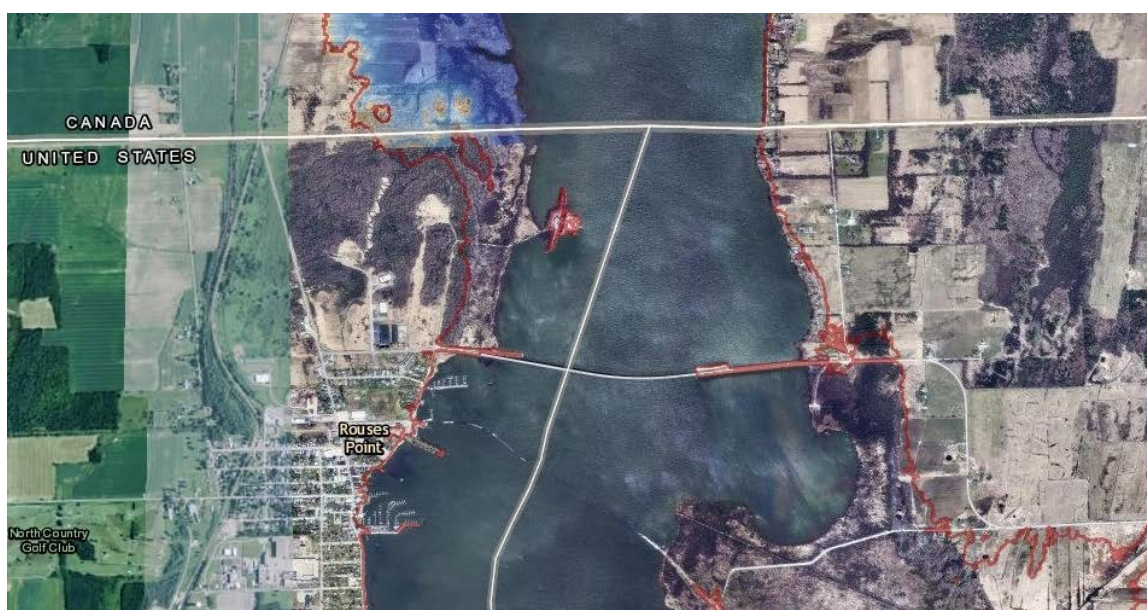


# RAPPORT FINAL

## Vers un système opérationnel en temps réel de prévision des crues et de cartographie des plaines inondables pour le lac Champlain et la rivière Richelieu

### Travaux préparatoires et cartes statiques d'inondation



Préparé pour la  
Commission mixte internationale  
par le  
Groupe de travail technique international  
du lac Champlain et de la rivière Richelieu



Le 30 novembre 2015

## Résumé

Pendant un an, du 1<sup>er</sup> octobre 2014 au 30 septembre 2015, divers organismes fédéraux, provinciaux et d'État ont travaillé en collaboration pour améliorer la préparation et les avertissements en cas de crue du lac Champlain et de la rivière Richelieu. Ces travaux ont résulté d'une directive des gouvernements du Canada et des États-Unis émise par la Commission mixte internationale (CMI) à la suite des graves inondations survenues dans la région en 2011, ainsi que d'un plan d'étude, formulé en 2013, définissant des mesures pour atténuer les inondations et leurs répercussions dans le bassin versant du lac Champlain et de la rivière Richelieu.

Les 24 et 31 juillet 2014, les gouvernements des États-Unis et du Canada, en vertu de l'article IX du Traité des eaux limitrophes, ont respectivement demandé l'aide de la CMI pour la mise en œuvre de deux volets du plan d'étude de juillet 2013 concernant le lac Champlain et la rivière Richelieu. Les deux volets adaptables du plan d'étude que la CMI doit entreprendre et réaliser sont les suivants :

1. S'attaquer aux lacunes en matière de données et les combler par la collecte et l'harmonisation, selon les besoins, de données sur la topographie, la bathymétrie, la végétation aquatique et la texture des sols, de données LIDAR, ainsi que de données climatiques et hydrométriques d'observation (conformément à la section 3.1, page 38, du plan d'étude de juillet 2013), en vue du lancement le plus rapide possible du système en temps réel de prévision des crues et de cartographie des zones inondées. Ce système suppose l'élaboration de nouveaux modèles hydrologiques et hydrauliques en temps réel pour le lac Champlain et la rivière Richelieu, afin de prévoir les niveaux d'eau du lac et de la rivière, ainsi qu'un modèle altimétrique numérique (MAN) précis de la plaine inondable pour délimiter les contours des zones inondées correspondantes.
2. Créer des cartes statiques d'inondation en utilisant une combinaison de données anciennes et nouvelles, de même qu'en recourant à la modélisation, pour fournir de l'information pratique aux collectivités. Ces cartes montreront les zones qui seraient touchées si les niveaux d'eau du lac Champlain et de la rivière Richelieu atteignaient diverses hauteurs.

Sous la direction du groupe de travail technique international du lac Champlain et de la rivière Richelieu (GTT), certaines lacunes dans des aspects spécifiques des éléments nécessaires pour un futur système de prévision ont été comblées, une démarche pragmatique proposée pour un futur système de prévision des crues a été élaborée, et des cartes statiques d'inondation correspondant à des scénarios précis ont été créées conformément au volet n° 2 de la directive.

Voici les réalisations résultant de cet effort conjoint canado-américain :

1. **Collecte de nouvelles données LIDAR** sur le bassin du lac Champlain dans l'État de New York — Lorsque ces données LIDAR, de même que les nouvelles données LIDAR pour le Vermont seront rendues publiques, un ensemble complet de données LIDAR sera disponible pour l'ensemble du bassin versant du lac Champlain et de la rivière Richelieu.
2. **Collecte de données hydrologiques** — Ces données recueillies pour différentes régions du bassin versant du lac Champlain et de la rivière Richelieu ont servi à créer un modèle hydrodynamique 2D expérimental du lac Champlain et de la rivière Richelieu.

3. **Évaluation des prévisions météorologiques** — Cette évaluation avait pour but de connaître la capacité actuelle de prévision à court terme et à long terme des précipitations, des vents et de la température pour le bassin versant du lac Champlain et de la rivière Richelieu. Des données et des prévisions de diverses sources américaines et canadiennes ont été utilisées pour cette évaluation. Les résultats indiquent qu'il est possible de prévoir la composante nord-sud des vents sur un horizon de 3 jours à des fins de prévision à court terme des crues. Il faudra toutefois mettre au point une procédure de correction des biais avant que les prévisions des vents puissent servir de manière fiable dans des modèles hydrodynamiques. Les prévisions de précipitations jusqu'à 5 jours fournissent également des données fiables pour la modélisation des crues.
4. **Correction des données altimétriques** — Des corrections ont été apportées pour des points de mesure critiques du niveau d'eau, afin que des données altimétriques communes puissent être utilisées de part et d'autre de la frontière internationale. Dans le passé, cela a posé des problèmes pour la comparaison des niveaux d'eau observés dans le lac Champlain et la rivière Richelieu. Cette question est maintenant résolue.
5. **Création d'un modèle hydrodynamique 2D expérimental du lac Champlain et de la rivière Richelieu** — Ce modèle a été créé à l'aide de données préexistantes et de nouvelles données recueillies pour le projet dont il est question ici. Les résultats ont montré que les crues du lac Champlain peuvent être raisonnablement simulées à l'aide d'une application de ce modèle dans des conditions d'équilibre, et que celui-ci constitue une bonne base pour la modélisation future du lac et de la rivière Richelieu jusqu'à Chambly. Des données bathymétriques supplémentaires sur les hauts fonds de Saint-Jean-sur-Richelieu ainsi que sur la partie aval de la rivière, de Chambly à Sorel, seront nécessaires pour simuler avec plus de précision le cours et les crues de la rivière dans ces zones.
6. **Création de cartes statiques d'inondation pour des parties des zones riveraines du lac Champlain et de la rivière Richelieu en amont de Chambly** — Ces cartes ont été créées pour 11 scénarios correspondant à autant de niveaux de crue. Elles sont conçues pour montrer quelles terres seraient inondées dans les 11 scénarios. On s'attend à ce qu'elles soient utiles pour les services d'urgence des localités et des États ainsi que pour les responsables locaux. Ces cartes sont accessibles dans le Web, afin que les populations locales puissent y avoir rapidement accès. Comme elles sont statiques, elles ne reflètent pas les conditions réelles des vents et des vagues qui pourraient avoir des effets sur l'ampleur d'une inondation. Elles constituent toutefois une bonne première étape aidant à caractériser les menaces d'inondations futures. Un MAN LIDAR complet couvrant la partie canadienne du bassin versant a en outre permis de représenter les hauteurs d'inondation pour les 11 scénarios de crue.
7. **Amélioration et coordination des prévisions des inondations dans l'avenir** — Une démarche pragmatique est décrite à ce sujet. Elle repose sur l'adoption d'une approche probabiliste du système de modélisation et sur le recours à un organisme international de coordination pour émettre les meilleures prévisions conjointes possibles d'inondation à l'intention des organismes responsables des avertissements d'inondation et de la cartographie des inondations.

**D'autre part, le rapport fournit des recommandations précises en matière de prévision et de préparation pour des inondations futures :**

1. Pour créer un système en temps réel de prévision des crues et de cartographie des zones inondées, le GTT recommande que l'approche probabiliste à deux volets présentée au chapitre 5 pour la prévision des crues soit adoptée et mise en œuvre, y compris la modélisation de la dénivellation due au vent et de l'action des vagues. Cette démarche comprendra l'élaboration de modèles hydrodynamiques du lac Champlain, qui seront utilisés de la même manière que les modèles actuels des Grands Lacs, c'est-à-dire pour fournir les volets américain et canadien d'un modèle de prévision à l'organisme binational de coordination, qui les considérera dans ses propres prévisions.
2. Pour étalonner et valider un futur système de prévision, le GTT recommande que les stations limnimétriques de Port Henry et de Grand Isle demeurent en exploitation, à tout le moins pour la collecte de données couvrant une fourchette représentative de niveaux d'eau en vue de l'étalonnage du modèle hydraulique. Le GTT recommande en outre que l'on installe, au moins pour la phase d'étalonnage d'un modèle de vagues, des bouées de mesure des vagues dans la partie principale du lac et dans la portion du lac appelée « mer intérieure ».
3. Le GTT recommande qu'un organisme binational de coordination soit mis sur pied sous les auspices de la CMI pour : coordonner l'action des organismes qui interviennent dans les prévisions en temps réel, en ce qui concerne l'élaboration et la mise à jour des modèles, la disponibilité des données d'observation, le contrôle de qualité des prévisions du modèle; la production de prévisions binationales de niveau d'eau. La mise sur pied de cet organisme de coordination assurera la transmission de messages cohérents aux intervenants en cas d'urgence et au public à propos des prévisions de niveau d'eau du lac Champlain et de la rivière Richelieu qui sont diffusées.
4. En vue d'améliorer la capacité de prévision des crues pour l'ensemble du bassin versant du lac Champlain et de la rivière Richelieu, le GTT recommande l'acquisition de nouvelles données bathymétriques pour la rivière Richelieu, entre Sorel et la section de contrôle hydraulique naturel située près de Saint-Jean-sur-Richelieu, ainsi que la réalisation de cartes à jour du substrat et des assemblages de plantes aquatiques.
5. Afin de créer des produits en temps réel de prévision des crues et de cartographie des zones inondées pour l'ensemble du bassin versant du lac Champlain et de la rivière Richelieu, le GTT recommande qu'un MAN unique et cohérent soit produit pour l'ensemble du bassin versant du lac Champlain et de la rivière Richelieu une fois que toutes les données LIDAR et bathymétriques auront été recueillies et auront fait l'objet d'un contrôle de la qualité.
6. Le GTT recommande que des cartes statiques d'inondation soient produites pour l'ensemble du bassin versant du lac Champlain et de la rivière Richelieu.
7. Le GTT recommande que les nouvelles données recueillies, les données d'observation des vents et les nouveaux modèles servent à étalonner une version dynamique du modèle hydraulique de l'ensemble du bassin versant du lac Champlain et de la rivière Richelieu.

## Remerciements

Ce travail a bénéficié de la contribution de nombreuses personnes, qui ont participé à l'atelier technique ou à des rencontres d'usagers choisis, ou qui ont collaboré directement avec les membres du Groupe de travail technique international du lac Champlain et de la rivière Richelieu pour faire des travaux sur le terrain, effectuer des analyses, rédiger des ébauches de rapports techniques ou produire des cartes. Le groupe de travail tient à exprimer sa reconnaissance envers toutes ces personnes. Un merci spécial va à nos conseillers de la Commission, Pierre-Yves Caux, Jo Babb et Mike Laitta ainsi qu'à Benoît Thouin pour la traduction du rapport.

Ce rapport est respectueusement présenté à la Commission mixte internationale (CMI) par le Groupe de travail technique international du lac Champlain et de la rivière Richelieu :

### Membres américains

Keith Robinson (coprésident)

Blaine Hastings

Fred Dunlap

William Saunders

Stephanie Castle (secrétaire)

### Membres canadiens

Jean-François Cantin (coprésident)

Daniel Leblanc

Richard Turcotte

Vincent Fortin

Madeleine Papineau (services en français)

## Table des matières

Résumé.....	ii
Remerciements.....	v
Table des matières.....	vi
Liste des figures .....	viii
Liste des tableaux.....	ix
1 Introduction au projet sur le lac Champlain et la rivière Richelieu .....	1
1.1 Contexte .....	1
1.2 Portée et organisation de ce travail .....	3
1.3 Communication du plan et des résultats du projet .....	6
2 Collecte et élaboration des données .....	7
2.1 Collecte et traitement de données LIDAR pour le lac Champlain.....	7
2.2 Collecte de nouvelles données dans le lac et dans le bassin versant pour contribuer à la création d'un système de prévision des crues et de cartographie des inondations .....	9
2.3 Collecte de nouvelles données sur les substrats, les assemblages et la répartition des plantes aquatiques dans la rivière Richelieu, entre Saint-Jean-sur-Richelieu et Rouses Point sur le lac Champlain .....	12
2.4 Création d'un mécanisme de coordination pour échanger des données présentant un intérêt .....	14
2.5 Consolidation et harmonisation des données américaines .....	15
2.6 Établissement des facteurs de correction nécessaires pour la notation des niveaux d'eau selon un système commun de référence altimétrique .....	16
3 Études portant sur les prévisions météorologiques, la modélisation du lac et de la rivière, ainsi que la création de modèles altimétriques numériques.....	19
3.1 Évaluation de la qualité des prévisions des vents, des précipitations et de la température .....	19
3.2 Création d'un modèle hydrodynamique expérimental 2D du lac Champlain en utilisant les données bathymétriques existantes.....	23
3.3 Création d'un modèle hydraulique 2D de la rivière Richelieu, entre Rouses Point et Sorel .....	33
3.4 Création d'un modèle altimétrique numérique (MAN) à qualité contrôlée, à partir des ensembles de données LIDAR le long de la rivière Richelieu et de la baie Missisquoi du lac Champlain.....	35
4 Création de cartes statiques d'inondation .....	39
4.1 Scénarios statiques choisis .....	39

4.2	Création de cartes statiques d'inondation.....	41
4.3	Contrôle de qualité des cartes produites.....	47
4.3.1	Écarts résiduels entre les courbes de niveau d'inondation près de la frontière .....	47
4.3.2	Dénivellation due au vent et action des vagues .....	48
4.3.3	Inondation de 2011 simulée et inondation réelle .....	48
4.4	Disponibilité des cartes d'inondation.....	49
4.5	Cartographie future des inondations pour le bassin versant du lac Champlain et de la rivière Richelieu.....	50
4.6	Commentaires obtenus lors de rencontres avec des usagers choisis et d'autres parties prenantes .....	51
5	Une démarche pragmatique de prévision des crues et de cartographie des inondations .....	53
5.1	Vers la prochaine génération du système en temps réel de prévision des crues et de cartographie des inondations.....	53
5.2	Principaux points abordés lors de l'atelier technique et autres résultats de consultations menées auprès d'experts .....	56
5.3	Une démarche pragmatique en vue d'un système opérationnel de prévision des crues et de cartographie des inondations.....	58
5.3.1	Coordination .....	59
5.3.2	Lien entre les résultats des modèles et la cartographie des inondations .....	59
5.3.3	Modélisation des vagues .....	60
5.3.4	Options en matière de modèles de prévision .....	60
6	Résumé des conclusions et recommandations .....	62
6.1	Conclusions concernant le système en temps réel de prévision des crues et de cartographie des inondations.....	62
6.2	Conclusions concernant les cartes statiques d'inondation .....	65
6.3	Recommandations .....	66
	Annexe 1 – Lettres de renvoi des gouvernements .....	67
	Annexe 2 – Directive de la CMI.....	72
	Annexe 3 – Composition du Groupe de travail technique international du lac Champlain et de la rivière Richelieu, ainsi que son personnel de soutien technique et administratif .....	75
	Annexe 4 – Experts présents à l'atelier de l'IAGLR sur la prédiction des niveaux d'eau .....	77
	Annexe 4 – Participants présents aux rencontres d'usagers en novembre 2015.....	78
	Annexe 6 – Références .....	80
	Annexe 7 – Organismes cités et liste de sigles et acronymes .....	82

## Liste des figures

Figure 1.1 – Situation du bassin versant du lac Champlain et de la rivière Richelieu.....	2
Figure 2.1.1 – Cartes des travaux de collecte de données LIDAR et des données utilisées pour ce projet, pour le Canada (A) et les États-Unis (B).....	8
Figure 2.2.1 – Stations limnimétriques de Port Henry (A) et de Grand Isle (B) sur le lac Champlain.....	10
Figure 2.2.2 – Niveaux d’eau du lac Champlain aux stations limnimétriques de Port Henry New York (A) et de Grand Isle Vermont (B), du 4 au 11 octobre 2015.....	11
Figure 2.3.1 – Emplacement des points d’observation de plantes aquatiques sur la rivière Richelieu.....	13
Figure 3.1.1 – Séries chronologiques des vents prévus (1 jour à l’avance) et des vents observés, à Colchester Reef.....	21
Figure 3.1.2 – Coefficient médian de corrélation de Pearson entre les prévisions quotidiennes de précipitations du SGPE et les précipitations observées pour 12 sous-bassins du lac Champlain.	22
Figure 3.2.1 – Le barrage Fryer et le réseau maillé correspondant.....	25
Figure 3.2.2 – La route 2, entre South Hero et Colchester, et le réseau maillé correspondant.....	26
Figure 3.2.3 – Grille de conversion (en mètres) de CGVD28 à NAVD 88.....	28
Figure 3.2.4 – Effet des débits entrants et sortants du lac Champlain sur le niveau d’eau du lac au printemps et à l’été 2008.....	29
Figure 3.2.5 – A : Les flèches indiquent des vestiges de pièges à anguilles. B : La flèche indique les vestiges d’un bief de moulin sur la rive droite. ....	31
Figure 3.3.1 – Différences entre les mesures de profondeur du Service hydrographique du Canada (SHC) et celles d’Environnement Canada (EC) pour un transect longitudinal situé près de Saint-Ours.....	34
Figure 3.3.2 – Mesures de profondeur effectuées par le Service hydrographique du Canada (SHC) et par Environnement Canada (EC) pour une coupe transversale située à environ 7 km en amont de Sorel.....	35
Figure 3.4.1 – Régions couvertes par chacune des 3 campagnes de mesures (représentées en vert, bleu et orangé), et feuillets cartographiques pour lesquels les données ont été utilisées dans ce projet (carrés rouges).....	36
Figure 3.4.2 – Aperçu du MAN des zones riveraines de la rivière Richelieu et de la partie du lac Champlain correspondant à la baie Missisquoi. Les valeurs sont en mètres. ....	37
Figure 3.4.3 – Régions couvertes par chacune des campagnes de mesures, et feuillets cartographiques pour lesquels les données ont été utilisées dans ce projet (carrés rouges).....	38
Figure 4.2.1 – Zones de la rivière Richelieu pour lesquelles 11 cartes statiques d’inondation ont été créées.....	43
Figure 4.2.2 – Détail des profils d’inondation de la rivière Richelieu aux environs de Saint-Paul-de-l’Île-aux-Noix.....	44
Figure 4.2.3 – Hauteurs d’inondation simulées pour le scénario 7, aux environs de Saint-Paul-de-l’Île-aux-Noix.....	45
Figure 4.2.4 – Zones du lac Champlain pour lesquelles des cartes d’inondation ont été créées, et carte détaillée montrant les zones inondées pour les 11 scénarios de niveau d’eau du lac.....	46
Figure 4.3.1 – Écarts entre les courbes de niveau d’inondation à la frontière.....	47



