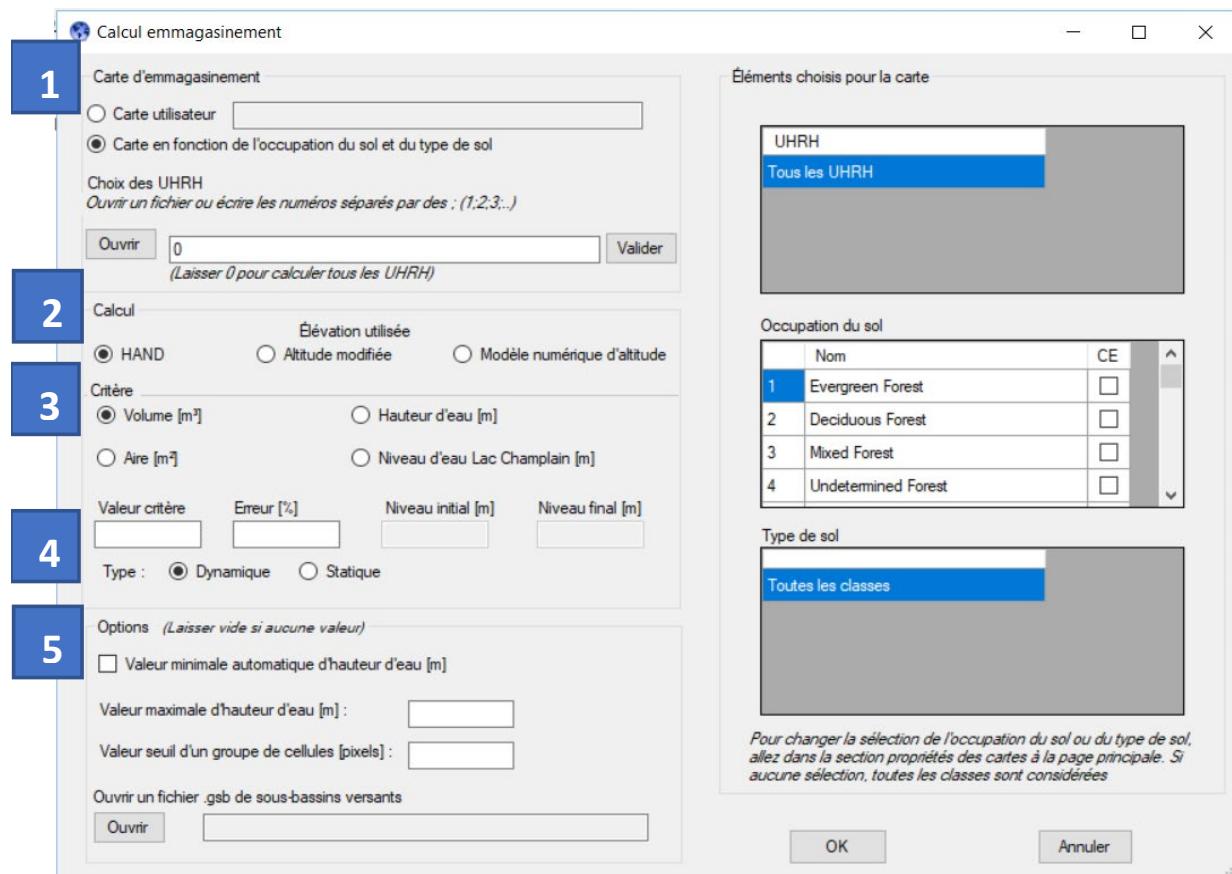


Figure 10-1. Saisie d'écran de l'interface-utilisateur graphique de l'outil de calcul de stockage des eaux .

10.1.1 Cartographie du stockage potentiel de l'eau

La première section de l'outil, intitulée Carte d'emmagasinement (voir la figure 10.1), sert à délimiter les emplacements souhaitables pour le stockage de l'eau. Deux options sont proposées, soit l'utilisation d'une carte dite « utilisateur » ou l'élaboration d'une carte en fonction de l'occupation du sol et du type de sol. La carte fournie par l'utilisateur est convertie en carte indiquant des secteurs de stockage prédéfinis. Seules les cellules sélectionnées sur la carte peuvent stocker de l'eau et, par conséquent, seules ces cellules sont prises en compte pour le calcul de l'emmagasinement.

Pour l'autre option, les cartes par défaut d'occupation du sol et de type de sol sont utilisées pour sélectionner l'occupation du sol et le type de sol où il est souhaitable de stocker l'eau. Pour cette option particulière, l'utilisateur doit intervenir dans la section propriétés des cartes d'occupation du sol et de type de sol du projet PHYSITEL, puis vérifier les classes d'occupation et de type de sol à prendre en compte dans le calcul. Enfin, la dernière étape facultative de la création de la carte d'emmagasinement initiale consiste à sélectionner des UHHR où l'eau peut être stockée. Un croisement de tous les intrants permet de déterminer dans quelles cellules l'eau pourra être stockée et ainsi de dresser une carte des emplacements potentiels d'emmagasinement, comme le montre la figure 10.2.

10.1.2 Référence spatiale pour le calcul

La section suivante de l'interface, intitulée Calcul (voir la figure 10.1) porte sur la sélection de la carte du système de référence. Cette référence représente la carte altimétrique à utiliser pour l'accumulation d'eau; elle est à la base du calcul du stockage, puisque la valeur de l'élévation verticale de chaque cellule doit être connue pour obtenir la topographie. Plus une cellule est basse (en termes d'altitude), plus il est probable qu'elle stocke de l'eau. Il existe trois cartes altimétriques différentes pouvant être utilisées pour le stockage de l'eau, soit la carte HAND, la carte d'altitude modifiée et la carte du modèle numérique d'altitude (MNA).

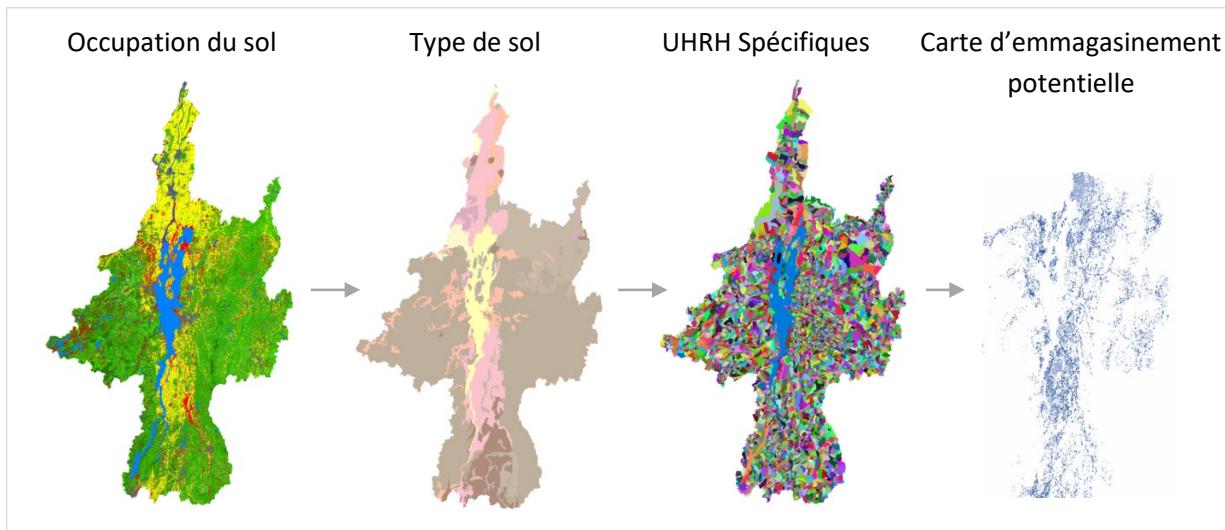


Figure 10-2. Étapes de base pour créer une carte des emplacements potentiels de stockage des eaux (capture d'écran PHYSITEL).

La carte HAND (hauteur au-dessus du modèle de réseau de drainage le plus proche) (voir la figure 10.3) est un modèle conceptuel qui permet de normaliser la topographie en fonction des hauteurs locales relatives, à l'altitude du réseau hydrographique (Nobre, Cuartas, Hodnett, et al., 2011; Nobre, Cuartas, Momo, et al., 2016). La valeur obtenue correspond alors au seuil où le niveau d'eau dans le réseau cause une inondation (Zheng et al., 2018). La valeur HAND peut être considérée comme une évaluation relative de l'endroit où l'eau s'accumulerait naturellement, soit à l'addition de petites valeurs HAND. Cette méthode est utile pour calculer une carte de stockage dynamique, puisqu'elle intègre la notion de débit d'eau d'une cellule à l'autre. Dans le cas du MNA de -30 m de la Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), la précision relative de la hauteur verticale est inférieure à 10 m. Il convient de noter que l'utilisation du modèle conceptuel HAND ne serait pas modifiée par la précision verticale du MNA, car ce modèle fournit des renseignements relatifs.