Figure 4.3.2 – Exemple de comparaison entre la carte d’inondation pour le scénario 7 (103,2 pi – NGVD 29, en bleu) et l’étendue de l’inondation de 2011 (délimitée en rouge) selon les données du ministère de la Sécurité publique du Québec.....	49
Figure 4.4.1 – Cartes d’inondation pour le lac Champlain et la rivière Richelieu au Canada et aux États-Unis – Exemple du scénario 7 .....	50
Figure 5.1.1 – Composantes du système proposé de prévision des crues et de cartographie des inondations.....	54

## Liste des tableaux

Tableau 2.6.1 – Résultats des corrections de données à 7 endroits où des levés ont été effectués	18
Tableau 3.2.1 – Différence entre les facteurs de conversion à NAVD 88 des niveaux d’eau, en diverses stations, calculés à l’aide d’applications en ligne et les facteurs calculés à partir des observations de haute précision fournies par le GNSS .....	27
Tableau 3.2.2 – Étalonnage du réseau maillé hydrodynamique pour le 6 mai 2011 .....	32
Tableau 4.1.1 – Onze scénarios correspondant à des niveaux d’eau du lac Champlain à Rouses Point, selon les systèmes de référence NGVD 29 et NAVD 88, en pieds et en mètres, et débits estimatifs correspondants de la rivière Richelieu. Les niveaux affichés en gras dans la 2 <sup>e</sup> colonne sont ceux qui sont mentionnés dans le texte du rapport.....	40
Tableau 4.1.2 – Pertinence des altitudes du lac Champlain utilisées par la CMI pour les cartes d’inondation .....	40
Tableau 4.1.3 – Relation entre certains des 11 scénarios et les seuils d’inondation définis par le ministère de la Sécurité publique du Québec.....	41
Tableau 5.1.1 – Résolutions temporelle et spatiale des systèmes canadien et américain de prévisions d’ensemble.....	55

# 1 Introduction au projet sur le lac Champlain et la rivière Richelieu

Ce rapport décrit les résultats de travaux menés pendant un an, du 1<sup>er</sup> octobre 2014 au 30 septembre 2015, pour améliorer la préparation et les avertissements en cas de crue du lac Champlain et de la rivière Richelieu, dont le bassin versant est illustré à la figure 1.1. Ces travaux ont résulté d'une directive des gouvernements du Canada et des États-Unis émise par la Commission mixte internationale (CMI) à la suite des graves inondations survenues dans la région en 2011, ainsi que d'un plan d'étude, formulé en 2013, définissant des mesures pour atténuer les inondations et leurs répercussions dans le bassin versant du lac Champlain et de la rivière Richelieu. Les résultats obtenus constituent l'aboutissement du travail collectif de divers organismes fédéraux, provinciaux et d'État.

## 1.1 Contexte

L'inondation catastrophique du lac Champlain et de la rivière Richelieu qui a eu lieu en 2011 aux États-Unis et au Canada a attiré l'attention du public sur la nécessité d'améliorer les avertissements et la préparation en cas de crue ainsi que d'atténuer les inondations et leurs répercussions dans ce bassin versant international. En 2011, le niveau d'eau du lac Champlain a été le plus élevé à avoir jamais été enregistré, atteignant 103,27 pieds (31,477 m au-dessus du niveau moyen des mers – NGVD 29) au limnimètre de Rouses Point, dans l'État de New York. En aval du lac, la rivière Richelieu a débordé sur de vastes étendues dans la province de Québec, notamment dans la ville de Saint-Jean-sur-Richelieu. Cette inondation, qui a duré plus de 60 jours consécutifs, a causé des dommages totalisant environ 88 millions de dollars aux États-Unis et au Canada.

L'inondation de 2011 n'a pas été un cas isolé. De graves inondations du lac Champlain ou de la rivière Richelieu sont survenues à trois autres reprises au cours du dernier siècle. Le stade d'inondation majeure a été atteint dans le lac Champlain en 1932, en 1972 et en 1992. La plupart de ces inondations ont résulté d'une combinaison de la fonte du manteau neigeux et de précipitations à la fin de l'hiver et au printemps. Au cours des 100 dernières années, un certain nombre de stratégies et de structures de contrôle des crues ont été proposées, mais aucune n'a été pleinement mise en œuvre. Le plan d'étude de 2013 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* contient une description plus détaillée de l'historique des inondations dans le bassin versant du lac Champlain et de la rivière Richelieu.

La CMI a mené plusieurs études sur les inondations et sur les mesures d'atténuation des crues et de leurs répercussions dans le bassin versant du lac Champlain et de la rivière Richelieu depuis les inondations de 1932. Les principales études sont accessibles dans le site Web de la CMI, à l'adresse [http://www.ijc.org/fr/Reports\\_and\\_Publications](http://www.ijc.org/fr/Reports_and_Publications). Elles ont fait suite aux inondations majeures. Après les inondations survenues dans les années 1930, la CMI a effectué des études, présenté un plan et approuvé la construction et la mise en service d'ouvrages de contrôle des crues dans la rivière Richelieu au Québec, en vue d'assécher les terres basses du Québec et de les protéger contre les inondations. Le barrage Fryer, muni de 31 vannes d'une largeur de 30 pi chacune, a été construit à l'île Fryer en 1939. D'autres volets du projet, notamment la construction de digues au voisinage du barrage et le dragage des hauts fonds rocheux de Saint-

Jean-sur-Richelieu, n'ont pas été mis en œuvre, de sorte que le barrage Fryer n'est jamais entré en exploitation. Ce barrage existe toujours.



**Figure 1.1 – Situation du bassin versant du lac Champlain et de la rivière Richelieu**

En 1973, à la demande des gouvernement des États-Unis et du Canada, la CMI a étudié l'opportunité de régulariser les débits du lac Champlain, ainsi que des mesures provisoires possibles pour réduire les inondations. Le groupe d'étude mis sur pied pour l'occasion a examiné l'utilisation du barrage de l'île Fryer, la possibilité qu'un nouvel ouvrage régulateur soit érigé et un certain nombre de solutions de dragage dans les rapides de Saint-Jean-sur-Richelieu. Il a produit deux rapports sur les résultats de ces travaux, en 1975 et en 1981. La Commission a

conclu que la construction et l'exploitation d'un barrage mobile à Saint-Jean-sur-Richelieu, ainsi que le dragage de la section de contrôle hydraulique naturel, étaient techniquement réalisables. Elle n'a cependant pas pu établir l'opportunité de ces mesures. Seules quelques-unes des mesures proposées ont été mises en œuvre. Ce sont surtout les mesures liées à la cartographie des inondations et à un système de prévision des crues et d'avertissement aux États-Unis.

En 2013, la CMI a élaboré un plan d'étude du bassin versant du lac Champlain et de la rivière Richelieu, à la suite des inondations de 2011 et au niveau d'eau record atteint dans le lac Champlain. Ce plan présentait un certain nombre d'options à étudier pour atténuer les inondations dans le bassin versant du lac Champlain et de la rivière Richelieu. La CMI y recommandait en premier lieu de créer un groupe de travail binational pour coordonner les études sur les inondations des deux côtés de la frontière internationale, mettre au point des techniques perfectionnées de surveillance et élaborer des modèles de réponse physique, socio-économique et écologique. Les administrations locales étaient encouragées à intervenir par la mise en œuvre de pratiques exemplaires de gestion et la mise en place d'une culture de préparation et de résilience face aux crues. La CMI recommandait enfin de renforcer des mesures coordonnées de préparation, de prévision et d'intervention de la part des municipalités, des États, du Québec et des gouvernements fédéraux.

En se fondant sur le plan d'étude de 2013, la CMI a formulé un ensemble de recommandations aux gouvernements, dont la mise en œuvre de la modélisation hydrologique et hydraulique du bassin versant. Dans cette optique, le plan d'étude précisait les éléments de base nécessaires à un système en temps réel de prévision des crues et de cartographie des inondations. Ces éléments sont résumés ci-dessous :

1. des prévisions météorologiques comprenant des estimations à haute résolution des vents, des précipitations et des températures ainsi qu'une évaluation précise du manteau neigeux;
2. un modèle altimétrique numérique (MAN) de la plaine inondable (résolution horizontale de 1 m, résolution verticale de 0,25 m) et des caractéristiques géophysiques du bassin versant (résolution horizontale de 100 m et résolution verticale de 1 m);
3. une capacité de modélisation hydrologique pour faire le plus tôt possible une estimation des débits entrants dans le bassin versant;
4. une capacité de modélisation hydraulique pour simuler la réaction du lac Champlain et de la rivière Richelieu aux débits entrants et aux vents prévus.

## **1.2 Portée et organisation de ce travail**

Les 24 et 31 juillet 2014, les gouvernements des États-Unis et du Canada, en vertu de l'article IX du Traité des eaux limitrophes, ont respectivement demandé l'aide de la CMI pour la mise en œuvre de deux volets du plan d'étude de juillet 2013 concernant le lac Champlain et la rivière Richelieu. Les deux volets adaptables du plan d'étude que la CMI doit entreprendre et réaliser sont les suivants :

1. S'attaquer aux lacunes en matière de données et les combler par la collecte et l'harmonisation, selon les besoins, de données sur la topographie, la bathymétrie, la végétation aquatique et la texture des sols, de données LIDAR, ainsi que de données climatiques et hydrométriques d'observation (conformément à la section 3.1, page 38, du

plan d'étude de juillet 2013), en vue du lancement le plus rapide possible du système en temps réel de prévision des crues et de cartographie des zones inondées. Ce système suppose l'élaboration de nouveaux modèles hydrologiques et hydrauliques en temps réel pour le lac Champlain et la rivière Richelieu, afin de prévoir les niveaux d'eau du lac et de la rivière, ainsi qu'un MAN précis de la plaine inondable pour délimiter les contours des zones inondées correspondantes.

2. Créer des cartes statiques d'inondation en utilisant une combinaison de données anciennes et nouvelles, de même qu'en recourant à la modélisation, pour fournir de l'information pratique aux collectivités. Ces cartes montreront les zones qui seraient touchées si les niveaux d'eau du lac Champlain et de la rivière Richelieu atteignaient diverses hauteurs.

L'*annexe 1* contient les lettres de renvoi adressées à la CMI par les gouvernements des États-Unis et du Canada.

En réponse au renvoi commun des gouvernements, la CMI a rédigé une directive pour mettre sur pied le groupe de travail technique international du lac Champlain et de la rivière Richelieu (GTT), lui confier le mandat d'examiner les questions que les gouvernements ont soumises à la Commission mixte internationale au sujet des débordements du lac Champlain et de la rivière Richelieu dans leurs lettres de renvoi des 24 et 31 juillet 2014, et lui demander d'en faire rapport à la Commission pour septembre 2015. La directive figure en *annexe 2*.

Le GTT a travaillé à combler certaines lacunes dans des aspects précis des éléments nécessaires pour un futur système de prévision (volet n° 1 de la directive). Il est à noter que la mise en œuvre effective d'un système opérationnel coordonné et en temps réel de prévision des crues et de cartographie des inondations pour le bassin versant du lac Champlain et de la rivière Richelieu déborde le cadre de cette directive. La présente étude a exclusivement porté sur l'analyse des éléments scientifiques généraux et sur les exigences de coordination concernant des systèmes appropriés de prévision. Elle a aussi consisté à combiner des données et modèles préexistants et nouveaux pour produire des cartes statiques d'inondation selon des scénarios précis (volet n° 2 de la directive).

Les différentes tâches accomplies dans le cadre de ce projet découlent du plan de travail approuvé par la CMI, accessible dans le site Web de la CMI (<http://ijc.org/fr /LCRRTWG>).

Voici les tâches qui ont été jugées nécessaires pour satisfaire à la directive de la CMI :

Tâche 1-1 : Évaluation de la qualité des prévisions des vents de surface et des analyses des précipitations pour le bassin versant du lac Champlain et de la rivière Richelieu

Tâche 1-2 : Création d'un modèle hydrodynamique expérimental 2D du lac Champlain en utilisant les données bathymétriques existantes

Tâche 1-3 : Création d'un mécanisme de coordination pour échanger des données présentant un intérêt

Tâche 1-4 : Recommandation d'une approche pragmatique pour le futur système opérationnel en temps réel de prévision des crues et de cartographie des inondations pour le lac Champlain et de la rivière Richelieu

Tâche 1-5 : Collecte et traitement de données LIDAR pour le lac Champlain

Tâche 1-6 : Résolution des différences dans les données altimétriques utilisées de part et d'autre de la frontière entre les États-Unis et le Canada

Tâche 1-7 : Collecte de nouvelles données dans le lac et dans le bassin versant pour contribuer à la création d'un système de prévision des crues et de cartographie des inondations

Tâche 1-8 : Collecte de nouvelles données sur les substrats, les assemblages et la répartition des plantes aquatiques dans la rivière Richelieu, entre Saint-Jean-sur-Richelieu et Rouses Point sur le lac Champlain

Tâche 2-1 : Consolidation et harmonisation des données américaines à utiliser pour la modélisation

Tâche 2-2 : Création d'un modèle altimétrique numérique (MAN) à qualité contrôlée, à partir des ensembles de données LIDAR le long de la rivière Richelieu et de la baie Missisquoi du lac Champlain

Tâche 2-3 : Création d'un modèle hydraulique 2D de la rivière Richelieu, entre Rouses Point et Sorel

Tâche 2-4 : Création de cartes statiques d'inondation pour les rives du lac Champlain et de la rivière Richelieu

Le présent rapport résume les tâches accomplies dans le cadre de l'étude. L'ordre dans lequel les résultats sont présentés n'est pas le même que celui de la liste de tâches ci-dessus, mais chaque section du rapport mentionne le numéro de la tâche correspondante dans le plan de travail. Lorsque requis, les membres clés du GTT ont produit des rapports techniques qui constituent donc le principal résultat de certaines tâches. Le présent rapport contient des renvois à ces rapports techniques.

Des cartes statiques d'inondation ont été produites sous forme électronique. Elles peuvent être consultées dans le site Web de la CMI, à l'adresse <http://arcg.is/1MhXui2>.

Le GTT a également défini une démarche de réalisation d'un système futur de prévision des crues et de cartographie des inondations qui tirerait parti des progrès récents réalisés dans les deux pays en matière de prévision météorologique numérique pour produire des prévisions probabilistes de crues.

Le GTT était constitué d'un nombre égal de membres de chaque pays. Il avait à sa tête deux coprésidents nommés par la CMI pour organiser les travaux du GTT, assurer la coordination avec la Commission et lui faire rapport. L'*annexe 3* donne la liste des membres du GTT.

La CMI a conclu un accord avec le *New England Water Science Center* (Centre des sciences de l'eau de la Nouvelle-Angleterre) de l'USGS (*United States Geological Survey* – Commission géologique des États-Unis) pour la réalisation de la partie américaine du travail technique défini dans le plan de travail. La Commission a également signé un contrat avec le LCBP (*Lake Champlain Basin Program* – Programme du bassin du lac Champlain) pour effectuer les tâches administratives commandées par les coprésidents ou par le GTT dans son ensemble : appui logistique pour les réunions et les conférences téléphoniques, établissement du procès-verbal des réunions, aide à la présentation d'exposés, communications avec les partenaires locaux et

régionaux, information du public, stockage et accès aux données, etc. Le GTT a travaillé de concert avec la CMI, fournissant des évaluations techniques, de l'aide et des conseils sur la meilleure manière d'effectuer l'étude scientifique dans les limites de budget et de temps fixées dans les renvois des gouvernements. La CMI a en outre mis à la disposition du GTT une personne supplémentaire pour fournir au besoin des services en français et apporter son concours aux tâches administratives du groupe de travail.

L'étude scientifique a bénéficié de collaborations existantes et de mécanismes gouvernementaux en place des deux côtés de la frontière, dont des travaux effectués à l'échelle provinciale ou d'États.

### Calendrier

Les gouvernements ont demandé à la CMI de produire un rapport final sur toutes les nouvelles activités au plus tard en septembre 2015. Cependant, le GTT a senti le besoin de consulter un ensemble ciblé d'organismes parties prenantes et d'usagers à propos des produits résultant de ses travaux, dont les cartes statiques d'inondation, avant de parachever son rapport à la CMI au plus tard le 30 novembre 2015. De plus, avant de tenir ces consultations, le GTT a dû rassembler, revoir et commenter les divers chapitres du rapport, rédigés par différents membres de l'équipe binationale et dont certains doivent être traduits.

Pour faire en sorte de fournir aux gouvernements un produit de la plus grande qualité possible, la CMI a consenti à ce que le GTT organise au cours de la première semaine de novembre 2015 des consultations de parties prenantes et d'usagers choisis.

## **1.3 Communication du plan et des résultats du projet**

Des renseignements généraux sur le GTT, notamment son mandat, sa composition, son plan de travail et ses tâches, ont été versés à l'intention du public dans une section spécifique du site Web de la CMI, à l'adresse <http://ijc.org/fr /LCRRTWG>.

Le rapport final approuvé de la CMI sera également accessible dans cette section. Les nouvelles cartes d'inondation sont aussi disponibles dans le site Web de la CMI, à l'adresse <http://arcg.is/1MhXui2>. Ces cartes interactives montrent les contours de la plaine inondable selon 11 scénarios de crue.

Des rapports d'étape portant sur l'avancement des diverses tâches prévues ont été présentés par les coprésidents aux réunions semi-annuelles de la CMI tenues à Washington (en avril 2015) et à Ottawa (en octobre 2015).

Un projet de futur système opérationnel en temps réel de prévision des crues et de cartographie des inondations a été présenté à des experts au cours d'un atelier technique tenu en marge du congrès de l'IAGLR (*International Association for Great Lakes Research* – Association internationale pour la recherche sur les Grands Lacs) le 27 mai 2015, à Burlington, dans le Vermont (voir l'*annexe 4*). Les intrants des experts ont permis de perfectionner la démarche proposée.

Des usagers des prévisions et des cartes ainsi que d'autres parties prenantes ont été invités à des séances spéciales les 3 et 4 novembre 2015 à Burlington, dans le Vermont, et à Saint-Jean-sur-Richelieu, au Québec.

## 2 Collecte et élaboration des données

Les discussions préliminaires au sein du GTT ont permis de définir des lacunes qui pourraient être immédiatement comblées dans les données, en vue de la mise en place d'un futur système opérationnel en temps réel de prévision des crues et de cartographie des inondations pour le lac Champlain et la rivière Richelieu. Voici les tâches correspondantes dans ce domaine :

- collecte et traitement de données LIDAR pour le lac Champlain;
- collecte de nouvelles données dans le lac et dans le bassin versant pour contribuer à la création d'un système de prévision des crues et de cartographie des inondations;
- collecte de nouvelles données sur les substrats, les assemblages et la répartition des plantes aquatiques dans la rivière Richelieu, entre Saint-Jean-sur-Richelieu et Rouses Point sur le lac Champlain;
- création d'un mécanisme de coordination pour échanger des données présentant un intérêt;
- consolidation et harmonisation des données américaines à utiliser pour la modélisation du lac et de la rivière;
- résolution des différences dans les données altimétriques utilisées de part et d'autre de la frontière entre les États-Unis et le Canada, en vue de l'utilisation de données communes.

Les sections qui suivent résument les travaux accomplis pour effectuer ces tâches.

### 2.1 Collecte et traitement de données LIDAR pour le lac Champlain

Remarque : Ces travaux correspondent à la tâche 1-5 définie dans le plan de travail du GTT.

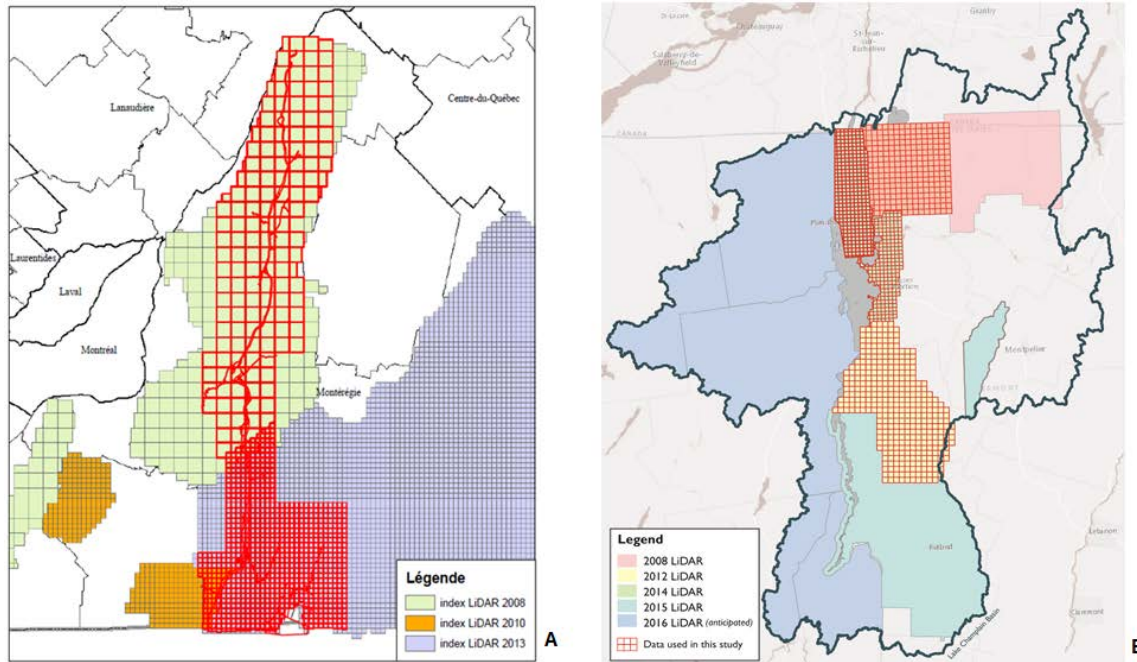
La collecte, le traitement et la mise au point de nouvelles données LIDAR procureront une base de données LIDAR complète pour le bassin du lac Champlain dans les États de New York et du Vermont. Il y a déjà une base de données LIDAR complète pour les portions canadiennes du bassin versant du lac Champlain et de la rivière Richelieu (voir la figure 2.1.1). L'USGS a accordé un contrat pour la collecte de données LIDAR de grande qualité dans des parties du bassin du lac Champlain dans l'État de New York. Cela faisait partie d'une entreprise de plus grande envergure visant la collecte et le traitement de données LIDAR dans les comtés de Clinton et d'Essex ainsi que dans d'autres territoires, pour un total d'environ 2 670 milles carrés dans l'État de New York. (Cet effort a en outre bénéficié en partie de la collecte de données LIDAR dans les comtés de Washington et de Warren, dans le cadre du programme de SIG de l'État de New York.) La collecte de données dans l'État de New York se fait avec une précision verticale de 9,25 cm. Le MAN résultant produit aura une résolution de 1,0 m<sup>2</sup>.

La collecte de données LIDAR dans l'État de New York s'est terminée le samedi 9 mai 2015. Les travaux sur le terrain pour les levés de surface étaient essentiellement complétés à la fin août 2015. Le traitement et le contrôle de qualité des données LIDAR devraient être terminés en janvier 2016, et l'acceptation des produits par l'USGS est prévue d'ici la fin février 2016.

Dans le Vermont, la collecte de données LIDAR dans le bassin du lac Champlain s'est poursuivie sur plusieurs années, de l'automne 2008 à 2015. Certaines données restent à venir et devraient être recueillies à l'automne 2015, sous réserve des conditions météorologiques. Les



spécifications et exigences relatives aux données LIDAR pour le Vermont ont évolué au cours de ces travaux. Les premiers travaux ont donné une précision verticale de 18 cm et ont produit un MAN ayant une résolution de 1,6 m<sup>2</sup>. Les travaux actuels sont menés avec une précision verticale de 9,25 cm. Le MAN produit aura une résolution de 0,7 à 1,6 m<sup>2</sup>, car il résultera de multiples sources de données. En supposant que la collecte de toutes les données soit terminée en 2015, le traitement des données LIDAR du Vermont sera complété en 2016.



**Figure 2.1.1 – Cartes des travaux de collecte de données LIDAR et des données utilisées pour ce projet, pour le Canada (A) et les États-Unis (B)**

Même si les données de tout le Vermont ne sont pas disponibles pour les tâches liées à ces travaux de la CMI, les données LIDAR recueillies relativement aux régions limitrophes du lac Champlain ont été traitées et livrées à titre de produit préliminaire pour les fins des cartes d’inondation. Ces données sont exactes, mais elles seront remplacées lorsque le contractant aura terminé la collecte des données.

Lorsque les données LIDAR seront complètes pour la partie américaine du bassin, un travail supplémentaire sera nécessaire pour créer une base de données LIDAR cohérente et homogène pour l’ensemble du bassin versant du lac Champlain et de la rivière Richelieu. L’existence d’une base de données fusionnée unique facilitera dans l’avenir la modélisation du bassin et la prévision des crues. Les données LIDAR complètes seront conservées dans divers bureaux de SIG des États et accessibles à partir du site Web de la

CMI : <http://ijc.maps.arcgis.com/home/webmap/viewer.html?webmap=512478504bbf4d33a8252710ccdff732>

## 2.2 Collecte de nouvelles données dans le lac et dans le bassin versant pour contribuer à la création d'un système de prévision des crues et de cartographie des inondations

Remarque : Ces travaux correspondent à la tâche 1-7 définie dans le plan de travail du GTT.

Deux activités de collecte de données sur le lac et ses affluents ont permis d'obtenir des données servant aux tâches de modélisation et d'évaluation. La première activité a consisté à compiler les données existantes sur les débits d'entrée des affluents et le niveau d'eau du lac, afin d'appuyer les simulations stationnaires d'Environnement Canada (EC) pour le lac Champlain; l'USGS a fourni les données sur le niveau d'eau et le débit provenant de 25 limnimètres et fluviomètres, afin d'aider EC à déterminer la répartition des débits entre des affluents majeurs du lac Champlain. Dans le cadre de cet effort, l'USGS a fourni :

- des données fluviométriques quotidiennes et aux 15 minutes (avec la zone de drainage, la longitude et la latitude);
- des données saisonnières et annuelles (moyennes et médianes) sur les débits et les niveaux d'eau.

Les saisons étaient définies comme suit :

Hiver : du 1<sup>er</sup> décembre au 28 février

Printemps : du 1<sup>er</sup> mars au 31 mai

Été : du 1<sup>er</sup> juin au 31 août

Automne : du 1<sup>er</sup> septembre au 30 novembre

La seconde activité a consisté en l'installation et l'exploitation par l'USGS de deux nouvelles stations limnimétriques sur le lac Champlain. Ces stations sont situées à Port Henry, NY, et à l'est de Grand Isle (ou South Hero Island), VT. La figure 2.2.1 montre les stations limnimétriques de Port Henry (A) et de Grand Isle (B). Le GTT a donné son aval à ces deux endroits, les considérant comme les plus souhaitables pour l'installation de nouvelles stations limnimétriques en vue de la réalisation d'un modèle bidimensionnel (2D) du lac Champlain et pour des prévisions futures des crues. La station de Port Henry comble quant à elle une lacune spatiale des données entre les stations limnimétriques de l'USGS à Whitehall, NY, et à Burlington, VT.

La station limnimétrique de Grand Isle (ou South Hero Island) est située près de la partie sud de ce que l'on appelle la « mer intérieure », une grande portion du nord-est du lac Champlain, qui est hydrauliquement reliée au corps principal du lac, mais qui réagit différemment, en raison de la présence de multiples ponts-jetées reliant certaines des îles du lac Champlain entre elles et à la terre ferme dans le Vermont. Avec la station limnimétrique canadienne existante située dans la baie Missisquoi à Philipsburgh, la station limnimétrique de Grand Isle permettra de quantifier les effets de dénivellation dus au vent dans la partie dite « mer intérieure » du lac Champlain.

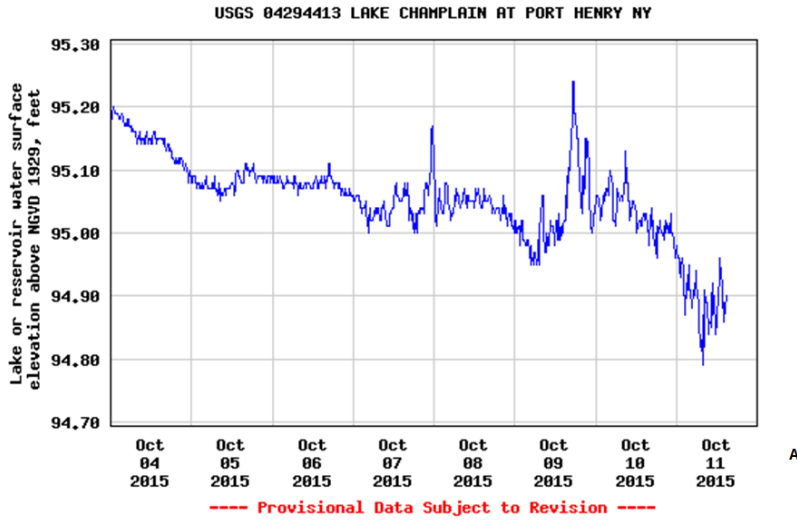


**Figure 2.2.1 – Stations limnimétriques de Port Henry (A) et de Grand Isle (B) sur le lac Champlain**

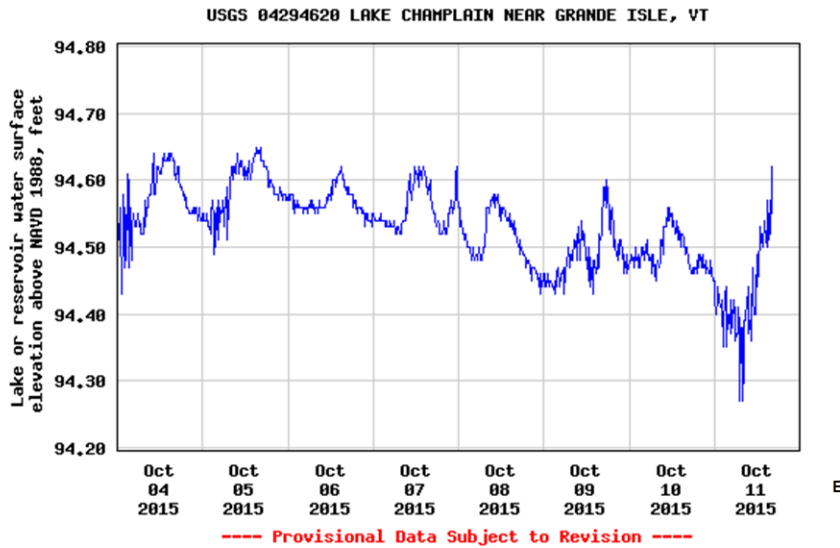
Les deux stations limnimétriques (de Port Henry et de Grand Isle) étaient opérationnelles avant la mi-avril 2015. Elles ont recueilli aux 15 minutes des données sur le niveau d'eau du lac. Ces données ont été transmises presque en temps réel (avec un délai d'une heure) et versées dans la page Web publique du NWIS (*National Water Information System – Système national d'information sur les eaux*) de l'USGS. La figure 2.2.2 1 (*produite à partir d'un affichage en anglais seulement*) présente les graphiques du niveau d'eau du lac aux deux stations pendant une période de collecte de données. Les données météorologiques, dont la vitesse et la direction des vents, la température de l'air et les précipitations, ne sont recueillies qu'à la station de Port Henry, car il y a déjà une station de surveillance météorologique à Grand Isle.

Toutes les données limnimétriques et météorologiques de ces deux stations seront revues, vérifiées et mises au point par l'USGS avant d'être notées comme données ayant passé avec succès le contrôle de qualité dans la base de données du NWIS de l'USGS.

**Lake or reservoir water surface elevation above NGVD 1929, feet**  
 Most recent instantaneous value: 94.90 10-11-2015 14:45 EST



**Lake or reservoir water surface elevation above NAVD 1988, feet**  
 Most recent instantaneous value: 94.55 10-11-2015 16:15 EDT



**Figure 2.2.2 – Niveaux d’eau du lac Champlain aux stations limnimétriques de Port Henry New York (A) et de Grand Isle Vermont (B), du 4 au 11 octobre 2015**

Note explicative : Entête et axe des y: Altitude de la surface de l’eau du lac ou du réservoir, selon NGVD 1929 ou NGVD 1988, en pieds - Valeur instantanée la plus récente; heure avancée de l’est (EDT) ou heure normale de l’est (EST). Au bas : Données provisoires susceptibles d’être révisées.

## 2.3 Collecte de nouvelles données sur les substrats, les assemblages et la répartition des plantes aquatiques dans la rivière Richelieu, entre Saint-Jean-sur-Richelieu et Rouses Point sur le lac Champlain

Remarque : Ces travaux correspondent à la tâche 1-8 définie dans le plan de travail du GTT.

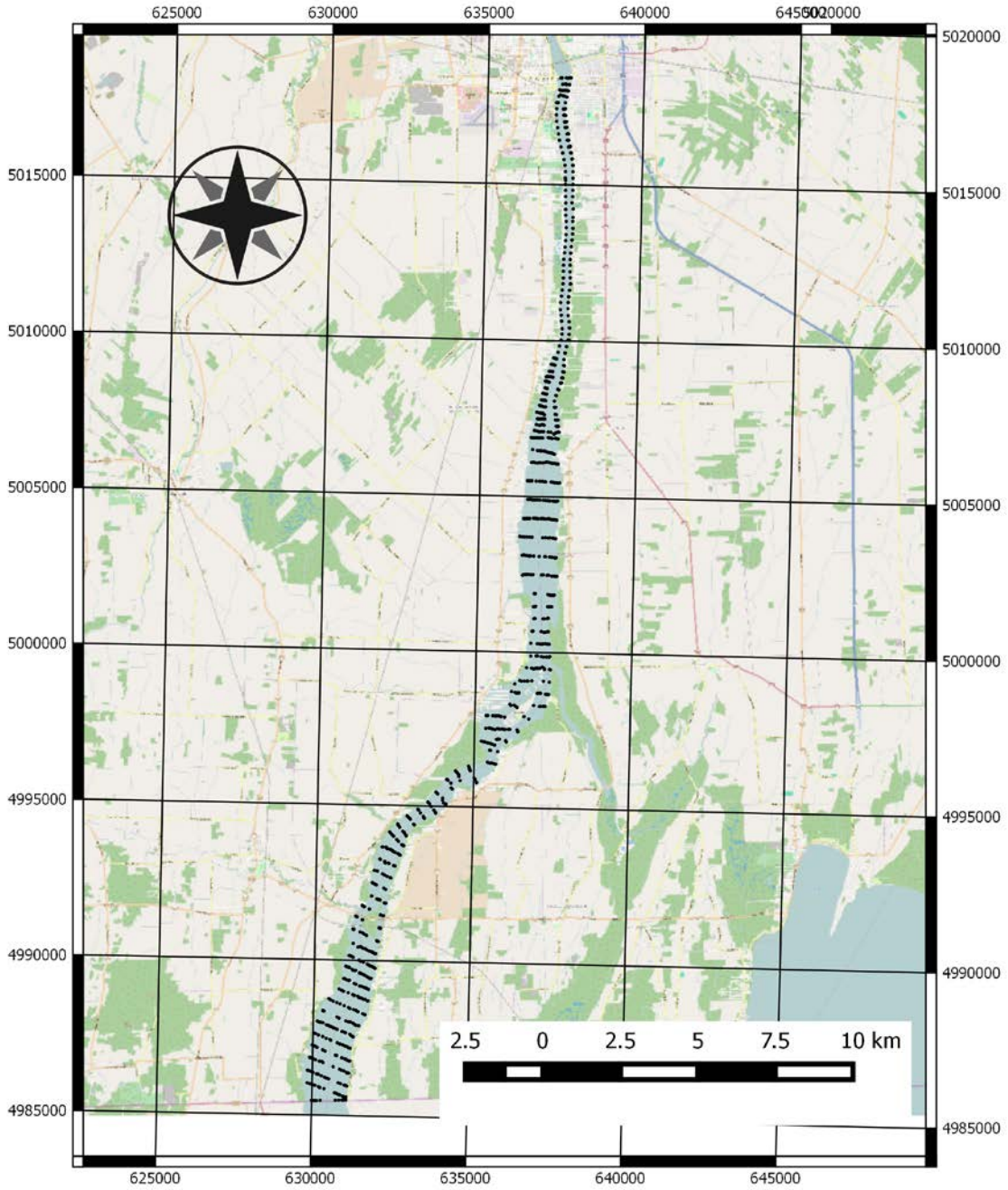
Une campagne de 7 jours de travaux sur le terrain a été menée pour recueillir des données sur le substrat et les plantes aquatiques immergées sur une portion de 35 km de la rivière Richelieu, entre le pont Gouin à Saint-Jean-sur-Richelieu et la frontière internationale près de Rouses Point. Cette campagne a eu lieu entre les 8 et 17 septembre 2015.