10.1.3 Cible de stockage d'eau

Afin de pouvoir élaborer la carte de stockage d'eau, le programme doit connaître la quantité d'eau à stocker ou le paramètre ciblé pour le calcul du stockage (3e section intitulée Critère) (voir la figure 10.1). L'outil propose quatre (4) options pour parvenir à établir la cible, soit le volume exprimé en mètres cubes, la superficie exprimée en mètres carrés, le niveau d'eau exprimé en mètres et la réduction de niveau du lac Champlain (propre au bassin versant LCRR). Cette section renvoie aux critères de calcul de l'interface-utilisateur graphique (GUI) : volume, superficie, hauteur d'eau et niveau du lac Champlain, comme l'indique la figure 10.4.

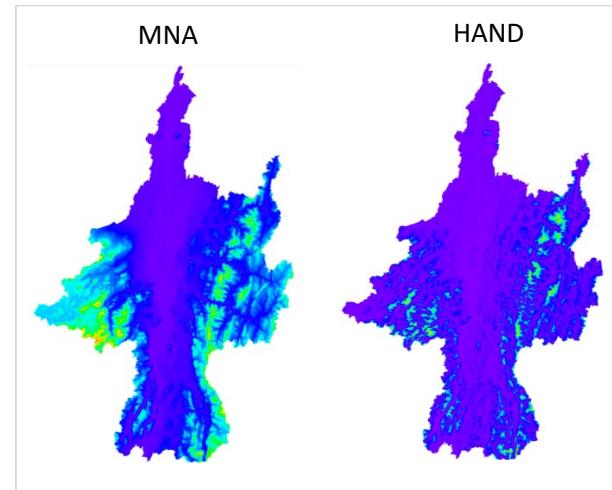


Figure 10-3. Carte altimétrique de référence (écran d'impression PHYSITEL).

L'une des options de l'outil de cartographie consiste à préciser un volume maximum ou une aire de stockage. Une fois la valeur cible atteinte, l'algorithme d'accumulation laisse la place à l'élaboration de la carte de stockage finale. Pour ces deux cibles, l'utilisateur doit spécifier une valeur pour le volume ou pour l'aire et indiquer l'erreur tolérée en pourcentage. Le critère de hauteur d'eau correspond à un seuil d'une cellule de la carte de stockage.

Enfin, la possibilité d'abaisser le niveau d'eau du lac Champlain est propre à ce projet. L'algorithme calcule le volume total d'eau à stocker pour produire une diminution du niveau d'eau du lac Champlain, conformément à une courbe de tarage du volume stocké-niveau d'eau (voir la figure 10.5 ci-dessous). Cette option particulière doit être limitée aux UHRH situées en amont du lac Champlain.



Figure 10-4. Critères de calcul dans l'outil de cartographie des aires de stockage de l'eau.

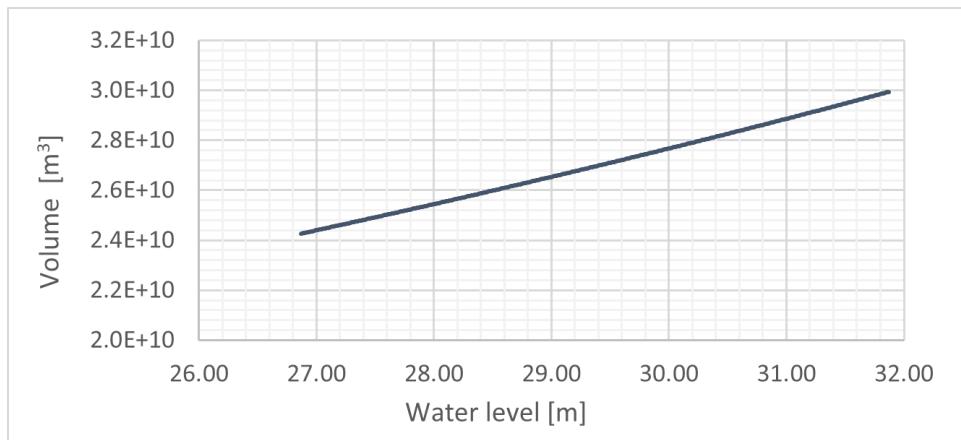


Figure 10-5. Relation entre niveau et volume d'eau dans le lac Champlain - anglais seulement.

10.1.4 Types de stockage : dynamique et statique

Le type de stockage, statique ou dynamique, doit également être précisé (4e rangée de la section Critère), (voir figure 10.1). Statique signifie qu'il n'y a pas d'écoulement ou de mouvement d'eau sur la surface inondée; en d'autres mots l'eau s'accumule verticalement sur la base d'un MNA ou d'une carte HAND. D'autre part, la dynamique vise à inclure la notion d'écoulement et de déplacement de l'eau dans les zones de stockage. L'approche statique avec utilisation de la carte HAND comme référence peut représenter le débordement d'eau du réseau fluvial sur les terres adjacentes (c.-à-d., la zone occupée par la plaine inondable). Les différences entre ces types de stockage sont présentées à la figure 10.6.

L'un des avantages de l'outil de cartographie basé sur les valeurs HAND tient à la nature dynamique du stockage de l'eau. L'eau stockée dans chaque cellule correspond à des altitudes (élévations) différentes et non uniformes. Le stockage se fait par ajout de volumes d'eau selon la valeur MNA minimale d'une URRH, jusqu'à une valeur maximale. Par conséquent, chaque URRH est indépendant des autres et leurs valeurs d'élévation minimales respectives sont prises en compte lors de l'exécution de l'algorithme. Cela permet de diviser le territoire en différents sous-bassins. Cela est particulièrement utile lorsque la carte de stockage couvre un vaste secteur et qu'il ne devrait pas y avoir de dépendance entre deux URRH qui sont éloignées l'une de l'autre..

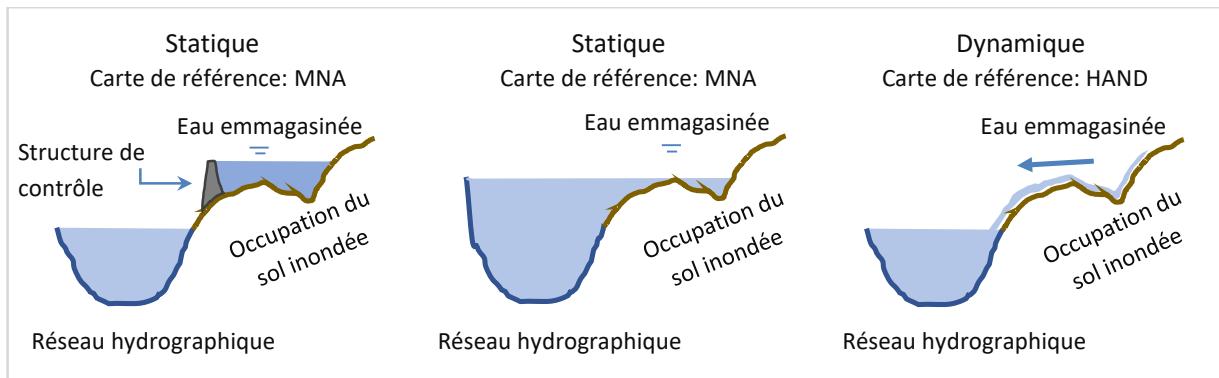


Figure 10-6. Accumulation d'eau dans l'aire de stockage.

10.1.5 Options de stockage de l'eau

Differentes options peuvent être ajoutées aux paramètres d'entrée, ce qui permet à l'utilisateur de spécifier certaines caractéristiques ou limites (4e section intitulée Options) (voir Figure 10.1). L'option de valeur minimale automatique d'hauteur d'eau est utilisée pour trouver la hauteur minimale à atteindre (c.-à-d. la valeur cible de volume ou de surface spécifiée par l'utilisateur). Une autre option consiste à définir une valeur maximale d'hauteur d'eau à stocker dans les cellules d'occupation du sol. Le volume total et la surface doivent être atteints tout en respectant la valeur maximale. Autrement, il pourrait arriver que la hauteur maximale de l'eau ne soit pas suffisante pour correspondre au volume ou à la superficie visées.

Enfin, une valeur de seuil en pixel peut être spécifiée pour filtrer les résultats et limiter l'inondation à des emplacements spécifiques. Cette option permet de stocker de l'eau dans une cellule si le nombre de cellules adjacentes disponibles pour le stockage d'eau est supérieur à la valeur seuil spécifiée par l'utilisateur. Il s'agit ici de déterminer quelles cellules inondées sont regroupées et d'éliminer les cellules isolées.

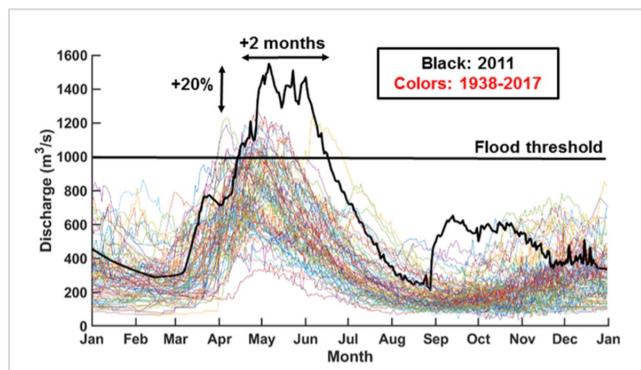
10.2 ANALYSE DU BASSIN DU LAC CHAMPLAIN ET DE LA RIVIÈRE RICHELIEU (LCRR)

Cette section, qui présente une analyse de la capacité de stockage des terres agricoles du bassin LCRR, est fondée sur l'épisode de crue extrême de 2011. L'objectif est de visualiser le stockage possible dans le bassin. La figure 10.7 illustre les débits (exprimés en m^3/s) relevés à la station hydrométrique des Rapides Fryers entre 1938 et 2017, la courbe en noir représentant l'année 2011. La ligne horizontale noire représente le débit (seuil) au-dessus duquel il y a inondation.

Il l'intégration de la zone sous la courbe de 2011 au-dessus de la valeur seuil susmentionnée correspond à environ $1612 \times 10^9 m^3$ d'eau. De même, nous pouvons déterminer le volume moyen des crues pour toutes les autres années. Pour cette période, le volume interannuel

moyen de $7205 \times 10^8 m^3$ se situe au-dessus de la ligne de crue, ce qui représente environ 45 % du volume de 2011 au-dessus de la ligne. La différence entre ces deux volumes donne $8915 \times 10^8 m^3$. Le fait de stocker ce volume précis et de le relâcher plus tard, quand il y a de la marge entre le débit réel et le débit de crue de la rivière, permettrait de transformer la crue de 2011 en une crue d'années moyenne. L'outil de cartographie du stockage a été utilisé pour le bassin LCRR, afin de comparer les zones nécessaires au stockage d'un tel volume. Pour cet exercice, le stockage de l'eau doit être autorisé sur les terres agricoles de tous types de sol. L'outil donne plus de souplesse, puisqu'il a été conçu pour limiter le stockage de l'eau en fonction de l'utilisation des terres et du type de sol. Toutefois, dans cette étude, nous avons seulement agi sur l'option de sélection d'occupation des sols. De plus, pour obtenir une diminution du niveau d'eau du lac Champlain, seules les UHRH qui se déversent dans le lac ont été présélectionnées. Enfin, pour filtrer la carte, un seuil de 1 000 pixels a été appliqué sur la carte de stockage et une erreur de 0,5 % a été définie pour le calcul.

Quatre analyses différentes ont été effectuées suivant des intrants différents. Ces analyses sont présentées au tableau 10.1. L'analyse 1 évalue le stockage nécessaire en fonction du volume de crue de 2011, tandis que les analyses 2 à 4 sont appliquées aux volumes de crue moyens dans le LCRR.



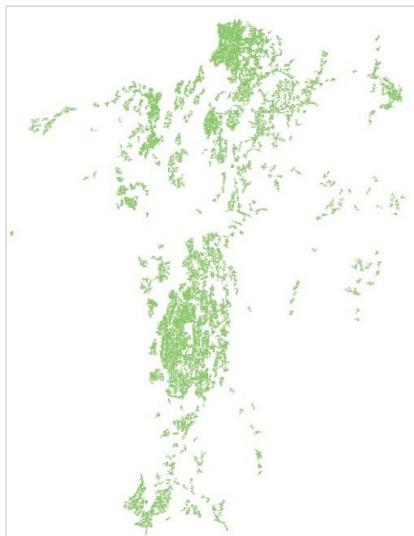
Chaque année est représentée par une couleur différente, tandis que 2011 est en noir. (Figure taken without the permission of the publisher from Lucas-Picher et al., 2019, anglais seulement)

Figure 10-7. Débits quotidiens de la RR à la station hydrométrique des rapides Fryers pour la période 1938-2017.

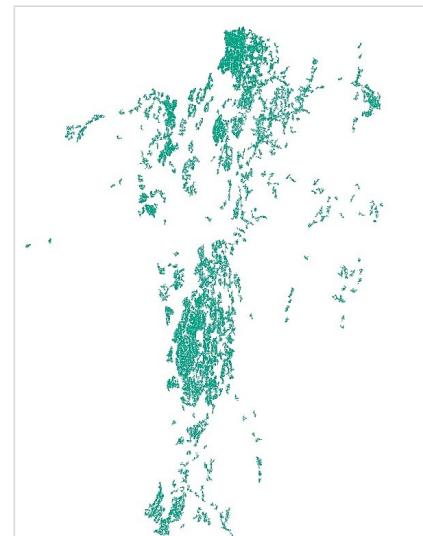
Tableau 10-1. Données d'entrée du bassin LCRR et résultats pour la création de cartes de stockage d'eau.

Analyse	1	2	3	4
Volume [10^8m^3]	16,12	8,915	8,915	8,915
Erreur de seuil [%]	0,5	0,5	0,5	0,5
Type de stockage	Dynamique	Dynamique	Dynamique	Statique
Option	Établissement automatique de la hauteur d'eau minimale	Établissement automatique de la hauteur d'eau minimale	Valeur de la hauteur d'eau maximale	-
Hauteur de l'eau [m]	0,765 Hauteur d'eau uniforme	0,423 Hauteur d'eau uniforme	1 m maximum Hauteur d'eau variable	7,58 m maximum Hauteur de l'eau variable

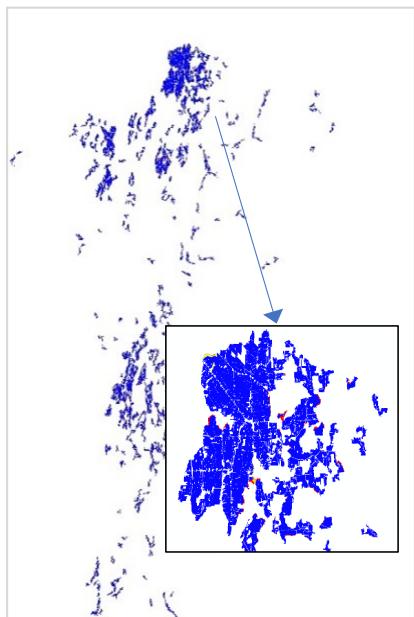
(1) 0,765 m Hauteur d'eau uniforme, dynamique



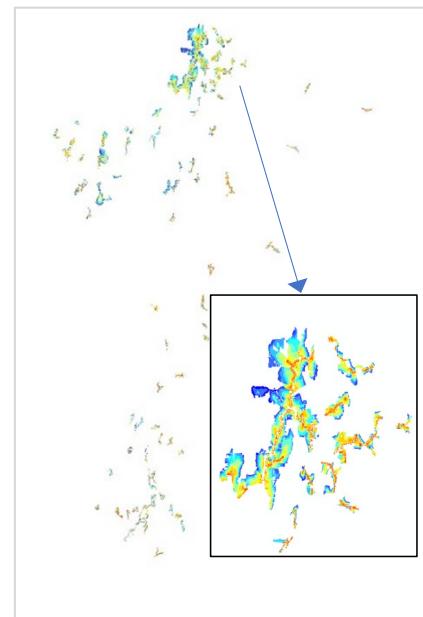
(2) 0,423 m Hauteur d'eau uniforme, dynamique



(3) 1 m maximum, Hauteur d'eau variable, dynamique



(4) 7,58 m maximum, Hauteur d'eau variable, statique



Les encarts sont des agrandissements des zones indiquées pour mieux illustrer la variation de la hauteur d'eau.

Figure 10-8. Cartes de stockage d'eau selon quatre conditions modélisées.

Les cartes de stockage résultant des quatre tests sont illustrées à la figure 10.8. Les deux dernières (3 et 4) comportent des encadrés donnant les détails des cellules.

Dans le cas de la première analyse, l'augmentation minimal de hauteur d'eau nécessaire pour stocker le volume visé de $1\,612 \times 10^9 \text{ m}^3$ correspond à 0,765 m. Cette profondeur d'eau a été appliquée à toutes les cellules constituant la carte de stockage potentiel initiale. Cette valeur signifie qu'une profondeur d'eau inférieure à 0,765 m ne suffirait pas pour le volume à stocker. Le stockage correspond à une superficie de $2\,108 \text{ km}^2$, soit à peu près $46 \text{ km} \times 46 \text{ km}$. Compte tenu de la hauteur considérable d'eau dans chaque cellule de la carte, il est évident que ce volume ne peut pas être entièrement stocké.