Des levés ont été effectués sur des coupes transversales espacées de 200 m, sur une distance de 2 km à partir du pont Gouin en allant vers l'amont. Puis, de là jusqu'à la frontière, les coupes transversales ont été espacées de 400 m, en raison de la plus grande simplicité de la topographie. La collecte de données s'est poursuivie pendant une dernière journée le 5 octobre 2015, pour couvrir la portion de la rivière allant du pont Gouin jusqu'à la section de contrôle hydraulique naturel de Saint-Jean-sur-Richelieu. Située en aval du pont Gouin, cette portion a une longueur d'environ 1 km. La figure 2.3.1 montre les lignes des levés effectués lors de ces travaux sur le terrain.

Différentes techniques, adaptées aux conditions locales, ont permis d'identifier les espèces végétales et d'en déterminer la densité : observation visuelle directe, observation à l'aide d'une caméra sous-marine, analyse de signaux d'un échosondeur, prélèvement d'échantillons de plantes. Ces observations ont permis de noter la densité des plantes, la composition de la flore, le poids relatif de chaque espèce ainsi que la hauteur en mètres de la végétation, et ce pour des points d'échantillonnage dont les coordonnées GPS (géopositionnement par satellite) étaient connues avec précision. Des données de 951 points d'observation ont été recueillies.

De manière générale, des plantes aquatiques immergées étaient présentes en eau peu profonde, mais absentes lorsque la profondeur dépassait 2,5 m (8 pi) près de Saint-Jean-sur-Richelieu. En remontant le cours de la rivière en direction de la frontière, la profondeur à laquelle il n'y avait plus de plantes augmentait à 3,5 m (12 pi). Pendant la campagne de travaux sur le terrain, le débit de la rivière était d'environ 190 m<sup>3</sup>/s, et le niveau d'eau à Rouses Point était d'environ 27,80 m (95,20 pi – NGVD 29). Les espèces de plantes aquatiques observées sur le terrain comprennent *Heterothera dubia*, *Vallisneria Americana*, *Myriophyllum spicatum*, *Myriophyllum verticillatum*, *Potamogeton pectinatus*, *Potamogeton richardsonii*, *Alisma gramineum* et *Elodea Canadensis*.

Les points d'échantillonnage sont plus espacés dans le cas du substrat, parce que celui-ci présente une moins grande variabilité et que davantage de temps a été consacré aux plantes aquatiques immergées. Les observations à l'aide de caméras ont été complétées par quelques prélèvements d'échantillons. En général, le substrat en amont du pont Gouin est formé de sable fin et de silt. Quelques petits blocs, d'un diamètre d'environ 30 cm, ont aussi été observés. Les coordonnées précises de ces échantillons sont également disponibles. Le substrat est beaucoup plus grossier en aval du pont Gouin, à l'approche de la section de contrôle hydraulique naturel de Saint-Jean-sur-Richelieu, où il y a beaucoup de blocs en raison de la plus grande vitesse du courant.



**Figure 2.3.1 – Emplacement des points d’observation de plantes aquatiques sur la rivière Richelieu**

## 2.4 Création d'un mécanisme de coordination pour échanger des données présentant un intérêt

Remarque : Ces travaux correspondent à la tâche 1-3 définie dans le plan de travail du GTT.

Le plan d'étude de 2013 demandait la création d'une base de données géophysiques communes pour l'ensemble du bassin versant du lac Champlain et de la rivière Richelieu. Le besoin d'un ensemble commun de données établi en collaboration a été réitéré dans la section 1 du renvoi de la CMI en 2014 qui a mis sur pied le GTT. Dans le but d'atteindre cet objectif, un mécanisme de coordination facilitant les échanges de données produites dans les deux pays a commencé à fonctionner en décembre 2014, sous la direction du LCBP (*Lake Champlain Basin Program – Programme du bassin du lac Champlain*). Le LCBP était particulièrement apte à accomplir cette tâche, puisqu'il avait été créé en 1990 avec des partenariats étroits dans les trois territoires couvrant le bassin versant. Le LCBP est donc en mesure de faciliter les échanges de données.

Un site FTP (*File Transfer Protocol – Protocole de transfert de fichiers*) a été mis sur pied en janvier 2015 pour faciliter la collaboration et les échanges d'information au sein du groupe de travail technique. Les membres du groupe de travail ont versé dans ce site FTP les données et l'information pertinentes pour les modèles de prévision des crues et les cartes statiques d'inondation. Le LCBP a facilité la collecte des modèles altimétriques ayant la résolution la meilleure et les plus à jour de la surface du sol et du fond du lac. Les ensembles de données disponibles dans le site FTP comportent les éléments suivants : observations des précipitations, températures, vents, niveaux d'eau, débits entrants; données topométriques et bathymétriques; analyses des précipitations; résultats des modèles de prévisions météorologiques, hydrologiques et climatiques. En raison des limites inhérentes au site FTP, le LCBP a également coordonné le transfert direct de données, notamment la transmission de toutes les données LIDAR disponibles aux membres du groupe de travail. La création de nouveaux ensembles de données est abordée dans les sections portant sur d'autres tâches.

Des données ont été obtenues et compilées à partir de sources diverses, dont des autorités fédérales, d'États, provinciales et non gouvernementales. En raison de la nature variée des données (présence d'information à la fois spatiale et temporelle), il n'y a pas eu de transformation en une forme commune. Par contre, tout a été mis en œuvre pour produire des données harmonisées et propres au bassin versant. Les ensembles de données mis en commun sont décrits plus en détail à la section suivante, qui correspond à la tâche 2-1.

De plus, le LCBP a coordonné les échanges d'ensembles de données nouveaux et dérivés, le partage de résultats de modèles ainsi que les communications au sein du groupe de travail, en vue d'atteindre les objectifs de cette tâche. Une fois par mois, le LCBP a rendu compte à la CMI des communications au sein du groupe de travail et des progrès accomplis en matière d'échange de données, pour faire en sorte que toutes les parties soient bien informées tout au long de leurs travaux. Le LCBP a également facilité les conférences téléphoniques mensuelles du groupe de travail et les communications pendant toute la durée du projet.

## 2.5 Consolidation et harmonisation des données américaines

Remarque : Ces travaux correspondent à la tâche 2-1 définie dans le plan de travail du GTT.

L'USGS a inventorié, compilé et évalué les données sur le bassin du lac Champlain aux États-Unis en vue des prévisions et de la modélisation futures des crues du lac. Des données portaient sur la bathymétrie, les vents, les vagues, le manteau neigeux, l'évaporation des eaux du lac, les structures influençant les niveaux d'eau et les débits, les tendances concernant les débits entrants des affluents, ainsi que sur d'autres aspects recommandés par le GTT et par d'autres intervenants. Le LCBP a aidé l'USGS à compiler ces données et à les rendre accessibles au groupe de travail technique. L'USGS décrit les données, les sources et les limites énumérées ci-dessous. Les données nécessaires à l'élaboration des cartes d'inondation pour le lac Champlain ont aussi été recueillies de manière à ce que les cartes soient produites à partir d'un ensemble homogène de données.

Voici les données qui ont été mises en commun :

- MAN homogène de l'ensemble national de données altimétriques des États-Unis pour le bassin du lac Champlain
  - Sources des données : USGS
  - Année d'acquisition : 2008
  - Résolution : 10 m (horizontale); 1,55 m (verticale)
- Données LIDAR pour les parties du bassin du lac Champlain situées dans le Vermont
  - Sources des données : USGS
  - Années d'acquisition : 2008, 2010, 2012, 2014
  - Résolution : de 0,7 m à 1,6 m (horizontale)
- Plans des ponts et ponts-jetées qui traversent le lac Champlain, tels qu'ils sont construits
  - Sources des données : *Vermont Agency of Transportation* (Agence des transports du Vermont)
  - Année d'acquisition : 2010
- 2012 Bathymétrie du lac Champlain
  - Sources des données : *Université Middlebury College*
  - Résolution : 10 m (horizontale)
  - Année d'acquisition : 2012
- Données hydrométriques de tous les affluents du lac Champlain et données limnimétriques du lac lui-même pour la partie américaine du bassin du lac Champlain
  - Sources des données : USGS
  - Résolution : aux 15 minutes et moyenne quotidienne
  - Années d'acquisition : 2007-2015
- Données hydrométriques des fluviomètres d'Hydro-Québec sur la rivière Richelieu
  - Sources des données : Hydro-Québec
  - Résolution : aux 15 minutes et moyenne quotidienne
  - Années d'acquisition : 2007-2015



- Cartes des plaines inondables produites par la FEMA (*Federal Emergency Management Agency* – Agence fédérale des situations d’urgence) pour les États du Vermont et de New York
  - Sources des données : FEMA
  - Résolution : 10 m (horizontale)
  - Année d’acquisition : 2014
- Données météorologiques pour le lac Champlain
  - Sources des données : *Vermont Monitoring Cooperative* (Coopérative de surveillance du Vermont)
  - Résolution : aux 15 secondes, aux 15 minutes et quotidienne
  - Années d’acquisition : 2007-2015

## 2.6 Établissement des facteurs de correction nécessaires pour la notation des niveaux d’eau selon un système commun de référence altimétrique

Remarque : Ces travaux correspondent à la tâche 1-6 définie dans le plan de travail du GTT et sont décrits en détail dans le rapport technique suivant :

FLYNN, R.H, P.H. RYDLUND et D.J. MARTIN. *Levé du Système mondial de navigation par satellite pour l'harmonisation des référentiels américain et canadien dans le bassin du lac Champlain*, rapport de recherche scientifique 2016-XXXX de la Commission géologique des États-Unis, projet de rapport présenté à la Commission mixte internationale, 2015, 27 p.

En raison du hiatus entre les données altimétriques du Canada et celles des États-Unis, une transformation des niveaux d’eau est nécessaire pour pouvoir travailler avec des données altimétriques communes, afin de répondre aux besoins du GTT en matière de modélisation hydraulique et de prévision des crues pour le lac Champlain et la rivière Richelieu. Les facteurs de correction établis dans le cadre de cette tâche ont servi à ajuster les observations de niveaux d’eau pour les travaux de modélisation hydraulique décrits à la section 3.2 de ce rapport.

À la fin 2013, Ressources naturelles Canada a procédé au lancement d’un nouveau système de référence altimétrique fondé sur le géoïde, qui remplace le système canadien de référence altimétrique de 1928 (CGVD28). Ce dernier était défini par rapport au niveau moyen de la mer à des stations de marégraphe, plus précisément celle de Pointe-au-Père. Le nouveau Système canadien de référence altimétrique de 2013 (CGVD2013), fondé à 100 % sur le géoïde, est défini par la surface équipotentielle  $W_0 = 62636856,0 \text{ m}^2/\text{s}^2$ . Cette surface, approuvée par les NGS (*National Geodetic Survey* – Levés géodésiques nationaux des États-Unis) et les Levés géodésiques du Canada (LGC) en 2012, correspond au potentiel moyen du niveau moyen de la mer à un ensemble de stations de marégraphe du Canada et des États-Unis. Le nouveau système de référence altimétrique est matérialisé par le modèle canadien du géoïde gravimétrique de 2013 (CGG2013).

Aux États-Unis, le système de référence altimétrique nord-américain de 1988 (NAVD 88 pour *North American Vertical Datum of 1988*), système hybride fondé sur le géoïde et sur des observations du niveau moyen de la mer, a été choisi en 1993 comme système de référence

altimétrique officiel du NSRS (*National Spatial Reference System* – Système national de référence spatiale) pour les États contigus des États-Unis ainsi que l’Alaska, et demeure à ce jour le système de référence altimétrique officiel, remplaçant les NGVD 29 (*National Geodetic Vertical Datum of 1929* – Données géodésiques altimétriques nationales de 1929). Cependant, d’ici 2022, les NGS remplaceront NAVD 88 par un système de référence altimétrique fondé à 100 % sur le géoïde

(<http://www.ngs.noaa.gov/datums/newdatums/FAQNewDatums.shtml#WHEN>). NAVD 88 s’étend jusqu’à un certain point au Canada, y compris dans la vallée de la rivière Richelieu.

Pour résoudre les différences dans les données sur les niveaux d’eau de part et d’autre de la frontière, des membres du personnel de l’USGS, d’EC, ainsi que des Levés géodésiques du Canada et des États-Unis, ont effectué en avril 2015 des travaux sur le terrain en vue de définir une transformation des données altimétriques, de telle sorte que toutes les données sur les niveaux d’eau pour la zone étudiée, à savoir le bassin du lac Champlain et de la rivière Richelieu, soient représentées de manière homogène dans les deux pays. Les lieux précis choisis pour effectuer les corrections des données altimétriques étaient des disques de contrôle de levés ou des marques de référence aux limnimètres et fluviomètres, ainsi que des lieux hydrosensibles dans la plaine inondable du bassin versant du lac Champlain et de la rivière Richelieu. Les mesures effectuées ont servi à définir une transformation des données altimétriques, de telle sorte que toutes les données sur les niveaux d’eau déjà disponibles dans la zone étudiée puissent être rapportées aux systèmes de référence NAVD 88 ou CGVD2013. Des levés ont été effectués à l’aide du GNSS (*Global Navigation Satellite System* – Système mondial de navigation par satellite) pour obtenir des données altimétriques précises au centimètre.

Les levés ont été effectués à 7 stations limnimétriques et fluviométriques (Whitehall, NY; Burlington, VT; Rouses Point, NY; Philipsburg, QC; Saint-Paul-de-l’Île-aux-Noix, QC; Saint-Jean-sur-Richelieu, QC; Sorel, QC) et en 2 lieux hydrosensibles (les barrages de Chambly et de Saint-Ours sur la rivière Richelieu, au Québec).

Les levés effectués à l’aide du GNSS aux 7 stations limnimétriques et fluviométriques ont consisté en des observations simultanées d’une durée de 12 heures le 15 avril 2015, suivies d’observations simultanées d’une durée de 6 heures le 16 avril 2015, dans un but de redondance. Les levés effectués à l’aide du GNSS aux 2 lieux hydrosensibles des barrages de Chambly et de Saint-Ours ont consisté en des observations simultanées d’une durée de 12 heures le 14 avril 2015. Il n’y a pas eu de période de 6 heures d’observations redondantes aux barrages de Chambly et de Saint-Ours.

Les levés effectués à l’aide du GNSS aux 7 stations limnimétriques et fluviométriques ainsi qu’aux 2 lieux hydrosensibles ont été traités aux États-Unis à l’aide du service OPUS (*Online Positioning User Service* – Service de localisation en ligne d’usagers) des NGS et ont été versés dans la base de données OPUS, où leur hauteur au-dessus de l’ellipsoïde permettra dans l’avenir de perfectionner la collecte de données et les modèles.

Les transformations vont de  $-0,27$  à  $-0,52$  pi pour la conversion de NGVD 29 à NAVD 88, et de  $-0,21$  à  $+0,11$  pi pour la conversion de CGVD28 à NAVD 88 (voir le tableau 2.6.1). Il est difficile de savoir si ces transformations suivent un patron spatial bien défini, car on ne sait pas avec quelle précision les levés ont été effectués à l’origine, et qu’il n’y a pas non plus de points pour contraindre les données dans la direction est-ouest. Les résultats montrent une conversion

de -0,06 pi à NAVD 88 à Saint-Jean-sur-Richelieu, mais de +0,07 pi au barrage de Chambly au nord, et de -0,21 pi à Saint-Paul au sud.

Le rapport technique, produit sous la direction de l'USGS en collaboration avec EC, décrit les travaux effectués et leurs résultats, et donne les données altimétriques détaillées pour chacun des stations limnimétriques et fluviométriques, repères et lieux hydrosensibles qui ont fait l'objet de levés.

**Tableau 2.6.1 – Résultats des corrections de données à 7 endroits où des levés ont été effectués**

<b>Numéro de station</b>	<b>Nom du site</b>	<b>Organisme</b>	<b>Type des données publiées</b>	<b>Facteur de correction (à NAVD 88), en pieds</b>
02OJ022	Sorel (Québec), Canada	EC	Altitude, CGVD28	+0,115
02OJ016	Saint-Jean-sur-Richelieu (Québec), Canada	EC	Altitude, CGVD28	-0,061
02OJ036	Saint-Paul-de-l'Île-aux-Noix (Québec), Canada	EC	Altitude, CGVD28	-0,206
02OH001	Philipsburg (Québec), Canada	EC	Altitude, CGVD28	-0,213
04295000	Rouses Point, NY, États-Unis	USGS	Altitude, NGVD 29	-0,431
04294500	Burlington, VT, États-Unis	USGS	Altitude, NGVD 29	-0,523
04279085	Whitehall, NY, États-Unis	USGS	Altitude, NGVD 29	-0,268

### 3 Études portant sur les prévisions météorologiques, la modélisation du lac et de la rivière, ainsi que la création de modèles altimétriques numériques

Le GTT a déterminé 4 études spécifiques importantes en vue d'appuyer la mise au point d'un futur système opérationnel de prévision des crues et de cartographie des inondations pour le bassin versant du lac Champlain et de la rivière Richelieu :

- Évaluation de la qualité des prévisions des vents de surface et des analyses des précipitations pour le lac Champlain et la rivière Richelieu
- Création d'un modèle hydrodynamique expérimental 2D du lac Champlain en utilisant les données bathymétriques existantes
- Création d'un modèle hydraulique 2D de la rivière Richelieu, entre Rouses Point et Sorel
- Création d'un modèle altimétrique numérique (MAN) à qualité contrôlée, à partir des ensembles de données LIDAR le long de la rivière Richelieu et de la baie Missisquoi du lac Champlain

Quatre rapports techniques donnent des détails sur la méthodologie et les résultats de ces études, dont les principales conclusions sont résumées ci-après.

#### 3.1 Évaluation de la qualité des prévisions des vents, des précipitations et de la température

Remarque : Ces travaux correspondent à la tâche 1-1 définie dans le plan de travail du GTT et sont décrits en détail dans le rapport technique suivant :

FORTIN, V., E. GABORIT et M. DIMITRIJEVIC. *Évaluation des prévisions météorologiques aux fins de la prévision des crues du lac Champlain et la rivière Richelieu*, rapport technique rédigé pour le Groupe de travail technique international du lac Champlain et de la rivière Richelieu, 2015, 42 p.

Les systèmes de prévision des crues sont le plus utiles pour le public s'ils permettent de l'avertir suffisamment longtemps à l'avance d'une crue ou d'une décrue possibles. La capacité de prédire les conditions météorologiques qui pourraient entraîner une inondation dépend de l'horizon de prévision requis, de la résolution spatiale des prévisions et des ressources de calcul disponibles.

##### *Évaluation des prévisions de la vitesse des vents*

Des prévisions précises de la vitesse des vents de surface seraient une composante importante d'un modèle futur des crues du lac, car on sait que les vents ont des effets importants sur les niveaux d'eau et les vagues sur les rives du lac. La prévision de la vitesse des vents de surface exige des systèmes de prévision numérique du temps (PNT) fonctionnant à une résolution suffisante pour résoudre les principales caractéristiques topographiques et la rugosité de la surface. Dans le cas du lac Champlain, dont la largeur va jusqu'à 20 km et qui est bordé de chaque côté par d'importantes formations montagneuses, il faut une résolution d'au plus 20 km.

En tenant compte de cette contrainte, le GTT a évalué au regard des observations les prévisions de la vitesse des vents fournies par 4 systèmes de PNT ayant une résolution horizontale de 2,5 à 15 km. Deux stations météorologiques exploitées par la VMC (*Vermont Monitoring Cooperative* – Coopérative de surveillance du Vermont), celles de Colchester Reef et de Diamond Island, ont été choisies pour la qualité et la représentativité de leurs données. Des cas de dénivellation due au vent survenus de 2011 à 2015 ont été choisis pour l'évaluation, en fonction des observations du niveau d'eau aux deux extrémités du lac. Étant donné que le lac est étroit et allongé dans la direction nord-sud, on a mis l'accent sur l'évaluation de la composante nord-sud des vents, qui a normalement les répercussions les plus importantes sur la dénivellation due au vent.

Deux systèmes déterministes de PNT ont été évalués : le Système régional de prévision déterministe (SRDP) (Fillion *et al.*, 2010), dont la résolution horizontale est actuellement de 10 km (elle était de 15 km jusqu'en octobre 2012), et le Système à haute résolution de prévision déterministe (SHRDP) (Bernier et Bélair, 2012), dont la résolution horizontale est de 2,5 km. Les 2 systèmes fournissent actuellement des prévisions sur 48 heures qui sont émises toutes les 6 heures. La comparaison a porté sur 36 événements et a donné une évaluation sur un total de 2 200 paires de prévisions et observations à intervalles d'une heure.

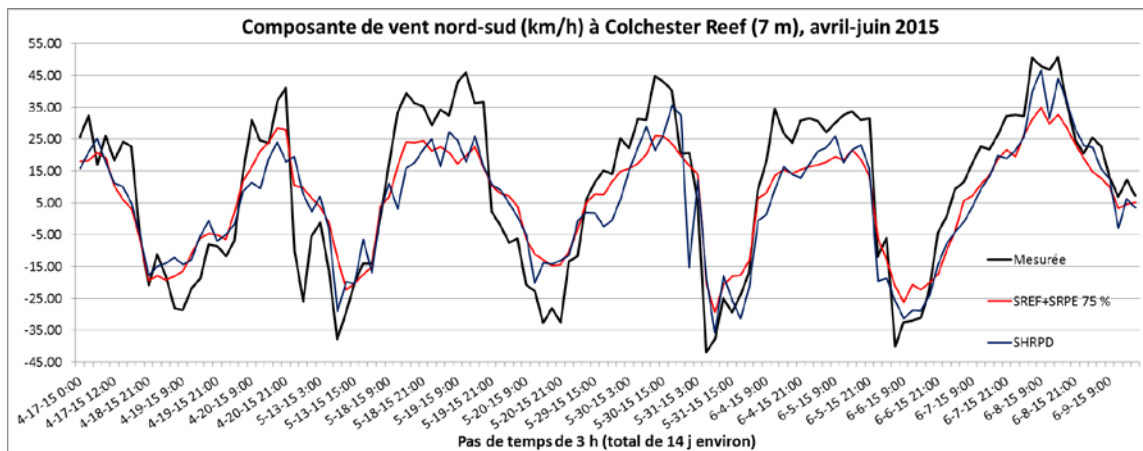
Les résultats de la modélisation de la PNT ont révélé qu'un modèle dont la résolution est meilleure (2,5 km contre 10 à 15 km) entraîne une diminution de 60 % du biais de prévision, mais pas d'augmentation importante du coefficient de corrélation entre les valeurs observées et les valeurs prédites. Le coefficient de corrélation entre les vents prévus et la moyenne horaire observée dans la direction nord-sud était généralement d'au moins 0,90. Par conséquent, même avec une résolution de 15 km, il est possible d'obtenir de bonnes prévisions déterministes des vents, du moins sur un horizon de 48 heures, même si une étape de correction de justesse est nécessaire pour fournir des données d'entrée à un modèle hydrodynamique du lac.

Le bon rendement du système de PNT ayant une résolution horizontale de 15 km en matière de prévision de la vitesse des vents dans la direction nord-sud constitue une bonne nouvelle, parce que cette résolution est la meilleure actuellement disponible pour les systèmes opérationnels de PNT d'ensemble, tant aux États-Unis qu'au Canada. Aux États-Unis, la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration* – Agence américaine d'observation océanique et atmosphérique) exploite le SREF (*Short Range Ensemble Forecasting* – Système de prévisions d'ensemble à court terme) (NOAA EMC, 2004, <http://www.spc.noaa.gov/exper/sref/>), alors qu'EC exploite au Canada le Système régional de prévisions d'ensemble (SRPE) ([http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/cmc/cmci/product\\_guide/submenus/refs\\_f.html](http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/cmc/cmci/product_guide/submenus/refs_f.html)). Les prévisions du SREF sont mises à jour 4 fois par jour et s'étendent sur 3,5 jours, alors que les prévisions du SRPE sont mises à jour 2 fois par jour et s'étendent sur 3 jours. Les deux systèmes produisent des extrants toutes les heures. Les deux systèmes de PNT d'ensemble fournissent 20 scénarios (définis comme des membres d'ensemble) qui visent à représenter l'incertitude des prévisions météorologiques.

Une comparaison des prévisions du SREF et du SRPE sur des événements choisis de 2015 a montré que les deux systèmes ont une capacité de prévision semblable à celle du SRPD, les prévisions du SREF étant légèrement meilleures selon l'analyse des corrélations. Il semble donc possible de prévoir la composante nord-sud des vents sur un horizon de 3 jours à des fins de prévision des crues, mais il faudra mettre au point une procédure d'étalonnage et d'étude des phénomènes de sous-échelle avant que les prévisions des vents puissent servir dans des modèles

hydrodynamiques, étant donné en particulier que les prévisions du SREF et du SRPE ont des biais très différents.

La figure 3.1.1 montre une comparaison des vents observés et des vents prévus (composante nord-sud) à Colchester Reef pour 5 événements survenus d’avril à juin 2015 et qui ont entraîné une dénivellation dans le lac. Une valeur positive correspond à un vent du secteur sud (qui entraîne une hausse du niveau et du débit d’eau à l’embouchure du lac), alors qu’une valeur négative correspond à un vent du secteur nord (qui entraîne une baisse du niveau et du débit d’eau à l’embouchure du lac). La courbe en noir représente la vitesse du vent observée de 15 minutes en 15 minutes. La courbe en bleu représente la prévision déterministe du modèle du SHRDP ayant une résolution de 2,5 km, alors que la courbe en rouge représente la prévision d’ensemble d’une résolution de 15 km obtenue en faisant la moyenne des prévisions du SREF et du SRPE. Dans tous les cas, le délai de prévision est de 0 à 24 heures. Même si le SHRDP prévoit mieux les vents de vitesse plus élevée, la moyenne d’ensemble prévoit très bien la dynamique des événements, et les deux produits (prévisions déterministes et prévisions d’ensemble) bénéficieraient probablement d’une étude des phénomènes de sous-échelle visant à réduire le biais de prévision.



**Figure 3.1.1 – Séries chronologiques des vents prévus (1 jour à l’avance) et des vents observés, à Colchester Reef**

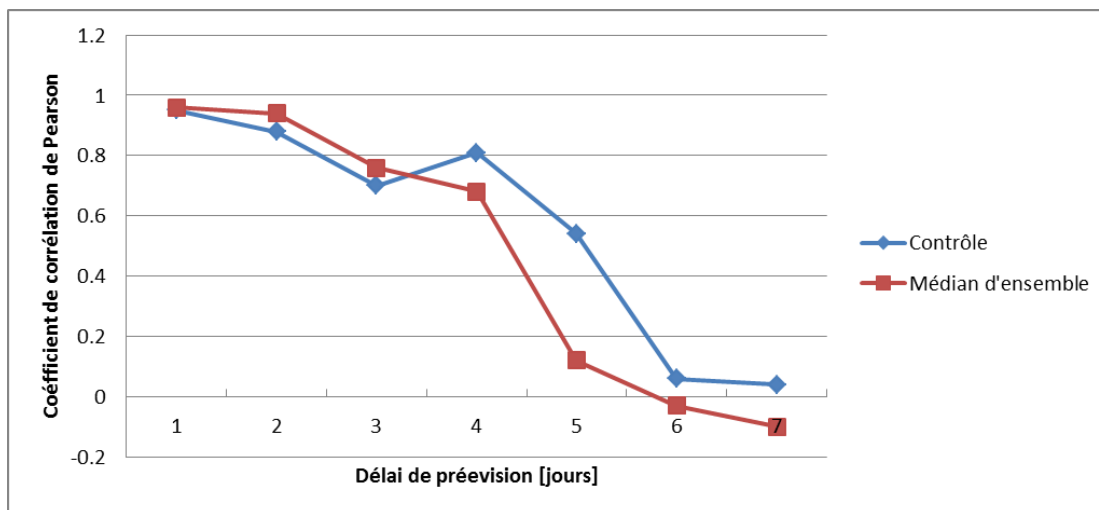
### *Évaluation des prévisions de précipitations*

Alors que des prévisions des vents non biaisées exigent une résolution relativement fine en terrain complexe, on s’attend à pouvoir obtenir des prévisions de précipitations à l’aide de modèles fonctionnant à une résolution spatiale plus faible, et probablement avec une plus longue période de prévision, du moins pour les tempêtes majeures telles que des cyclones extratropicaux ou des systèmes frontaux continentaux. Dans le but d’évaluer les capacités actuelles de prévision des précipitations, le GTT a analysé toutes les tempêtes extratropicales survenues de 2011 à 2014, afin d’identifier celles qui ont affecté la région du lac Champlain. Cinq tempêtes répondant à ces conditions ont été trouvées : Irène (2011), Sandy (2012), Leslie (2012), Andréa (2013) et Arthur (2014). L’ensemble du bassin du lac Champlain, subdivisé en 12 sous-bassins, a été pris en considération sur un total de 42 jours. Deux ensembles de données de référence ont servi à évaluer les prévisions de précipitations : l’analyse des précipitations de stade IV des NCEP (*National Centers for Environmental Prediction* – Centres nationaux de prévisions

environnementales des États-Unis) (Lin et Mitchell, 2005) et CaPA (*Canadian Precipitation Analysis – Analyse des précipitations au Canada*). Les quantités de précipitations rapportées dans les deux sources concordaient bien, de sorte que les moyennes des précipitations quotidiennes provenant des deux sources ont constitué les données d’observation auxquelles les prévisions ont été comparées. Les quantités quotidiennes maximales de précipitations observées dans chacun des 12 sous-bassins pendant ces 42 jours varient de 80 à 120 mm/jour (soit environ 3 à 5 po de pluie).

Le Canada, les États-Unis et le Mexique participent conjointement au système de prévisions d’ensemble nord-américain ([https://meteo.gc.ca/ensemble/naefs/index\\_f.html](https://meteo.gc.ca/ensemble/naefs/index_f.html)), qui combine les prévisions pour 2 semaines du système global de prévisions d’ensemble (SGPE) du Canada et du GEFS (*Global Ensemble Forecasting System – Système global de prévisions d’ensemble*) de la NOAA des États-Unis. Les 2 systèmes fournissent 20 membres de prévisions quotidiennes, plus un membre de contrôle, et les prévisions sont mises à jour 2 fois par jour.

Les résultats des vérifications indiquent que le SGPE a une capacité utile de prévision allant jusqu’à 5 jours : pour le 1<sup>er</sup> jour, la corrélation entre les précipitations observées et le membre de contrôle du SGPE est très élevée (coefficient de corrélation de 0,95), puis elle chute à 0,54 pour le 5<sup>e</sup> jour (voir la figure 3.1.2). À plus long terme, le SGPE n’a pas de capacité significative de prévision des précipitations quotidiennes. En raison du manque de temps, il n’a malheureusement pas été possible de faire le même genre de vérifications avec le GEFS, mais en général la courbe de croissance d’erreur des prévisions météorologiques canadiennes est semblable à celle d’autres centres d’Amérique du Nord ([http://meteo.gc.ca/verification/error\\_growth\\_f.html](http://meteo.gc.ca/verification/error_growth_f.html)).



**Figure 3.1.2 – Coefficient médian de corrélation de Pearson entre les prévisions quotidiennes de précipitations du SGPE et les précipitations observées pour 12 sous-bassins du lac Champlain**

### *Évaluation des prévisions de température*

Les prévisions de température sont généralement plus solides que les prévisions des précipitations et des vents, notamment sur des horizons de plus de 5 jours. On constate même une certaine capacité de prévision<sup>1</sup> pour la température à l'échelle d'une saison, en particulier en hiver. Le SGPE a servi à déterminer si les prévisions mensuelles fournissent une information valable concernant la température à des fins de modélisation du lac. Une telle information serait particulièrement utile pour prévoir la fonte ou la descente des glaces à l'aide de prévisions hebdomadaires du nombre moyen de degrés-jours pour l'ensemble du bassin. L'idéal serait donc des prévisions donnant une estimation correcte du nombre moyen de degrés-jours observés pendant une semaine pour l'ensemble du bassin versant. L'évaluation a porté sur les prévisions émises en février, mars et avril de 1995 à 2012.

Les résultats de l'évaluation montrent que la capacité des prévisions portant sur 1 semaine est semblable au cours des 3 mois de février, mars et avril. La capacité des prévisions portant sur 2 semaines est également semblable au cours des 3 mois, mais elle est moindre que pour 1 semaine. Dans le cas des prévisions portant sur 3 et 4 semaines, une capacité de prévision n'est constatée que pour celles émises en février, y compris celles qui sont émises au cours de la seconde moitié de février et qui couvrent jusqu'à la seconde moitié de mars. Cette évaluation est en accord avec les caractéristiques des prévisions mensuelles et saisonnières de température pour cette région, qui ont une capacité de prévision généralement plus élevée en hiver. Même si l'utilisation des prévisions mensuelles de température pourrait être justifiée en février, il pourrait être plus approprié d'utiliser les données de température des 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> semaines de février pour prévoir de manière fiable les crues devant survenir plus tard dans la saison. D'autre part, la possibilité d'utiliser des prévisions mensuelles d'ensemble pour les 3 mois pourrait s'avérer intéressante pour les périodes plus chaudes de l'année (c.-à-d. l'été et l'automne), où les observations des températures passées sont moins représentatives des conditions actuelles.

### **3.2 Création d'un modèle hydrodynamique expérimental 2D du lac Champlain en utilisant les données bathymétriques existantes**

Remarque : Ces travaux correspondent à la tâche 1-2 définie dans le plan de travail du GTT et sont décrits en détail dans le rapport technique suivant :

ENVIRONNEMENT CANADA. *Création d'un modèle hydrodynamique expérimental 2D du lac Champlain en utilisant les données bathymétriques existantes (tâche 1-2)*, rapport présenté à la Commission mixte internationale, 2015, 45 p.

Les Services hydrologiques nationaux d'EC ont élaboré un modèle hydrodynamique bidimensionnel (2D) expérimental pour simuler les niveaux d'eau du lac Champlain et de la rivière Richelieu associés à des scénarios statiques définis par des niveaux d'eau précis au limnimètre de Rouses Point dans le lac Champlain. Ce travail visait à tester le rendement d'un modèle 2D d'éléments finis faisant surtout appel à des données existantes. Les résultats de cet effort montrent qu'on a pu créer et appliquer avec succès un modèle déterminant le débit et

---

<sup>1</sup> La capacité de prévision d'un système donné est définie comme son rendement par rapport à une autre technique de référence.



l'altitude de la surface de l'eau le long de la rivière Richelieu pour chacun des 11 scénarios de niveau d'eau jugés d'intérêt par le GTT (voir le tableau 4.1.1). Les paragraphes qui suivent résument le processus et les résultats de ces travaux.

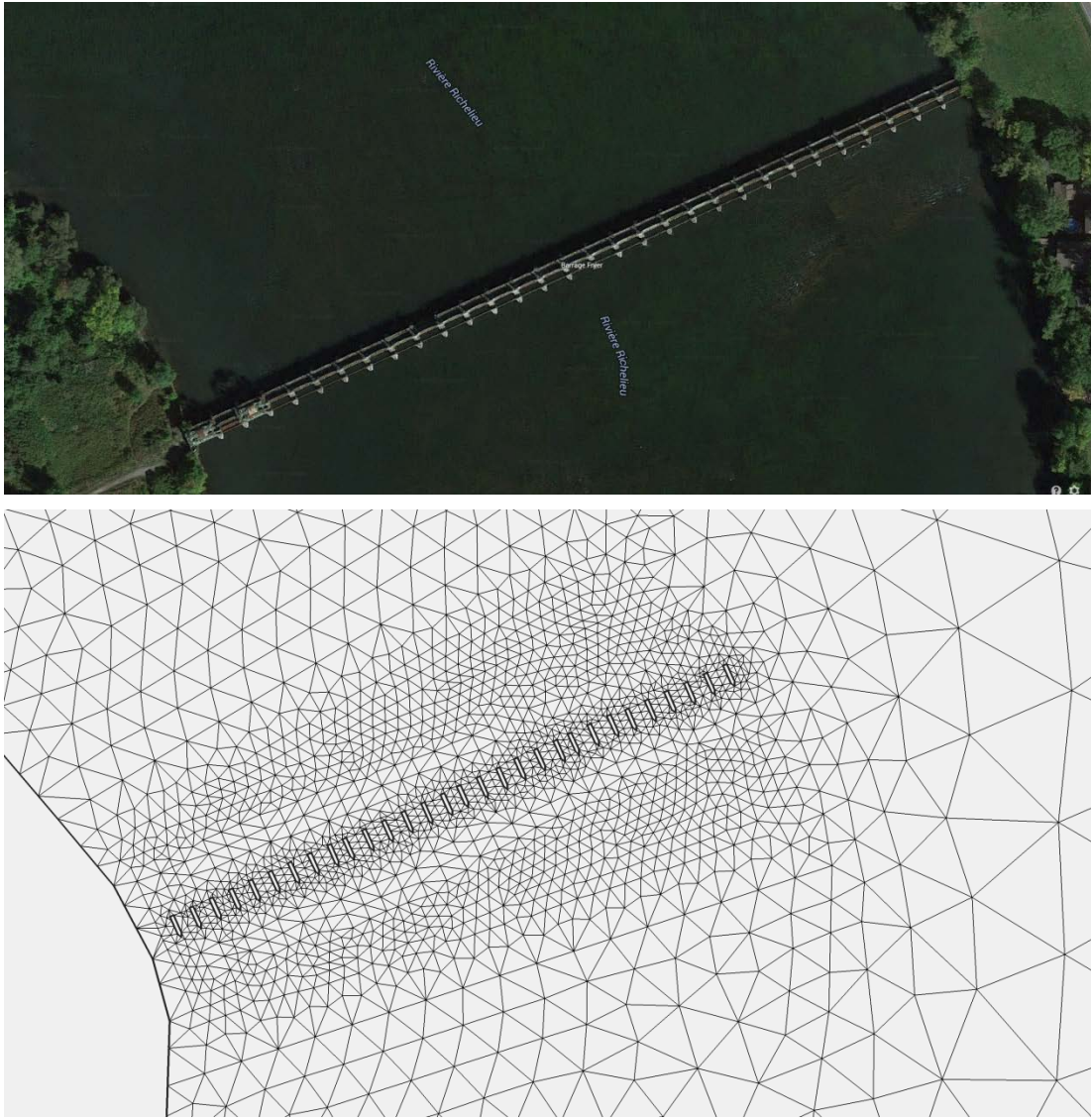
### Création du réseau maillé d'éléments finis

Les simulations ont été effectuées à l'aide du modèle H2D2 mis au point à l'Institut national de la recherche scientifique – Centre Eau Terre Environnement (INRS-ETE) avec l'appui d'EC. La démarche est fondée sur une modélisation numérique 2D des équations des ondes longues (*shallow water equations*), aussi appelées équations de Saint-Venant, qui sont résolues par la méthode des éléments finis. Ce modèle détermine la vitesse moyenne d'écoulement (par intégration verticale de la vitesse) pour toutes les sections du plan d'eau définies par les nœuds du modèle. Le modèle rend également compte des écoulements de débordement résultant d'inondations.