Pour la deuxième analyse, la valeur minimale d'hauteur d'eau était de 0,423 m. Cette valeur était répartie également sur la carte de stockage potentiel initiale. La superficie de $2\,108 \text{ km}^2$ est demeurée inchangée. D'après les options choisies (réduction du volume à stocker de 45 %), la profondeur d'eau des cellules a également diminué de 45 %. Il faudrait donc 0,423 m d'eau sur toute la carte de stockage pour ramener les crues de 2011 à des crues de la valeur moyenne des autres années.

La troisième analyse exigeait une profondeur maximale d'eau de 1 m pour un stockage dynamique. Le volume final correspond à $8\,888 \times 10^8 \text{ m}^3$, selon une marge d'erreur de 0,3 % et pour une superficie de 902 km^2 . La plupart des cellules stockent 1 m d'eau et certaines, situées en périphérie des zones agricoles, se prêtent à une profondeur d'eau inférieure à 1 m. Cette uniformité est causée par le plan hypsométrique. Pour se faire une bonne idée de ces zones, voir l'encadré de gauche de la figure 10.8 qui correspond à un agrandissement d'une partie de la carte de stockage. Les couleurs autres que bleue représentent des profondeurs inférieures à 1 m.

Enfin, dans la quatrième analyse (stockage statique), de l'eau a été ajoutée pour combler les dépressions de la carte altimétrique. Cela s'est traduit par les plus grands changements en termes d'élévation de l'eau sur les berges existantes des rivières et des lacs qui correspondent aux zones les plus basses. La profondeur d'eau a diminué à mesure que le paysage environnant était inondé. La couleur rouge de la figure 10.8 représente le plus important changement de profondeur d'eau (sur les berges existantes). Cette carte a permis de stocker au final un volume de $8\,918 \times 10^8 \text{ m}^3$ pour une erreur de 0,03 %. La superficie inondée est de 239 km^2 , ce qui équivaut à un carré de 15,5 km de côté. La profondeur maximale de l'eau est de 7,58 m, la moyenne est de 3,7 m et l'écart-type est de 2,1 m.

Le stockage de l'eau sur les terres agricoles du bassin LCRR pourrait réduire les crues dans l'avenir. Selon les analyses effectuées, la hauteur d'eau dans les cellules varierait entre 0,423 et 7,58 m, ce qui est suffisant. Si l'on est limité par une faible hauteur d'eau, la superficie requise pour stocker le volume correspondant à la crue de 2011 est alors très importante, et de petites superficies de stockage nécessiteraient une grande capacité de rétention d'une hauteur d'eau importante. Par conséquent, d'autres couvertures terrestres devraient être considérées comme aires potentielles de stockage de l'eau. Cela augmenterait le nombre de cellules admissibles et diminuerait les niveaux d'eau et la superficie requise.

Globalement, l'outil de cartographie du stockage de l'eau peut fournir une approche efficace et efficiente permettant de parvenir rapidement à une première approximation à grande échelle du stockage de l'eau ou même pour cartographier les zones d'inondation potentielles afin de répondre aux demandes locales ou de définir où concentrer les efforts d'atténuation des crues.

11 PRINCIPALES OBSERVATIONS ET CONCLUSIONS

Cette étude permet de dégager certains éléments déterminants. La plateforme de modélisation hydrologique PHYSITEL/HYDROTEL est certainement utile pour évaluer la régularisation du débit par les milieux humides. L'utilisation combinée du MBH journalier d'HYDROTEL et d'ECCC se pose en cadre efficace pour modéliser le débit de la rivière Richelieu à la station de jaugeage des rapides Fryers et les niveaux d'eau du lac Champlain et de la rivière Richelieu à la marina de Saint-Jean-sur-Richelieu. Le cadre de modélisation convient à l'évaluation de divers scénarios de stockage de l'eau. Il faut noter ici que l'intégration du bassin LCRR dans PHYSITEL et HYDROTEL est facilement accessible pour les utilisateurs potentiels, moyennant une formation de base et une licence logicielle. Cependant, l'interface utilisateur graphique (GUI) n'est actuellement disponible qu'en français.

Les milieux humides existants jouent un rôle clé dans l'atténuation des débits maximums et des crues, ainsi que dans l'amplification des débits minimums dans les sous-bassins hydrographiques du bassin LCRR. Ainsi, les milieux humides ont une incidence quotidienne sur les ANB et les niveaux d'eau du lac Champlain, ce qui régit le niveau et le débit d'eau de la rivière Richelieu. Les résultats de la simulation montrent clairement que les milieux humides ont permis d'atténuer les débits et d'abaisser les niveaux d'eau pendant la crue de 2011.

La mise en œuvre des scénarios de stockage dans les bassins versants (milieux humides et terres agricoles inondées) demeure difficile, mais un cadre de modélisation hydrologique couplé à un SIG efficace a été utilisé pour les concevoir et les évaluer. L'étude a révélé qu'il vaut la peine de chercher à accroître le volume d'eau stockée dans le bassin versant afin de réduire les risques d'inondation.

L'étude a porté sur quatre scénarios exploratoires indépendants, soit:

- 1 le stockage d'eau sur les terres agricoles riveraines;
- 2 un premier scénario d'ajout de milieux humides fondé sur le MNA;
- 3 un scénario de l'USEPA relatif aux milieux humides présentant le meilleur potentiel; et
- 4 une combinaison des deux derniers scénarios relatifs aux milieux humides.

Les scénarios (correspondant à l'ajout d'aires de stockage, soit respectivement de 2 256 km² de terres agricoles inondées, de 647 km² de milieux humides, de 865 km² de milieux humides et de 1 488 km² de milieux humides) ont mis en évidence la possibilité de réaliser des gains supplémentaires pour réduire les ANB au LC et son niveau d'eau, et dans une moindre mesure, le débit de pointe et le niveau d'eau de la RR. Ces résultats démontrent clairement que:

- le stockage d'eau sur des terres agricoles riveraines dans le bassin du LC pourrait, en moyenne, donner lieu à des réductions du débit maximum annuel des affluents du LC de 1 % à 52 %, ce qui abaisserait le débit maximum annuel moyen des ANB du LC de 15 %, le débit maximum annuel moyen de la RR de 2 %, le niveau d'eau maximum annuel moyen du LC de 4 cm et le niveau maximum annuel moyen de la RR de 3 cm.
- l'aménagement et la restauration des milieux humides pourraient, en moyenne, occasionner des réductions du débit maximum annuel des affluents du LC de 0,7 à 13 %, ce qui abaisserait le débit maximum annuel moyen des ANB du LC de 6,3 %, le débit maximum annuel moyen de la RR de 2,6 %, le niveau maximum annuel moyen du LC de 5 cm et

le niveau maximum annuel moyen de la RR de 3 cm.

- l'aménagement de milieux humides selon le scénario de l'USEPA pourrait, en moyenne, occasionner des réductions du débit maximum annuel des affluents du LC de 0,9 % à 26,6 %, ce qui abaisserait en moyenne le débit maximum annuel des ANB du LC de 8,1 %, le débit maximum annuel moyen de la RR de 2,6 %, le niveau maximum annuel moyen du LC de 5 cm et le niveau maximum annuel moyen de la RR de 3 cm.
- la combinaison des scénarios relatifs aux milieux humides (ii) et (iii) pourrait, en moyenne, occasionner des réductions du débit maximum annuel des affluents du LC de 2,6 à 28,1 %, ce qui abaisserait en moyenne de 12,7 % le débit maximum annuel des ANB du LC, le débit maximum annuel moyen de la RR de 4,7 %, le niveau maximum annuel moyen du LC de 8 cm et le niveau maximum annuel moyen de la RR de 6 cm.

Tous les scénarios ont démontré qu'il est possible de réduire les débits maximums, d'augmenter les débits minimums, d'écrêter les pics de débit des ANB et le débit de la rivière, et de diminuer les niveaux d'eau. Sur le plan de l'efficacité, c'est la combinaison des deux scénarios relatifs aux milieux humides qui donne les gains les plus intéressants. Cependant, l'aménagement/la restauration de milieux humides ou l'inondation de terres agricoles (terres agricoles riveraines) nécessiteraient de vastes superficies, ce qui soulève des questions de faisabilité et d'acceptabilité.

Le tableau 11.1 présente les couvertures terrestres qui ont été prises en compte dans l'élaboration des scénarios de stockage d'eau dans des milieux humides sur des terres agricoles. Il est évident que la mise en œuvre de ces scénarios aurait des répercussions sur de grandes superficies de terres agricoles, ce qui en compliquerait l'exécution. La mise en œuvre de milieux humides supplémentaires serait également difficile et toucherait à la fois les zones forestières et les terres agricoles. La réalisation de tout scénario de stockage d'eau à grande

échelle nécessiterait également un travail sur le terrain à long terme, mais elle procurerait certainement des avantages hydrologiques.