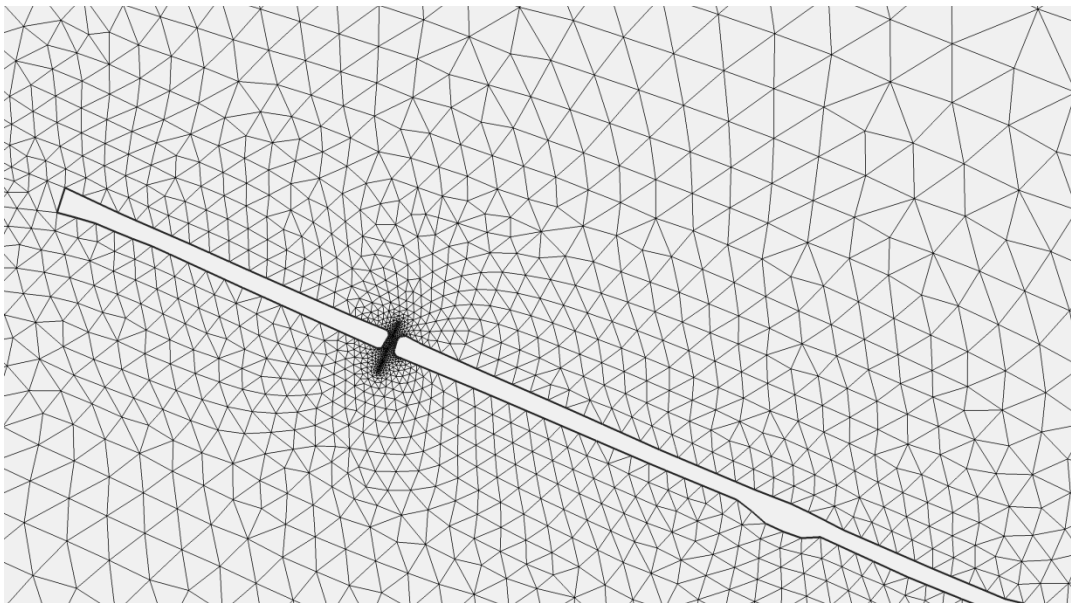
Le domaine couvert par le modèle comprend le lac Champlain, de Whitehall, NY (où est située le limnimètre de Whitehall de l'USGS) au début de la rivière Richelieu, puis la rivière Richelieu jusqu'au barrage Fryer (qui coïncide avec le fluviomètre de la Province de Québec).

Les modèles du lac et de la rivière comprenaient en tout 305 155 nœuds et 148 191 éléments. La taille des éléments variait de quelques mètres de côté, là où une meilleure résolution spatiale était nécessaire, jusqu'à 700 m de côté au centre du lac Champlain, où les besoins d'information étaient moins importants. Un réseau maillé d'éléments finis à haute résolution était nécessaire au voisinage de structures telles que les piles de pont, les quais et les ponceaux, qui influencent l'hydrodynamique de la rivière et du lac. Cela est illustré à la figure 3.2.1, qui montre le réseau maillé autour des 30 piles de la structure du barrage Fryer.

La figure 3.2.2 illustre le besoin d'un réseau maillé à haute résolution pour les zones du lac Champlain où des ponts-jetées reliant des îles à la terre ferme comportent des ouvertures relativement petites permettant à l'eau de s'écouler d'un côté à l'autre. De nombreux ponts-jetées reliant certaines îles du lac Champlain à la terre ferme dans le Vermont créent une zone appelée « mer intérieure », qui est hydrauliquement reliée au corps principal du lac, mais qui réagit différemment. La mise au point du modèle visait à rendre compte de cette particularité.



**Figure 3.2.1 – Le barrage Fryer et le réseau maillé correspondant**



**Figure 3.2.2 – La route 2, entre South Hero et Colchester, et le réseau maillé correspondant**

#### Données altimétriques communes

Des données sur l'altitude des zones riveraines et la bathymétrie du lac ont été recueillies pour construire un MAN du lac Champlain et de ses rives. Pour les zones où des données LIDAR n'étaient pas disponibles, on a fait appel entre autres aux données bathymétriques de l'université *Middlebury College* (Manley, 2005), aux données bathymétriques *ElevationDEM\_LKCHDEM* du *VCGI (Vermont Center for Geographic Information – Centre d'information géographique du Vermont – VCGI, 2010)*, à diverses données LIDAR et au *NED (National Elevation Dataset – Ensemble national de données altimétriques)*. Toutes les données sur l'altitude des zones riveraines et la bathymétrie du lac qui n'étaient pas exprimées selon le *NAVD 88 (North American Vertical Datum of 1988 – Système de référence altimétrique nord-américain de 1988)* ont été ajustées à l'aide des grilles de transformation fondées sur les applications en ligne

disponibles (Vertcon<sup>2</sup>, Geoid12A<sup>3</sup>, GPS-H<sup>4</sup>). La figure 3.2.3 montre la grille utilisée pour convertir les données du CGVD28 au NAVD 88. Le MAN a été transféré au réseau maillé hydrodynamique en veillant à ce que le modèle soit élaboré à partir de données communes de part et d'autre de la frontière, à savoir NAVD 88.

Pour la conversion à NAVD 88 des données des stations limnimétriques, des observations de haute précision fournies par le GNSS (*Global Navigation Satellite System* – Système mondial de navigation par satellite) ont servi à calculer les facteurs de conversion requis pour convertir au système altimétrique commun NAVD 88 les niveaux d'eau observés selon le NGVD 29 aux États-Unis ou le CGVD28 au Canada. Le tableau 3.2.1 présente ces facteurs de conversion et les compare à ceux qui sont fournis par les applications en ligne.

**Tableau 3.2.1 – Différence entre les facteurs de conversion à NAVD 88 des niveaux d'eau, en diverses stations, calculés à l'aide d'applications en ligne et les facteurs calculés à partir des observations de haute précision fournies par le GNSS**

Station	Conversion à NAVD 88 à l'aide d'applications en ligne (m)	Conversion à NAVD 88 à l'aide d'observations fournies par le GNSS (m)	Différence (m)
Rouses Point (NGVD 29)	-0,138	-0,131	0,006
Burlington (NGVD 29)	-0,146	-0,159	-0,012
Whitehall (NGVD 29)	-0,156	-0,081	0,074
Philipsburg (CGVD28)	-0,055	-0,064	-0,009
Saint-Paul-de-l'Île-aux-Noix (CGVD28)	-0,085	-0,064	0,020
Saint-Jean-sur-Richelieu (CGVD28)	-0,042	-0,018	0,023
Sorel (CGVD28)	0,004	0,033	0,029
Barrage de Chambly (CGVD28)	-0,007	0,024	0,031
Saint-Ours (CGVD28)	0,014	0,033	0,019

<sup>2</sup> Vertcon : [http://www.ngs.noaa.gov/cgi-bin/VERTCON/vert\\_con.prl](http://www.ngs.noaa.gov/cgi-bin/VERTCON/vert_con.prl)

<sup>3</sup> Geoid12A : [http://www.ngs.noaa.gov/cgi-bin/GEOID\\_STUFF/geoid12B\\_prompt1.prl](http://www.ngs.noaa.gov/cgi-bin/GEOID_STUFF/geoid12B_prompt1.prl)

<sup>4</sup> GPS-H : <http://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/gpsh.php?locale=en>

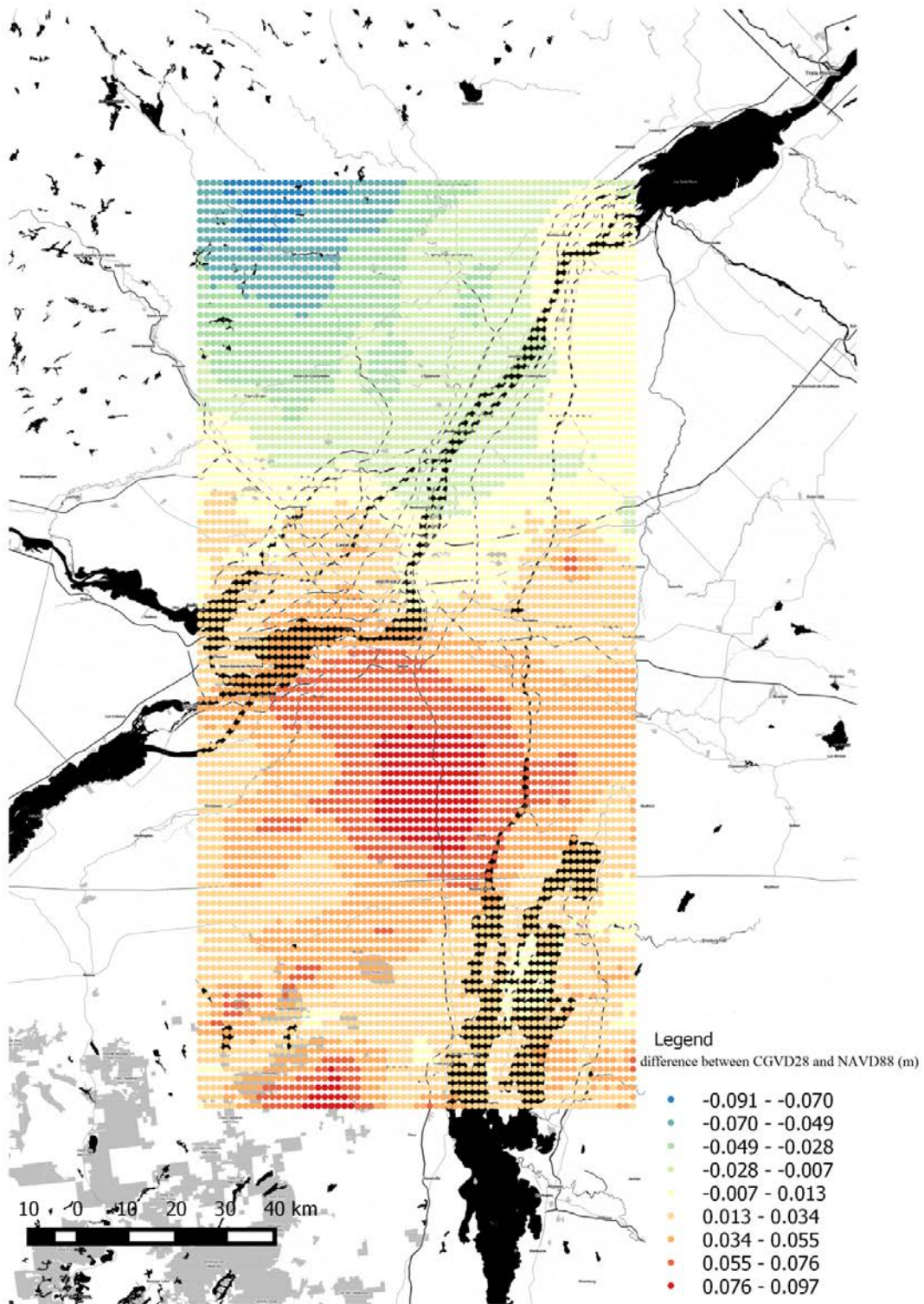


Figure 3.2.3 – Grille de conversion (en mètres) de CGVD28 à NAVD 88

## Base de données hydrologiques

Les 13 points latéraux d'entrée où les débits entrants du lac Champlain sont mesurés correspondent aux principaux affluents du lac : les rivières Winooski, Missisquoi, Lamoille, Bouquet, Au Sable, Saranac, Chazy, Mettawee, Poultney et LaChute, le ruisseau Otter, ainsi que la rivière aux Brochets (Pike River) et la rivière de La Roche (Rock River), qui se jettent toutes deux directement dans la baie Missisquoi. Les débits entrants associés à d'autres affluents moins importants, ainsi que les débits entrants qui ne correspondent pas à des points d'entrée précis, sont répartis entre les 13 points d'entrée selon une méthode adaptée de Shanley et Denner (1999), fondée sur les proportions relatives des zones mesurées et non mesurées des bassins versants. Une base de données de tous les débits entrants quotidiens aux États-Unis et au Canada nécessaires pour faire fonctionner le modèle hydrodynamique a été créée, couvrant la période de 1970 à 2015, dans le but d'obtenir des estimations quantitatives historiques des débits entrants du lac Champlain et de la rivière Richelieu.

La figure 3.2.4 montre l'effet atténuateur du lac Champlain sur le système et la capacité de débit limitée de la rivière Richelieu. Le niveau d'eau du lac Champlain monte lorsque les débits entrants totaux du lac sont supérieurs à la capacité de débit de la rivière Richelieu.

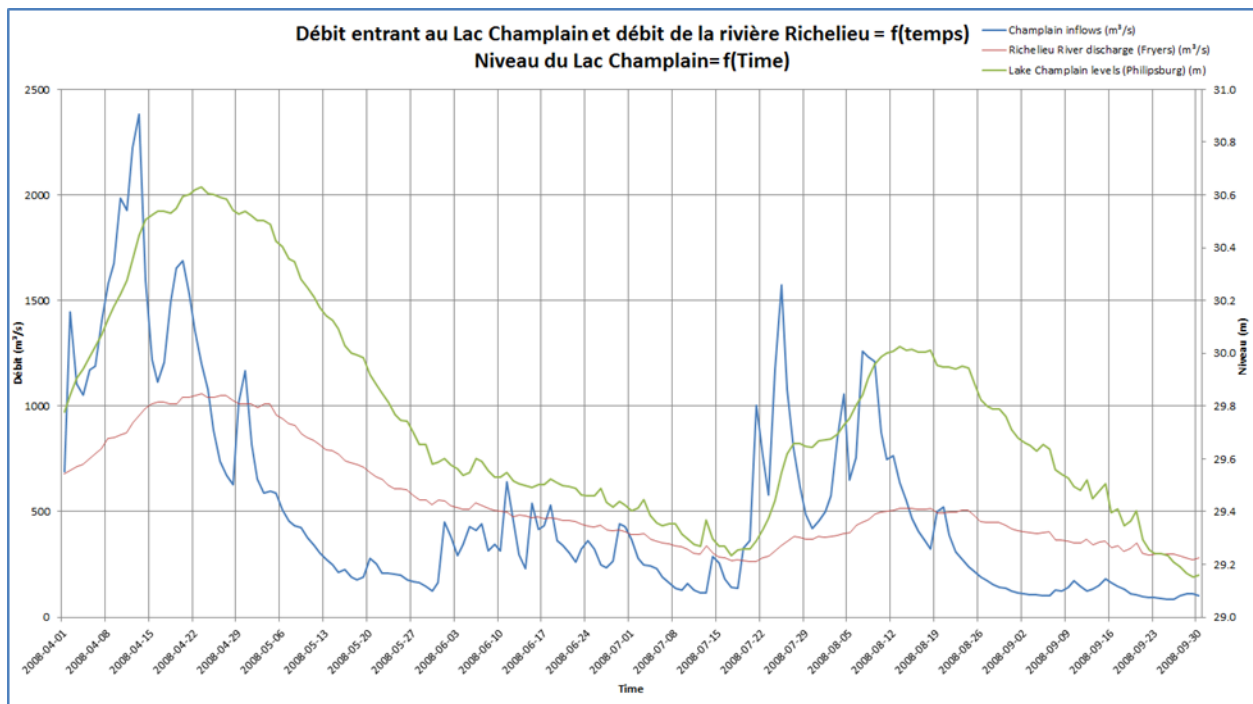


Figure 3.2.4 – Effet des débits entrants et sortants du lac Champlain sur le niveau d'eau du lac au printemps et à l'été 2008

## Procédure d'étalonnage

Les niveaux d'eau du lac Champlain à un moment donné sont dynamiques. Ils résultent de la somme des débits entrants du lac, du débit sortant dans la rivière Richelieu et de l'effet de dénivellation dû au vent (voir la figure 3.2.4). Comme (a) le niveau d'eau du lac Champlain n'est pas lié uniquement à la somme des débits entrants et que (b) la dénivellation due au vent et les effets des vagues ne sont encore inclus dans le modèle expérimental, l'étalonnage de l'application du modèle hydrodynamique dans des conditions d'équilibre n'est pas une tâche facile.

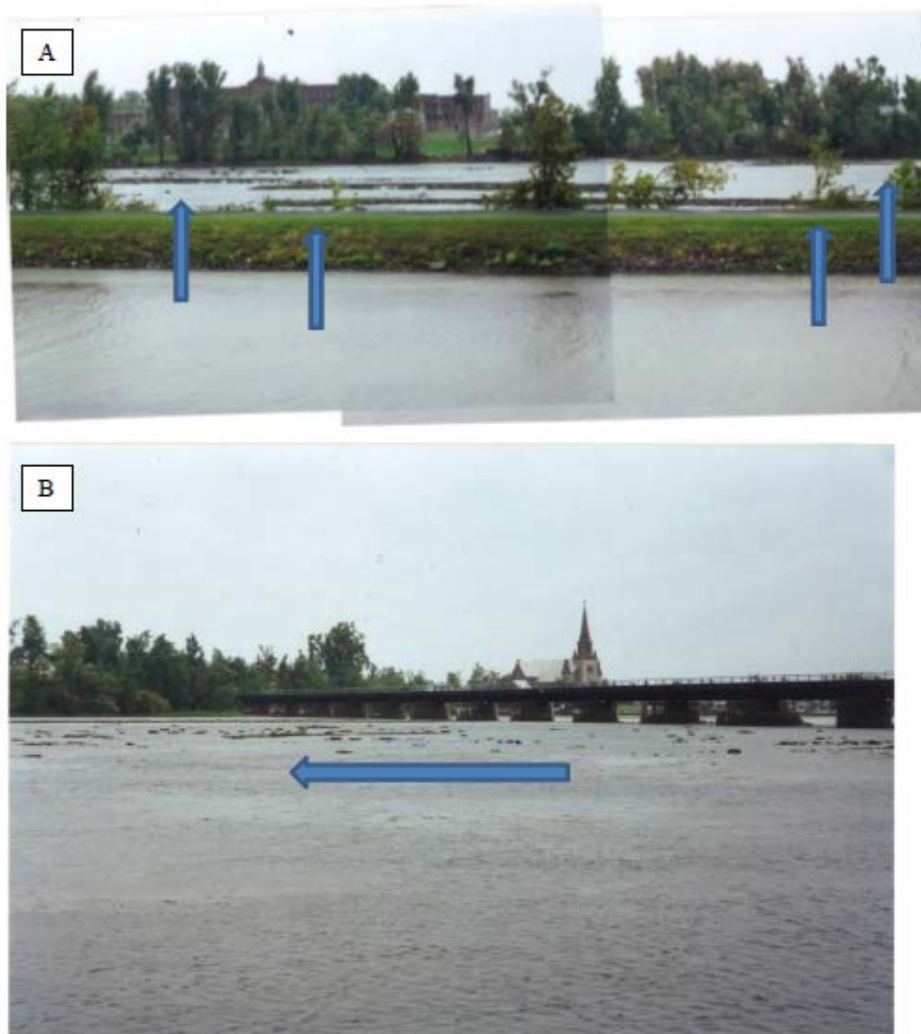
Par contre, le débit de la rivière à la section de contrôle hydraulique naturel située près de Saint-Jean-sur-Richelieu est proportionnel au niveau d'eau à Saint-Jean-sur-Richelieu et à Rouses Point. À l'aide d'une application du modèle dans des conditions d'équilibre, il est possible de simuler le débit de la rivière à la section de contrôle hydraulique naturel de manière à ce qu'il corresponde au niveau d'eau observé à Saint-Jean-sur-Richelieu. Ce faisant, il est toutefois important de se rappeler que ces observations sont affectées par la dénivellation due au vent et que l'étalonnage définitif ne sera réalisé qu'à une étape ultérieure, lorsque l'on inclura l'effet du vent et que le modèle expérimental comprendra explicitement les débits entrants mesurés à chaque heure. Des simulations dans des conditions d'équilibre ont été effectuées en répartissant le débit mesuré à la station fluviométrique de Fryer pour un événement donné entre les différents points d'entrée du modèle.

L'application du modèle dans des conditions d'équilibre a été étalonnée en comparant les mesures de niveau d'eau le long de la rivière Richelieu et à la station limnimétrique de Rouses Point. Dans un premier temps, un événement correspondant à un débit moyen et un autre correspondant à un débit élevé ont été choisis pour l'étalonnage. Les deux événements choisis sont celui du 4 avril 2003, avec un débit de  $593 \text{ m}^3/\text{s}$  à la station fluviométrique de Fryer, et celui du 6 mai 2011, avec un débit de  $1\,550 \text{ m}^3/\text{s}$  à la même station. Ce dernier événement correspond au plus fort de l'inondation de 2011, alors que le débit de la rivière a atteint son maximum historique.

Pour l'événement de 2003, des mesures de niveau d'eau étaient disponibles tout le long de la rivière pour l'étalonnage, à la suite d'une campagne menée par le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ), alors que pour l'événement de 2011, seuls les niveaux d'eau aux stations fluviométriques étaient disponibles.

L'étalonnage a été effectué en ajustant le coefficient de frottement (de Manning). On a atteint des différences entre les valeurs simulées et les valeurs mesurées à la station de Saint-Jean-sur-Richelieu de  $-0,08 \text{ m}$  pour l'événement du 4 avril 2003, et de  $+0,12 \text{ m}$  pour l'événement du 6 mai 2011. Il n'a pas été possible d'obtenir un étalonnage du modèle à moins de  $5 \text{ cm}$  des niveaux d'eau observés en utilisant un seul jeu de coefficients de frottement.

Ce problème pourrait être dû aux structures artificielles dans la zone des hauts fonds de Saint-Jean-sur-Richelieu, dont les données bathymétriques actuelles ne rendent pas compte de manière adéquate. On a trouvé de la documentation à propos de vestiges d'anciens canaux qui servaient à alimenter en eau des moulins sur les deux rives de la rivière. Ces anciens canaux font maintenant partie du lit de la rivière, de même que les structures rocheuses en forme de V utilisées pour la pêche à l'anguille (voir la figure 3.2.5).



**Figure 3.2.5 – A : Les flèches indiquent des vestiges de pièges à anguilles. B : La flèche indique les vestiges d'un bief de moulin sur la rive droite.**

La collecte de nouvelles données bathymétriques effectuée en juin 2015 dans la zone des hauts fonds de Saint-Jean-sur-Richelieu n'a pas permis d'améliorer le rendement du modèle, et les résultats sont demeurés inacceptables (à plus de 5 cm des valeurs mesurées). Il manque encore des données bathymétriques exactes pour une partie des hauts fonds, notamment près des anciens canaux qui servaient à amener de l'eau aux moulins sur les deux rives.

Par conséquent, comme de meilleures données bathymétriques ne sont pas actuellement disponibles, le modèle dans des conditions d'équilibre, sans tenir compte du vent, a été étalonné uniquement pour la crue du 6 mai 2011, en utilisant une moyenne observée cette journée-là de 30,676 m à Saint-Jean-sur-Richelieu. L'étalonnage sans tenir compte du vent semble raisonnable, car le 6 mai 2011, la vitesse moyenne du vent mesurée à la station météorologique de Burlington était de 3,1 m/s (brise légère) et que la rafale de 2 minutes la plus rapide était de 8 m/s (brise modérée).



Le tableau 3.2.2 présente les résultats de l'étalonnage, exprimés par la différence entre les niveaux d'eau observés et les niveaux simulés pendant l'inondation de 2011. Les différences à Rouses Point, Philipsburg, Burlington et Whitehall ne sont fournies qu'à des fins de référence et n'ont pas été utilisées pour l'étalonnage du modèle.

**Tableau 3.2.2 – Étalonnage du réseau maillé hydrodynamique pour le 6 mai 2011**

<b>Station</b>	<b>Mesures selon le NAVD 88 (m)</b>	<b>Étalonnage selon le NAVD 88 (m)</b>	<b>Différence (m)</b>
Saint-Jean-sur-Richelieu	30,686	30,676	<b>-0,010</b>
Rouses Point	31,301	31,283	<b>-0,018</b>
Philipsburg	31,323	31,295	<b>-0,028</b>
Burlington	31,292	31,290	<b>-0,002</b>
Whitehall	31,304	31,311	<b>0,007</b>

Même si certaines différences dans le réseau maillé hydrodynamique sont de l'ordre de 1 à 3 cm, les résultats sont jugés acceptables et montrent que ce modèle expérimental reproduit raisonnablement bien les débits élevés dans des conditions d'équilibre. On prévoit que le modèle fournira les estimations raisonnables de la surface de l'eau nécessaires pour produire les cartes statiques d'inondation de ce projet, dans le but d'appuyer les interventions effectuées en cas d'inondation. Il est à noter qu'un événement unique n'est en général pas suffisant pour une application visant à délimiter la plaine inondable dans un but de planification de l'occupation des sols.

À partir de l'étalonnage effectué pour les niveaux d'eau élevés, les 11 scénarios de niveau d'eau jugés d'intérêt par le GTT (voir le tableau 4.1.1) ont été simulés dans des conditions d'équilibre en ajustant les débits entrants de manière à obtenir les niveaux d'eau voulus du lac Champlain à la station limnimétrique de Rouses Point.

Le principal problème qu'il reste à résoudre pour obtenir un bon modèle hydrodynamique est celui de l'acquisition de données bathymétriques exactes couvrant la zone des hauts fonds de Saint-Jean-sur-Richelieu, car c'est elle qui détermine les niveaux d'eau du lac Champlain. De meilleures données bathymétriques pour cette zone aideront à obtenir un bon étalonnage pour l'ensemble de la fourchette des débits. Après avoir amélioré le modèle de manière à ce qu'il simule adéquatement la section de contrôle hydraulique naturel située près de Saint-Jean-sur-Richelieu, il faudra l'étalonner et le valider avec des débits variables d'heure en heure et en tenant compte du vent.

De plus, le modèle hydrodynamique expérimental n'a pas tenu compte de la dénivellation due au vent et de l'action des vagues sur les niveaux d'eau dans le lac et la rivière. Des travaux supplémentaires devront être effectués pour tenir compte de ces importantes contributions aux inondations et aux débits élevés.

### 3.3 Création d'un modèle hydraulique 2D de la rivière Richelieu, entre Rouses Point et Sorel

Remarque : Ces travaux correspondent à la tâche 2-3 définie dans le plan de travail du GTT et sont décrits en détail dans le rapport technique suivant :

ENVIRONNEMENT CANADA. *Création d'un modèle hydraulique 2D de la rivière Richelieu entre Rouses Point et Sorel (tâche 2-3)*, rapport présenté à la Commission mixte internationale, 2015, 24 p.

Un modèle hydraulique 2D de la rivière Richelieu, entre Saint-Jean-sur-Richelieu et Sorel (Québec) a été élaboré en vue de la création de profils des niveaux d'eau pour les cartes d'inondation. Les résultats de cette modélisation montrent que la partie de la rivière située entre Saint-Jean-sur-Richelieu et le barrage de Chambly a pu être adéquatement modélisée.

Les données altimétriques et bathymétriques existantes ont été rassemblées pour construire un MAN de la rivière Richelieu et de ses zones riveraines. Pour les zones où des structures telles que des piles de pont et des barrages influencent l'hydrodynamique de la rivière, les plans de ces structures telles qu'elles ont été construites et d'autres renseignements pertinents ont été compilés et inclus dans le réseau maillé du modèle hydrodynamique.

L'utilisation de Rouses Point comme limite du modèle de la rivière Richelieu vers l'amont s'est avérée problématique; lorsque le niveau du lac Champlain est très élevé, ce qui fut le cas en 2011, les eaux qui débordent de la baie Missisquoi inondent les terres humides et coulent directement dans la Rivière du Sud, qui se jette dans la rivière Richelieu juste en amont de l'Île-aux-Noix, « court-circuitant » en fait la rivière Richelieu, entre Rouses Point et Saint-Paul-de-l'Île-aux-Noix. Comme le modèle du lac Champlain présenté à la section 3.2 couvre déjà la partie amont de la rivière Richelieu, y compris la plaine inondable de la baie Missisquoi et son « court-circuit », ainsi que la rivière Richelieu jusqu'aux hauts fonds rocheux de Saint-Jean-sur-Richelieu, on a décidé de fixer la limite amont du modèle de la rivière Richelieu juste en amont de la zone des hauts fonds de Saint-Jean-sur-Richelieu, et sa limite aval à l'embouchure de la rivière à Sorel. Ainsi, l'ensemble du bassin a été couvert par la combinaison des modèles du lac et de la rivière.

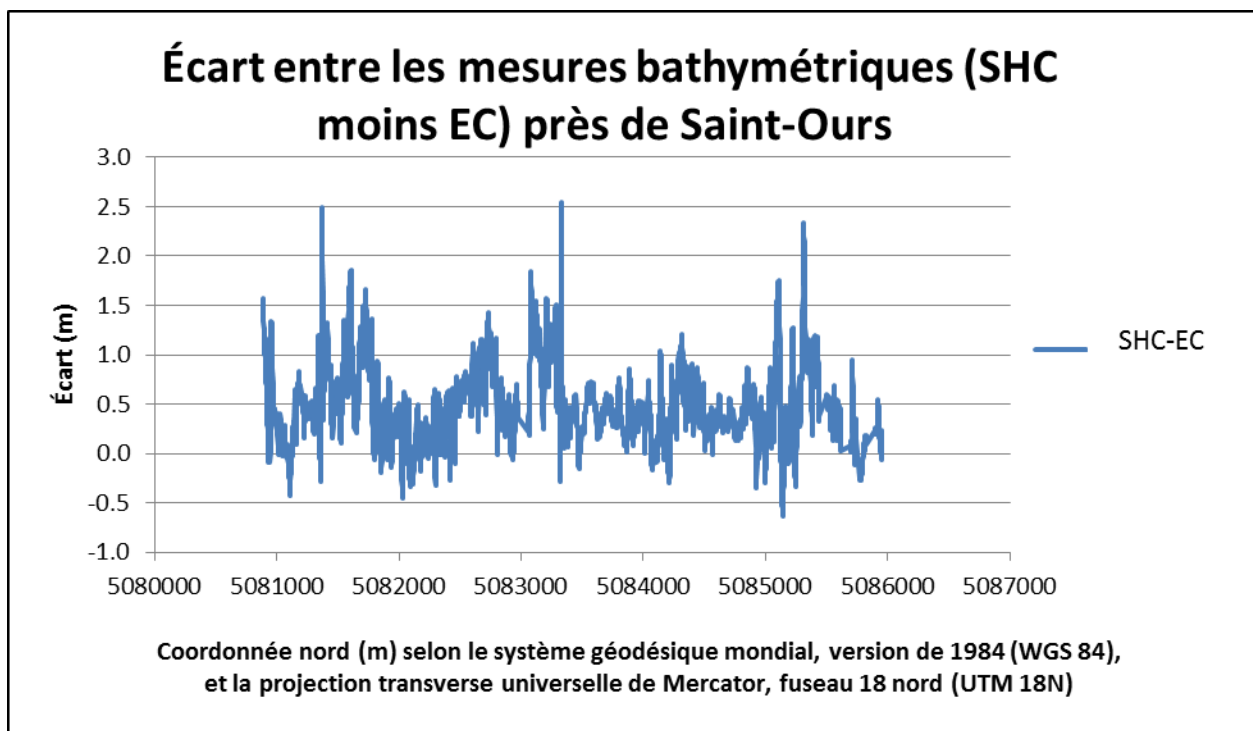
On a constaté au début des travaux que les données bathymétriques de la zone du barrage de Chambly étaient médiocres, et une section d'environ 1 km entre le bassin et le barrage de Chambly n'a pas pu du tout être modélisée. Pour cette raison, le domaine du modèle a été divisé en deux : une section commençant juste en amont de la zone des hauts fonds de Saint-Jean-sur-Richelieu et allant jusqu'au barrage de Chambly, et l'autre section allant du bassin de Chambly jusqu'à Sorel.

Comme on l'a décrit à la section 3.2, une base de données couvrant la période de 1970 à 2015 a été créée afin d'inclure tous les débits entrants quotidiens requis pour le modèle hydrodynamique de la rivière Richelieu. Les points d'entrée du modèle hydrodynamique comprennent les 7 affluents suivants de la rivière entre Saint-Jean-sur-Richelieu et Sorel : les rivières Des Iroquois, Des Hurons, L'Acadie et Amyot, ainsi que les ruisseaux Laplante, Coderre et Beloeil.

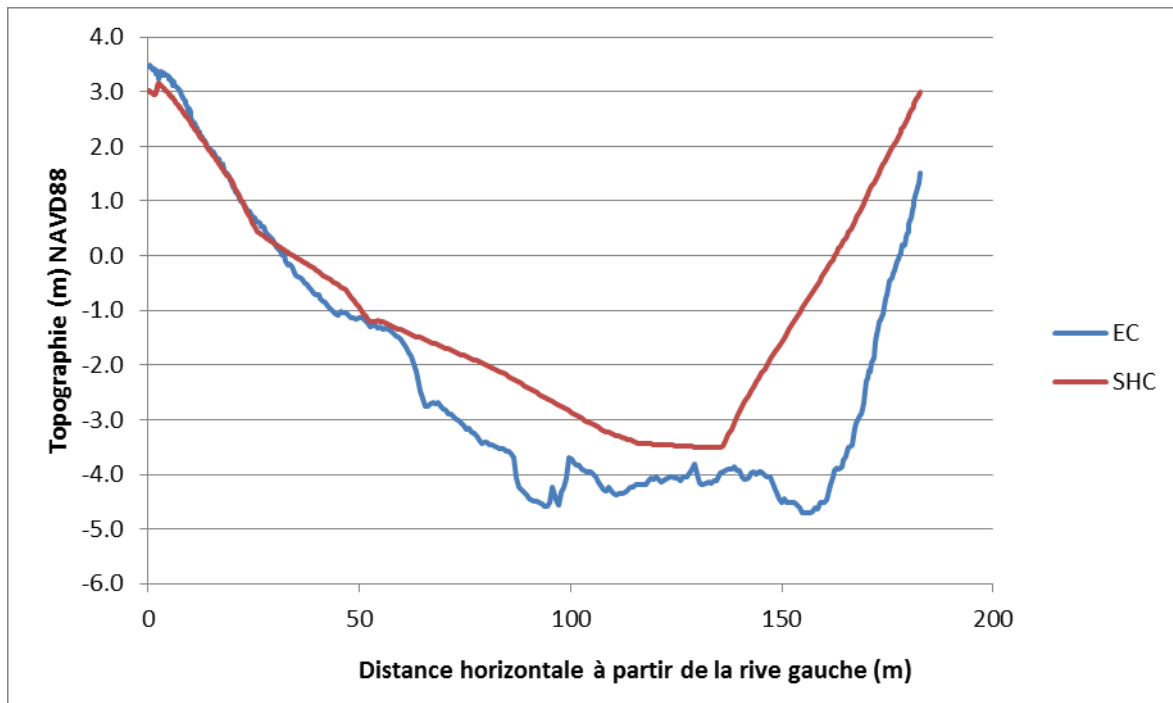
Les simulations ont été effectuées à l'aide du modèle H2D2 mis au point à l'INRS-ETE (voir la description de ce modèle à la section 3.2). Le réseau maillé hydrodynamique de la section allant de Saint-Jean-sur-Richelieu à Chambly a été élaboré et étalonné. Il comprend 79 181 nœuds et

38 539 éléments. La taille des éléments varie de quelques mètres de côté, dans certaines zones où beaucoup de détails sont nécessaires, jusqu'à 150 m de côté pour couvrir les plaines qui peuvent être inondées et où moins de détails sont requis. En général, les éléments du réseau maillé font 25 m de côté. Les 11 scénarios élaborés par le GTT ont été simulés dans cette section de la rivière.

Un modèle hydrodynamique a également été mis au point pour la section de la rivière comprise entre Chambly et Sorel, mais les tentatives d'étalonnage du modèle ont révélé certains problèmes importants. Le rendement du modèle était médiocre, au point où l'on a remis en question la validité des données bathymétriques. Des techniciens d'EC ont été envoyés pour effectuer des levés bathymétriques supplémentaires, afin de vérifier les données bathymétriques existantes, qui provenaient essentiellement du Service hydrographique du Canada (SHC). La comparaison des points mesurés par EC et des données bathymétriques existantes a révélé une différence moyenne d'environ 50 cm. Les différences variaient d'un lieu à l'autre et étaient plus importantes à certains endroits, mais les mesures d'EC donnaient systématiquement des profondeurs plus importantes que les données bathymétriques existantes. La figure 3.3.1 montre les différences sur un transect longitudinal d'une partie de la rivière près de Saint-Ours, alors que la figure 3.3.2 illustre les données bathymétriques du SHC et les observations d'EC sur une coupe transversale située à environ 7 km en amont de Sorel.