A L'ajout de milieux humides et/ou l'inondation de terres agricoles nécessiteraient la mobilisation d'importantes superficies. Compte tenu des politiques, des programmes et des règlements existants au Canada (comme le projet de loi 132 au Québec - Loi concernant la conservation des milieux humides et hydriques) et/ou aux États-Unis (comme les programmes gérés par le Natural Resources Conservation Service de l'USDA et le US Fish and Wildlife Service, ainsi que par les ministères de la conservation de l'environnement du Vermont et des États de New York), le fait de favoriser la restauration/l'aménagement de milieux humides au lieu d'inonder des terres agricoles pourrait fournir un cadre socialement acceptable pour renforcer la résilience au fil du temps dans le bassin LCRR, ne serait-ce qu'au niveau des sous-bassins hydrographiques locaux.

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 stocker. Bien que le projet de modélisation LCRR d'HYDROTEL soit disponible pour évaluer de multiples scénarios pour chaque sous-bassin, en fin de compte, il faut mener des études approfondies pour chaque scénario, notamment :

- une analyse cartographique des crues et des inondations dont les extrants d'HYDROTEL (débits simulés) servent à alimenter un modèle hydraulique destiné à évaluer les impacts potentiels de la réduction des niveaux d'eau du LC et de la RR, suivant certaines valeurs;
- une évaluation de l'effet sur les débits minimums; et
- une analyse coûts-avantages comprenant les coûts totaux (p. ex., de construction, de paiement de servitudes, etc.) et les avantages totaux (p. ex., les dommages évités, l'évaluation des biens et les services environnementaux, etc.).

Tableau II-1. Occupation du sol selon les scénarios de stockage d'eau dans des milieux humides et sur des terres agricoles.

Scénario	Bassin du lac Champlain				Bassin de la rivière Richelieu (Fryers)			
	AGRI	MHMNA	HEPA	COMBINÉ	AGRI	MHMNA	HEPA	COMBINÉ
Surface de stockage additionnelle totale	2 256	647	865	1 488	2 471	649	865	1 489
Catégories d'occupation du sol affectées								
Forêt de conifères	-	84	136	215	-	84	136	215
Forêt de feuillus	-	384	158	534	-	385	158	535
Forêt mixte	-	119	173	285	-	119	173	285
Agriculture	2 256	43	294	332	2 471	44	294	334
Autres	-	17	104	121	-	17	104	121

BIBLIOGRAPHIE

Blanchette, M., A. N. Rousseau, E. Foulon, S. Savary, M. Poulin. 2019. What would have been the impacts of wetlands on low flow support and high flow attenuation under steady state land cover conditions? *Journal of Environmental Management* 234: 448-457

Blanchette, M., A. N. Rousseau, M. Poulin. 2018. Mapping wetlands and land cover change with Landsat archives: the added value of geomorphologic data. *Canadian Journal of Remote Sensing* 44(3): 337-356

Boudreau, P., J. Morin, O. Champoux. 2018. Modèle de bilan hydrique et apports nets au lac Champlain (Note technique NT-124). Section hydrologie et écohydraulique. Services hydrologiques nationaux. Services Météorologique du Canada, Environnement et Changement Climatique Canada. 26 p.

Bullock, A. et M. Acreman. 2003. The role of wetlands in the hydrological cycle. *Hydrology and Earth System Sciences* 7 (3):358-389. doi:10.5194/hess-7-358-2003.

Cheng, C., E. Brabec, Y.-C. Yang, R. Pyan. 2013. Rethinking stormwater management in a changing world: effects of detention for flooding hazard mitigation under climate change scenarios in the Charles River watershed. *Landsc. Res. Rec.* 1 (n. 1), 214e228.

Cole, C. A., R. P. Brooks, D. H. Wardrop. 1997. Wetland Hydrology as a function of hydrogeomorphic (HGM) Subclass. *Milieux humides* 17(4): 456-467.

Fortin, J.-P., R. Turcotte, S. Massicotte, R. Moussa, J. Fitzback, J.-P. Villeneuve. 2001 Distributed watershed model compatible with remote sensing and GIS data, part I: description of the model. *Journal of Hydrologic Engineering* 6(2): 91-99.

Fossey, M., A. N. Rousseau, F. Bensalma, S. Savary, A. Royer. 2015 Integrating isolated and riparian wetland modules in the PHYSITEL/HYDROTEL modelling platform: model performance and diagnosis. *Hydrological Processes* 29, 4683-4702 (2015) doi: 10.1002/hyp.10534.

Fossey, M., A. N. Rousseau, S. Savary. 2016a. Modelling the hydrological impacts of milieux humides in the Becancour River watershed, Canada: a spatio-temporal dependent effect. *Hydrological Processes* 30, 1768-1781.

Fossey, M., A. N. Rousseau. 2016b. Can isolated and riparian wetlands mitigate the impact of climate change on watershed hydrology? A case study approach. *Journal of Environmental Management* 182: 327-339

Fossey, M., A. N. Rousseau. 2016c. Assessing the long-term hydrological services provided by wetlands under changing climate conditions: A case study approach of a Canadian watershed. *Journal of Hydrology* 541 (2016) 1287-1302

Gupta, H. V., H. Kling, K. K. Yilmaz, G. F. Martinez. 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: implication for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377 (1-2), 80-91.

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. Publié par le Groupe de travail international du plan d'étude du lac Champlain et de la rivière Richelieu (GTIPELCRR). Ottawa (Ont.), Canada, et Washinton (DC), É.-U.

Livneh, B., T. J. Bohn, D. W. Pierce, F. Munoz-Arriola, B. Nijssen, R. Vose, D. R. Cayan, L. Brekke. 2015. A spatially comprehensive, hydrometeorological data set for Mexico, the US and southern Canada 1950-2013. *Sci. Data*, 2, 120042, doi:10.1038/sdata.2015.42.

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

Matott, L. S. 2017. OSTRICH: an Optimization Software Tool, Documentation and User's Guide, Version 17.12.19. 79 pages, University at Buffalo Center for Computational Research, www.eng.buffalo.edu/~lsmatott/Ostrich/OstrichMain.html.

Nobre, A.D., Cuartas, L.A., Hodnett, M., Rennó, C.D., Rodrigues, G., Silveira, A. and Saleska, S., 2011. Height Above the Nearest Drainage—a hydrologically relevant new terrain model. *Journal of Hydrology*, 404(1-2), pp.13-29.

Nobre, A. D., L. A. Cuartas, M. R. Momo, D. L. Severo, A. Pinheiro, C.A. 2016. HAND contour: a new proxy predictor of inundation extent. *Hydrological Processes*, 30(2):320–333

Price, J. S., B. A. Branfireun, J. M. Waddington, K. J. Devito. 2005. Advance in Canadian wetland hydrology, 1999-2003. *Hydrological Processes* 19: 201-214. DOI: 10.1002/hyp.5774

Rawls, W.J. et Brakensiek, D.L., 1989. Estimation of soil water retention and hydraulic properties. In *Unsaturated Flow in Hydrologic Modeling* (pp. 275-300). Springer, Dordrecht.

Riboult, P., F. Brissette. 2016. Analysis of Lake Champlain/Richelieu River's historical 2011 flood. *Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques* 41 (1-2):174-185.

Rousseau, A. N., S. Savary, S. Tremblay. 2016. Développement de PHYSITEL 64 bits avec interface graphique Rapport No-R1724. Québec : Institut national de la recherche scientifique (INRS-ETE).

Rousseau, A. N., J.-P. Fortin, R. Turcotte, A. Royer, S. Savary, F. Quévy, P. Noël, C. Paniconi. 2011. PHYSITEL, a specialized GIS for supporting the implementation of distributed hydrological models. *Water News - Official Magazine of the Canadian Water Resources Association*, 31(1): 18-20.

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 », 23 novembre 2006, Montréal (Québec), Canada.

Saad, C., A. St-Hilaire, P. Gachon, S. El Adlouni. 2016. The 2011 flood event in the Richelieu River basin: Causes, assessment and damages. *Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques* 41 (1-2):129-138.

Turcotte, R., J.-P. Fortin, A. N. Rousseau, S. Massicotte, J.-P. Villeneuve. 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(3-4): 225-242.

Turcotte, R., A. N. Rousseau, J.-P. Fortin, J.-P. Villeneuve. 2003. A process-oriented multiple objective calibration strategy accounting for model structure. In *Calibration of Watershed Models*, Duan Q, Gupta VK, Sorooshian S, Rousseau AN, Turcotte R (éd.). American Geophysical Union: Washington; 153–163.

Turcotte, R., L.-G. Fortin, J.-P. Fortin, V. Fortin, J.-P. Villeneuve. 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.

Watson, K.B., Ricketts, T., Galford, G., Polasky, S., O’Niel-Dunne, J., 2016. Quantifying flood mitigation services: The economic value of Otter Creek milieux humides and floodplains to Middlebury, VT. *Ecological Economics* 130, 16–24. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.05.015>

Wu, Y., Zhang, G., Rousseau, A.N., Jun Xu, Y., 2020a. Quantifying streamflow regulation services of milieux humides with an emphasis on quickflow and baseflow responses in the Upper Nenjiang River Basin, Northeast China, *Journal of Hydrology*, doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124565

Wu, Y., G. Zhang, A. N. Rousseau, Y. J. Xu, E. Foulon. 2020b. On how wetlands can provide flood resilience in a large river basin: A case study in Nenjiang river Basin, China. *Journal of Hydrology* 587, 125012

Xu, X., Y. C. Wang, M. Kalcic, R. L. Muenich, Y. E. Yang, D. Scavia. 2017. Evaluating the impact of climate change on fluvial flood risk in a mixed-used watershed. *Environ. Model. Softw.* Available online. DOI: 10.1016/j.envsoft.2017.07.013.

Zheng, X., D. G. Tarboton, D. R. Maidment, Y. Y. Liu, P. Passalacqua. 2018. River Channel Geometry and Rating Curve Estimation Using Height above the Nearest Drainage. *Journal of the American Water Resources Association*, 54(4), p.785-806. doi:<https://doi.org/10.1111/1752-1688.1266>

ANNEXE I - Liste des tâches accomplies

Voici les tâches réalisées entre septembre 2019 et novembre 2020:

- 1 Analyse d'un projet PHYSITEL/HYDROTEL existant appuyé par le groupe chargé des MGAC⁶, y compris des données spatiales et hydrométéorologiques.
- 2 Mise à jour nécessaire des données spatiales (modèle numérique d'altitude, occupation du sol, type de sol).
- 3 Modélisation et intégration du bassin hydrographique LCRR à l'aide de la dernière version de PHYSITEL/HYDROTEL.
- 4 Paramétrage et validation d'HYDROTEL, notamment pour ce qui d'un paramétrage spécifique pour l'année 2011.
- 5 Estimation des services de régularisation assurés par le débit des cours d'eau, en fonction de l'actuelle répartition des milieux humides au sein du bassin LCRR.
- 6 Évaluation préliminaire et rapide de la superficie additionnelle de milieux humides et de terres agricoles inondées nécessaire à la réduction du débit de pointe de 2011.
- 7 Association des apports nets du bassin du lac Champlain d'HYDROTEL au nouveau modèle de bilan hydrique (MBH) journalier d'Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) afin de simuler le niveau du lac et le débit de la rivière Richelieu.
- 8 Évaluation d'un scénario de stockage de l'eau sur des terres agricoles riveraines à l'aide des modules HYDROTEL relatifs aux milieux humides.
- 9 Élaboration d'une approche simplifiée des scénarios d'aménagement et de restauration des milieux humides.
- 10 Évaluation de deux scénarios d'aménagement/de restauration de milieux humides.
- 11 Mise au point d'un outil complet de cartographie du stockage.
- 12 Rédaction de rapports d'étape et du rapport final sur le stockage des bassins hydrographiques.

⁶ Application d'un modèle hydrologique distribué, à haute résolution, à un bassin transfrontalier (entre les États-Unis et le Canada) : Simulation de l'hydrogramme annuel moyen sur plusieurs années et de la crue de 2011 dans le bassin de la rivière Richelieu (Lucas Picher et al., 2020)

ANNEXE II - Description générale des modules relatifs aux milieux humides d'HYDROTEL

La présente section présente les concepts de base qui sous-tendent les modules sur les milieux humides d'HYDROTEL. Une description complète se trouve dans les travaux de Fossey et al. (2015). Il convient de noter que le stockage sur des terres agricoles a été simulé à l'aide des modules des milieux humides, mais que le paramétrage a été adapté pour refléter le comportement prévu des terres agricoles inondées. Une représentation schématique des modules est présentée à la Figure A2.1.

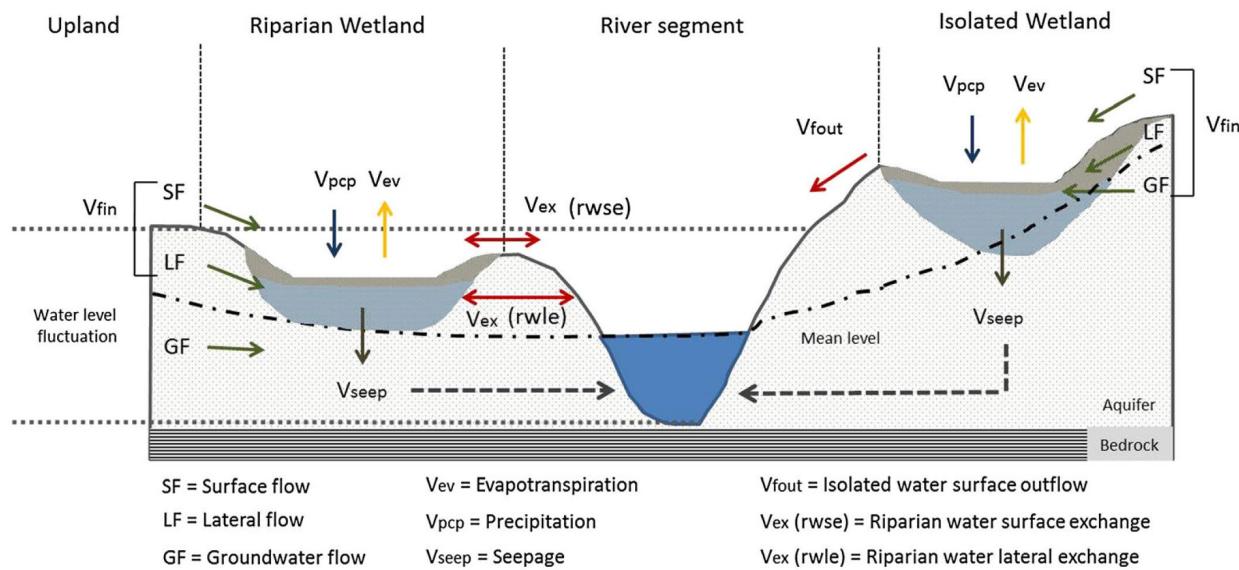


Figure A2.1. Régime d'échange hydrique via des milieux humides isolés ou riverains (repris de Fossey et al., 2015, sans l'autorisation de l'éditeur).

Comme nous l'avons vu, HYDROTEL fournit des modules spécifiques permettant de simuler les processus hydrologiques de chaque type de milieu humide (isolé, riverain) à l'échelle de chaque RHHU. Le module sur les milieux humides simule les apports d'eau sous la forme de précipitations, de la fonte des neiges et du ruissellement (en surface et sous la surface) dans la zone de contribution (c.-à-d. l'aire de drainage des milieux humides), compte tenu de l'évapotranspiration, des infiltrations vers le fond de chaque milieu humide (ce qui contribue au débit de base), du stockage de l'eau et du débit sortant. Pour les milieux riverains humides, le module simule également les échanges directs d'eau avec les segments de cours d'eau adjacents sous la forme de ruissellement terrestre et de débordement au-dessus des berges. De plus, à l'échelle de chaque UHRH, les milieux humides isolés et riverains sont regroupés numériquement pour constituer un milieu humide isolé ou riverain équivalent dont la superficie totale et l'aire de drainage sont conservées.

Il n'est pas question ici de présenter toutes les équations et tous les algorithmes à l'appui des modules sur les milieux humides, mais il est important de préciser les notions qui ont présidé à l'élaboration des scénarios relatifs aux milieux humides et de stockage de l'eau.

À l'échelle des UHRH, les bilans hydriques des milieux humides équivalents comprennent des paramètres spécifiques qui régissent la capacité des milieux humides exprimée en volume d'eau. D'autres milieux humides auront des paramètres équivalents à ceux des milieux humides existants et dominants dans les sous-bassins hydrographiques (c.-à-d. unités de calcul - UHRH) ou des valeurs moyennes de paramètres pour les UHRH à l'exception des milieux humides (voir le tableau

A1.1). Ces paramètres sont fondés sur des travaux antérieurs et des études documentaires.

Tableau A2.1. Valeurs moyennes des paramètres influant sur les volumes d'eau normaux et maximaux et sur les débits d'eau provenant des milieux humides.

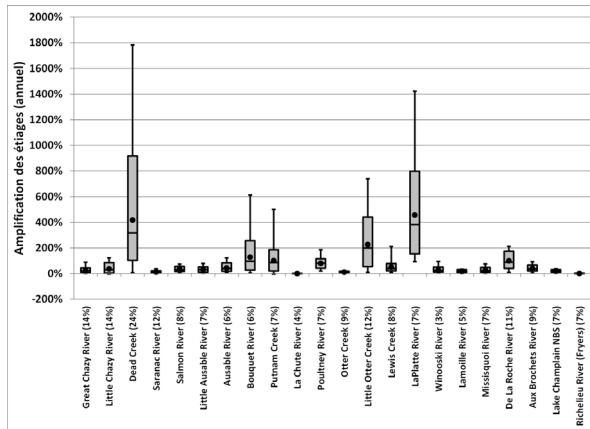
Type	Ratio (surface normale/surface maximale)	Hauteur normale de l'eau (m)	Hauteur maximale de l'eau (m)
Milieux humides moyens	0,30	0,20	0,85

De façon générale, les milieux humides captent et rejettent de l'eau suivant des mécanismes de relation particuliers. Le taux de rejet dépend des volumes d'eau normaux et maximaux, lesquels sont liés à une hauteur d'eau normale dans une zone présentant une quantité d'eau normale et à une hauteur d'eau maximale dans une zone où la quantité d'eau est maximale. La zone humide maximale est normalement déterminée à partir de la classe milieu humide de la carte d'occupation du sol.

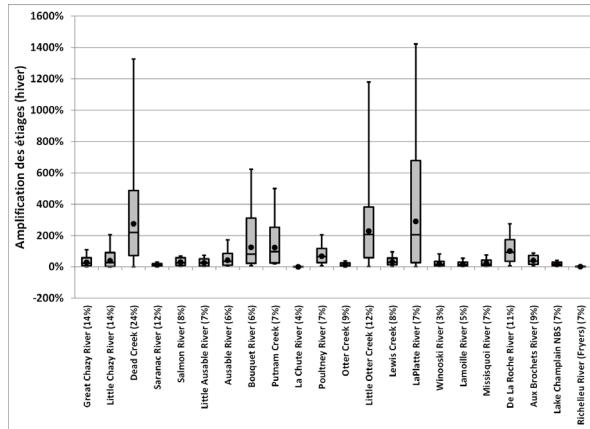
ANNEXE III - Impact of wetland and water storage scenarios on low flows

It is also important to mention that low flow amplification can result in a very large relative variation, given the small magnitude of low flows. The figures below provide evaluation of the impacts of the wetland storage scenarios on low flows.

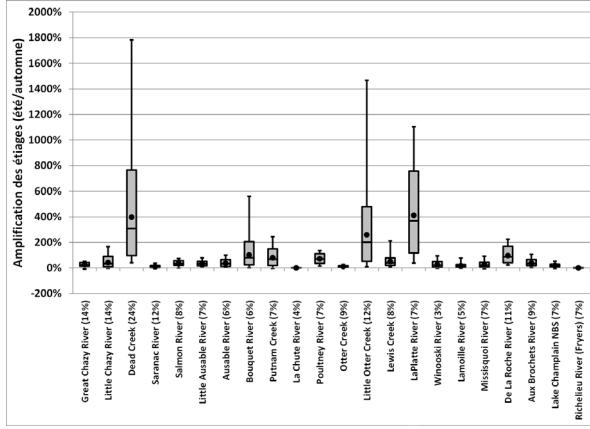
Répartition actuelle des milieux humides dans le bassin LCRR



(a) (■Min; ▨Max; ▨10^e percentile; ▨90^e percentile; ━ Médiane; ▨ Moyenne)



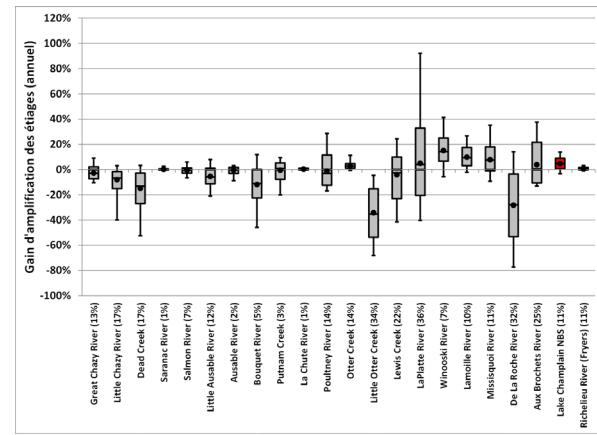
(b) (■Min; ▨Max; ▨10^e percentile; ▨90^e percentile; ━ Médiane; ▨ Moyenne)



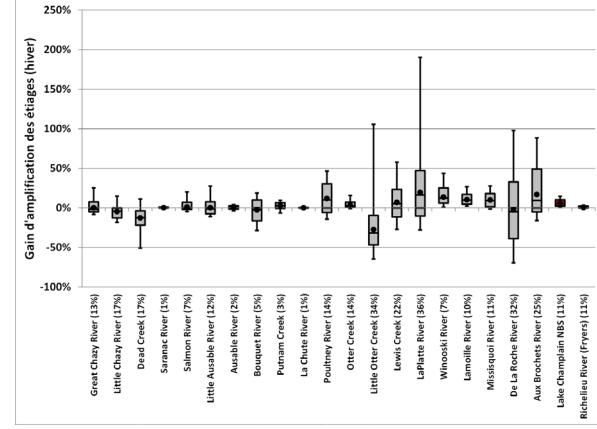
(c) (■Min; ▨Max; ▨10^e percentile; ▨90^e percentile; ━ Médiane; ▨ Moyenne)

Figure A3.1. Effets des milieux humides actuels sur l'amplification des faibles débits dans les 20 sous-bassins du LC, sur le débit des ANB du LC et sur le débit de la RR aux rapides Fryers pour différents pas de temps : a) annuels, b) printaniers et c) estivaux/automnaux.

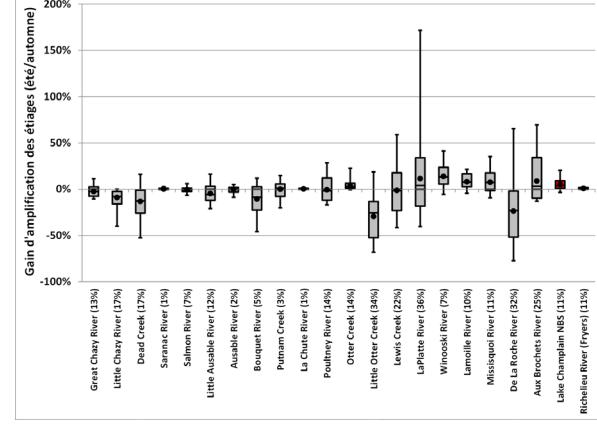
Scénario relatif au stockage de l'eau sur des terres agricoles riveraines



(a) (■Min; ▨Max; ▨10^e percentile; ▨90^e percentile; ━ Médiane; ▨ Moyenne)



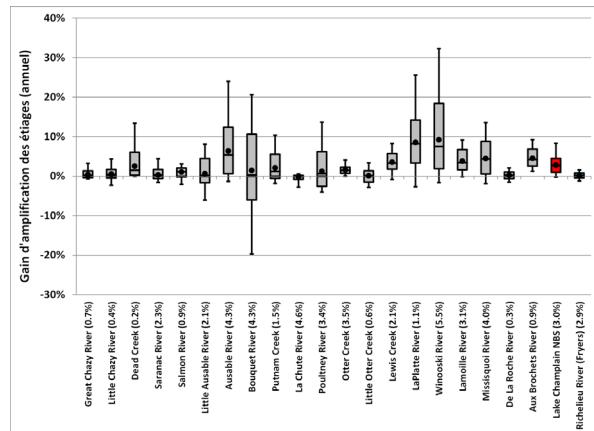
(b) (■Min; ▨Max; ▨10^e percentile; ▨90^e percentile; ━ Médiane; ▨ Moyenne)



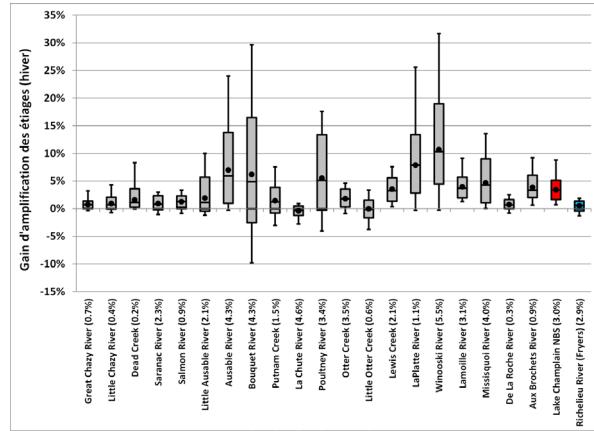
(c) (■Min; ▨Max; ▨10^e percentile; ▨90^e percentile; ━ Médiane; ▨ Moyenne)

Figure A3.2. Gains d'amplification des débits minimums attribuables au stockage de l'eau sur des terres agricoles riveraines dans le bassin LCRR pour les 20 sous-bassins du LC, du débit des ANB dans le LC et du débit de la RR aux rapides Fryers par rapport aux conditions actuelles et pour différents pas de temps : a) annuels, b) hivernaux et c)

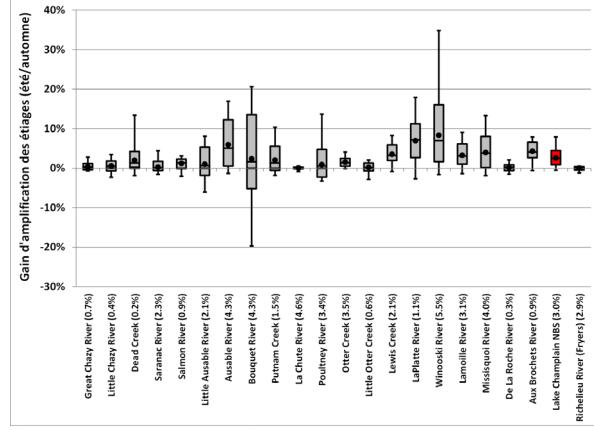
Scénario d'aménagement/de restauration de milieux humides fondé sur des données spatiales



(a) (■ Min; ▨ Max; ▨ 10^e percentile; ▨ 90^e percentile; ■ Médiane; ▨ Moyenne)



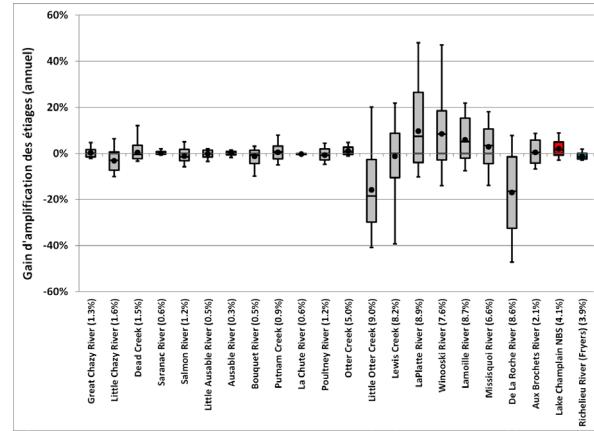
(b) (■ Min; ▨ Max; ▨ 10^e percentile; ▨ 90^e percentile; ■ Médiane; ▨ Moyenne)



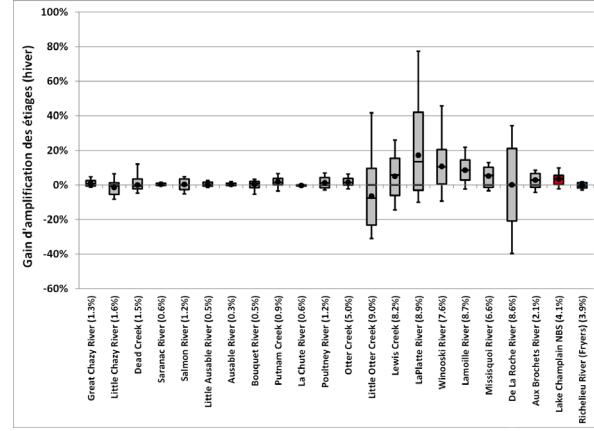
(c) (■ Min; ▨ Max; ▨ 10^e percentile; ▨ 90^e percentile; ■ Médiane; ▨ Moyenne)

Figure A3.3. Gains d'amplification des débits minimums après ajout de 652 km² de milieux humides dans le bassin LCRR pour les 20 sous-bassins du LC, du débit des ANB du LC et du débit de la RR aux rapides Fryers par rapport aux conditions actuelles et pour différents pas de temps : a) annuels, b) hivernaux et c) estivaux/automnaux.

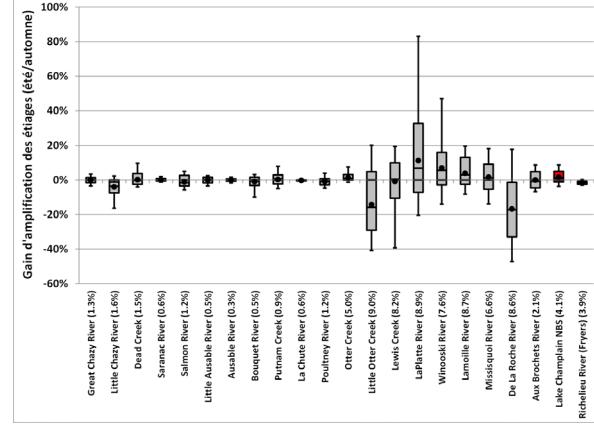
Scénario de l'USEPA relatif aux milieux humides



(a) (■ Min; ▨ Max; ▨ 10^e percentile; ▨ 90^e percentile; ■ Médiane; ▨ Moyenne)



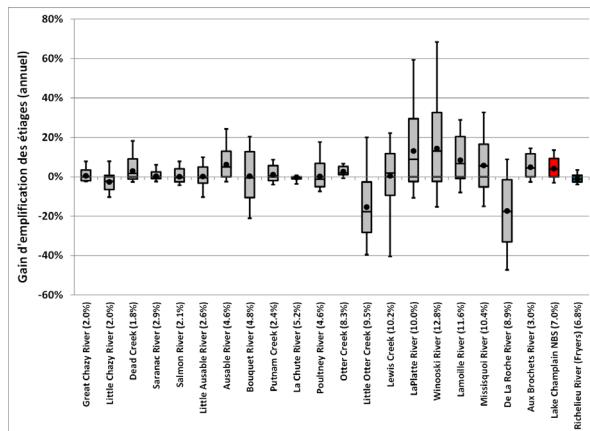
(b) (■ Min; ▨ Max; ▨ 10^e percentile; ▨ 90^e percentile; ■ Médiane; ▨ Moyenne)



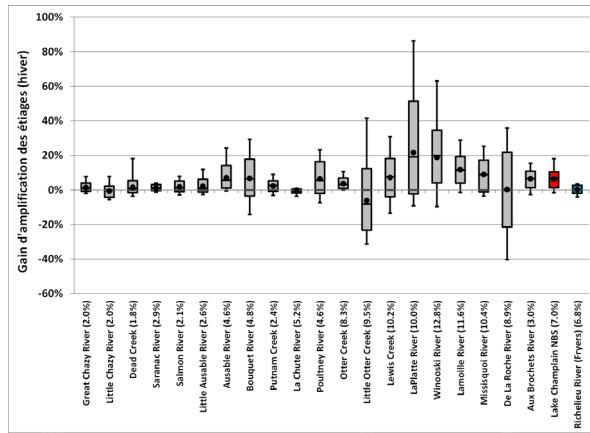
(c) (■ Min; ▨ Max; ▨ 10^e percentile; ▨ 90^e percentile; ■ Médiane; ▨ Moyenne)

Figure A3.4. Gains d'amplification des débits minimums attribuables au scénario relatif aux milieux humides de l'USEPA dans le bassin LCRR pour les 20 sous-bassins du 20 LC, du débit des ANB du LC et du débit de la RR aux rapides Fryers, par rapport aux conditions actuelles et pour différents pas de temps : a) annuels, b) hivernaux et c) estivaux et automnaux.

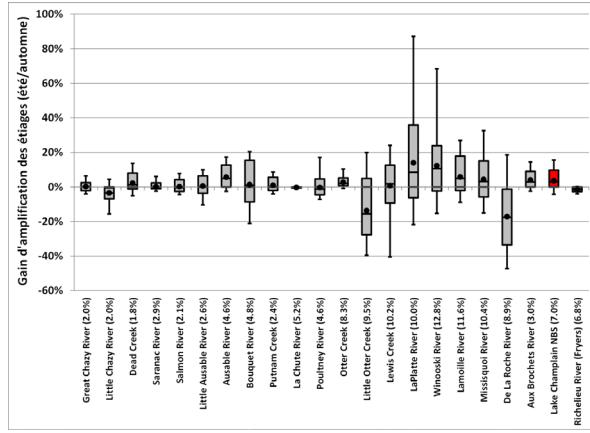
Scénario de l'USEPA relatif aux milieux humides



(a) (■ Min; ▨ Max; ▨ 10^e percentile; ▨ 90^e percentile; ■ Médiane; ▨ Moyenne)



(b) (■ Min; ▨ Max; ▨ 10^e percentile; ▨ 90^e percentile; ■ Médiane; ▨ Moyenne)



(c) (■ Min; ▨ Max; ▨ 10^e percentile; ▨ 90^e percentile; ■ Médiane; ▨ Moyenne)

Figure A3.5. Gains d'amplification des débits minimums attribuables aux scénarios combinés relatifs aux milieux humides dans le bassin LCRR pour les 20 sous-bassins du LC, du débit des ANB du LC et du débit de la RR aux rapides Fryers par rapport aux conditions actuelles et pour différents pas de temps : a) annuels, b) hivernaux et c) estivaux/automnaux.