**Figure 3.3.1 – Différences entre les mesures de profondeur du Service hydrographique du Canada (SHC) et celles d'Environnement Canada (EC) pour un transect longitudinal situé près de Saint-Ours**



**Figure 3.3.2 – Mesures de profondeur effectuées par le Service hydrographique du Canada (SHC) et par Environnement Canada (EC) pour une coupe transversale située à environ 7 km en amont de Sorel**

À cause de ces problèmes, il n’a pas été possible de réaliser un modèle précis de cette section de la rivière. Les 11 scénarios élaborés par le groupe de travail n’ont pas été simulés. Les travaux portant sur cette section de la rivière n’ont donc pas été complétés et ne pourront pas l’être tant que l’on ne disposera pas de nouvelles données bathymétriques.

Le modèle 2D du lac décrit à la section précédente, combiné à la partie de la rivière comprise entre Saint-Jean-sur-Richelieu et le barrage de Chambly, où le modèle a eu un bon rendement, a servi à la simulation des 11 scénarios choisis décrits dans le tableau 4.1.1 ainsi qu’au calcul des surfaces associées à utiliser pour la cartographie des zones inondables.

### **3.4 Création d’un modèle altimétrique numérique (MAN) à qualité contrôlée, à partir des ensembles de données LIDAR le long de la rivière Richelieu et de la baie Missisquoi du lac Champlain**

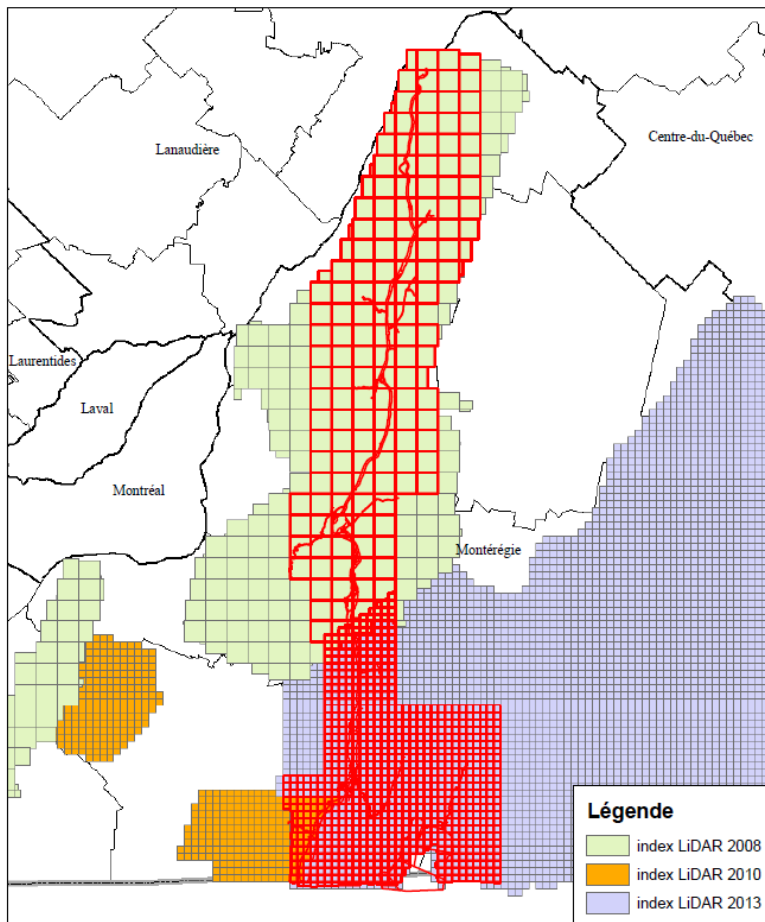
Remarque : Ces travaux correspondent à la tâche 2-2 définie dans le plan de travail du GTT et sont décrits en détail dans le rapport technique suivant :

MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L’ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES. *Contribution à la création de cartes de zones inondées pour la portion québécoise du système Lac Champlain / Rivière Richelieu : Production d’un modèle numérique de terrain en rive et Transformation de surfaces d’eau en limites de zones inondées*, rapport présenté à la Commission mixte internationale, 2015, 22 p.

Deux ensembles distincts de données topographiques ont été créés pour ce projet, un pour chaque côté de la frontière internationale. Les données topographiques reposent sur la technologie LIDAR (*Light Detection And Ranging* – Détection et télémétrie par ondes lumineuses). Les données LIDAR sont les données disponibles qui ont la meilleure résolution à l'échelle régionale pour caractériser l'altitude de la surface du sol et sont les plus appropriées pour la modélisation des crues ou les modèles hydrauliques. Les données LIDAR servent à créer un MAN de la surface du sol utilisé pour la modélisation du lac et la création de cartes d'inondation. Des travaux supplémentaires seront nécessaires dans l'avenir pour réunir les données LIDAR du Canada et des États-Unis dans un seul MAN.

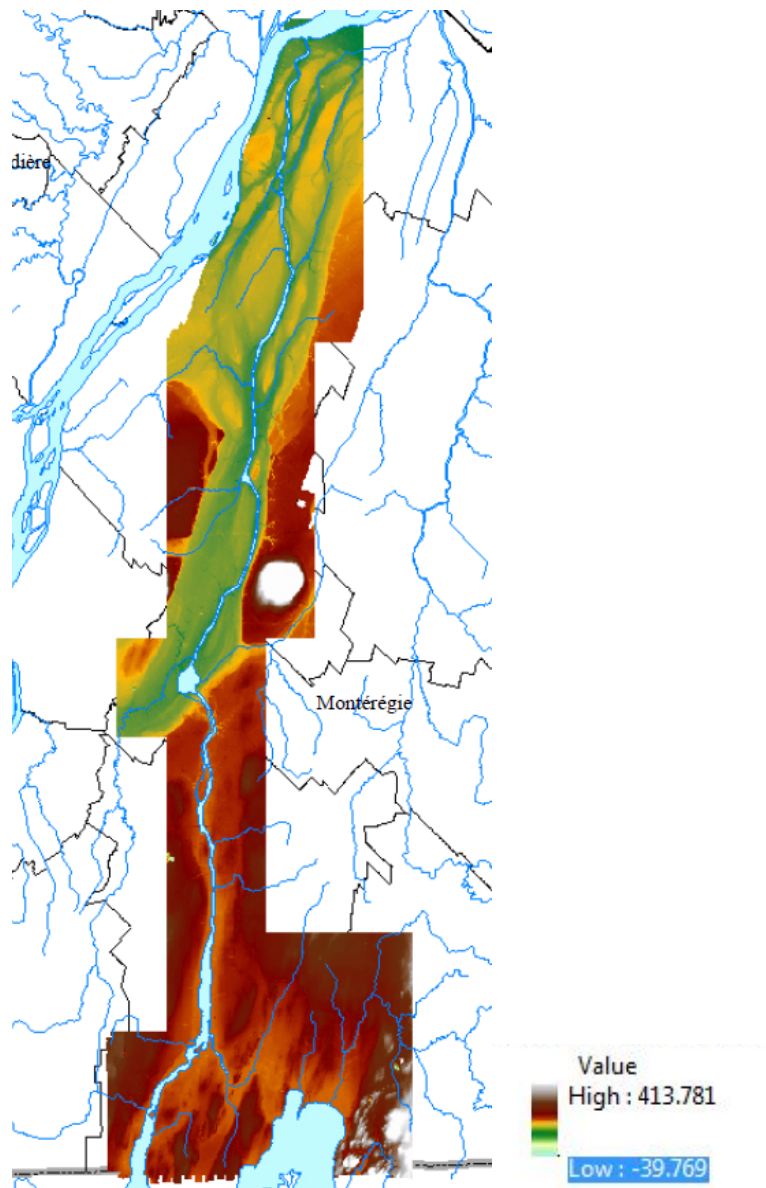
#### MAN et données LIDAR au Canada

Trois sources de données LIDAR ont été mises à contribution pour la création d'une base de données topographiques du bassin de la rivière Richelieu au Canada. Ces données proviennent de 3 campagnes distinctes de collecte de données LIDAR, menées en 2008, 2010 et 2013. Les spécifications techniques des données LIDAR recueillies lors de ces 3 campagnes sont les mêmes. La figure 3.4.1 montre les régions couvertes par chacune de ces campagnes.



**Figure 3.4.1 – Régions couvertes par chacune des 3 campagnes de mesures (représentées en vert, bleu et orangé), et feuillets cartographiques pour lesquels les données ont été utilisées dans ce projet (carrés rouges)**

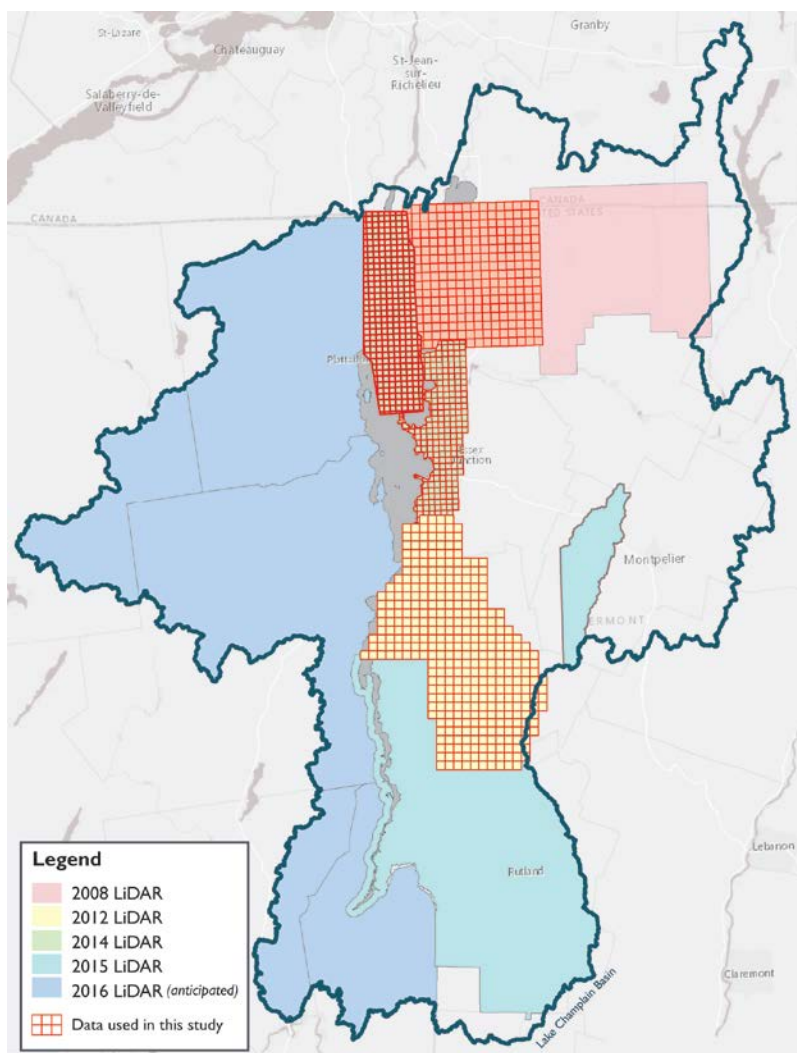
La figure 3.4.2 montre le MAN produit à partir de données existantes pour la rivière Richelieu. De la même manière, en hydraulique, il est essentiel de combiner les données topographiques sur l'altitude du sol avec les données bathymétriques sur la profondeur du cours d'eau. Le modèle hydraulique sert à évaluer le niveau d'eau et la profondeur de l'eau pour diverses situations d'écoulement au-dessus du modèle de terrain. Les données utilisées ont une précision verticale d'environ  $\pm 15$  cm en terrain dégagé et de  $\pm 25$  cm en forêt. Le MAN est fondé sur des mailles de  $1 \text{ m}^2$ .



**Figure 3.4.2 – Aperçu du MAN des zones riveraines de la rivière Richelieu et de la partie du lac Champlain correspondant à la baie Missisquoi. Les valeurs sont en mètres.**

## MAN et données LIDAR aux États-Unis

Les données altimétriques ont été tirées d'un modèle altimétrique numérique (MAN) dérivées de données LIDAR de chaque côté du lac dans les États du Vermont (comtés d'Addison, de Chittenden, de Franklin et de Grande Isle) et de New York (comté de Clinton), comme le montre la figure 3.4.3. Des données LIDAR ont été recueillies en 2013 et 2014 par Photo Science, de Lexington, dans le Kentucky. Le post-traitement de ces données s'est terminé en 2014. Les données LIDAR ont une précision verticale de 0,3 à 0,6 pi (9,6 cm dans le comté de Chittenden, 12,7 cm dans le comté d'Addison, et 18 cm dans les comtés de Franklin et de Grand Isle), avec un degré de confiance de 95 % en terrain dégagé. Comme dans le cas des données LIDAR canadiennes pour la rivière Richelieu, les spécifications des données LIDAR permettent la production de courbes de niveau distantes de 1 pied à l'aide d'un MAN.



**Figure 3.4.3 – Régions couvertes par chacune des campagnes de mesures, et feuillets cartographiques pour lesquels les données ont été utilisées dans ce projet (carrés rouges)**

## 4 Création de cartes statiques d'inondation

Un résultat important de ce projet est la création de cartes montrant les zones de terre de certaines parties du bassin versant du lac Champlain et de la rivière Richelieu qui seraient inondées si le niveau d'eau du lac atteignait certaines altitudes précises au limnimètre de Rouses Point, NY, en supposant que la surface du lac soit horizontale. On s'attend à ce que ces cartes, appelées cartes d'inondation, soient utiles notamment pour la préparation des mesures d'urgence en cas d'inondations futures.

L'USGS, EC et le ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) ont collaboré à la création de cartes d'inondation dans le cadre de ce projet. La création de ces cartes dépendait de l'accomplissement des tâches suivantes :

- détermination des niveaux d'eau précis du lac à Rouses Point, NY, servant de base à l'établissement des cartes d'inondation;
- création d'un ensemble de données topographiques à haute résolution pour les surfaces terrestres représentées sur ces cartes;
- modélisation hydraulique de la rivière Richelieu en aval du limnimètre de Rouses Point, afin que les niveaux d'eau de la rivière soient liés avec précision aux niveaux d'eau du lac utilisés pour les cartes d'inondation;
- définition de l'utilité et des limites des cartes d'inondation, afin que les autorités locales et régionales comprennent bien comment utiliser ces cartes de manière adéquate.

Les sections qui suivent résument les travaux accomplis pour effectuer ces tâches, et les détails sont donnés dans deux rapports techniques.

Les cartes d'inondation ne devraient pas être utilisées pour la navigation, la réglementation, l'émission de permis ou pour toute autre fin juridique.

### 4.1 Scénarios statiques choisis

Le GTT a choisi 11 niveaux d'eau précis du lac pour créer les cartes d'inondation (voir les tableaux 4.1.1, 4.1.2 et 4.1.3). Ces niveaux d'eau correspondent aux stades d'inondation définis par le NWS (*National Weather Service* – Service météorologique national des États-Unis) pour le limnimètre de Rouses Point, ainsi qu'à deux niveaux historiques du lac (103,2 et 102,1 pi), avec des intervalles de 0,5 ou 1 pi jusqu'à 106 pi. Ces niveaux d'eau peuvent en outre être liés à des valeurs seuils définies au Québec par le ministère de la Sécurité publique (MSP).



**Tableau 4.1.1 – Onze scénarios correspondant à des niveaux d’eau du lac Champlain à Rouses Point, selon les systèmes de référence NGVD 29 et NAVD 88, en pieds et en mètres, et débits estimatifs correspondants de la rivière Richelieu.** Les niveaux affichés en gras dans la 2<sup>e</sup> colonne sont ceux qui sont mentionnés dans le texte du rapport.

Scénario	<b>NGVD 29 (pi)</b>	NAVD 88 (pi)	NGVD 29 (m)	NAVD 88 (m)	Débit estimatif (m <sup>3</sup> /s)
1	<b>100,000</b>	99,570	30,480	30,349	937
2	<b>101,000</b>	100,570	30,785	30,654	1106
3	<b>101,500</b>	101,070	30,937	30,806	1195
4	<b>102,000</b>	101,570	31,090	30,959	1294
5	<b>102,500</b>	102,070	31,242	31,111	1393
6	<b>103,000</b>	102,570	31,394	31,263	1492
7	<b>103,200</b>	102,770	31,455	31,324	1539
8	<b>103,500</b>	103,070	31,547	31,416	1612
9	<b>104,000</b>	103,570	31,699	31,568	1710
10	<b>105,000</b>	104,570	32,004	31,873	1958
11	<b>106,000</b>	105,570	32,309	32,178	2204

**Tableau 4.1.2 – Pertinence des altitudes du lac Champlain utilisées par la CMI pour les cartes d’inondation**

Altitude selon NGVD 29 (pi)	Altitude selon NAVD 88 (pi)	Description
100,0	99,57	Stade d’inondation mineure défini par le NWS au limnimètre de l’USGS à Rouses Point, NY (04295000)
101,0	100,57	Stade d’inondation modérée défini par le NWS au limnimètre de l’USGS à Rouses Point, NY
101,5	101,07	Stade d’inondation majeure défini par le NWS au limnimètre de l’USGS à Rouses Point, NY
102,0	101,57	Stade supérieur d’inondation (L’altitude de 102,1 pi atteinte le 4 mai 1869 à Rouses Point est la 2 <sup>e</sup> plus élevée à avoir été enregistrée.)
103,2	102,77	Altitude du lac la plus élevée à avoir été enregistrée (le 6 mai 2011) au limnimètre de l’USGS à Rouses Point, NY

**Tableau 4.1.3 – Relation entre certains des 11 scénarios et les seuils d’inondation définis par le ministère de la Sécurité publique du Québec**

Station	Altitude de la surface de l’eau à la station*, en mètres (NGVD 29)	Débit	Seuil d’inondation	Scénarios approximativement correspondants
02OJ007 (Rapides Fryer, Carignan, QC)	27,07	1064	Mineur	2
	27,25	1221	Modéré	3
	27,37	1335	Majeur	3 et 4
02OJ016 (Marina, Saint-Jean-sur-Richelieu, QC)	30,10	1070**	Mineur	2
	30,32	1225**	Modéré	3
	30,47	1330**	Majeur	3 et 4
030430 (Centre de plein air l’Estacade, Saint-Paul, QC)	30,56	1150**	Mineur	2 et 3
	30,89	1415**	Modéré	5
	31,06	1560**	Majeur	7 et 8
02OH001 (Lac Champlain, Saint-Armand, QC)	30,61	–	Mineur	1 et 2
	30,92	–	Modéré	3
	31,12	–	Majeur	4

\* À ne pas confondre avec le niveau du lac Champlain pour les 3 premières stations

\*\* Valeur approximative calculée de manière empirique à partir du niveau d’eau local

Les niveaux d’eau du lac supérieurs au record de 103,2 pi servent à créer des cartes d’inondation représentant des niveaux d’inondations futures possibles, ou le cas échéant l’influence de la dénivellation due au vent à une certaine distance du limnimètre de Rouses Point.

## 4.2 Création de cartes statiques d’inondation

Remarque : Ces travaux correspondent à la tâche 2-4 définie dans le plan de travail du GTT. Les parties canadienne et américaine de ces travaux sont respectivement décrites en détail dans les rapports techniques suivants :

MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L’ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES. *Contribution à la création de cartes de zones inondées pour la portion québécoise du système Lac Champlain / Rivière Richelieu : Production d’un modèle numérique de terrain en rive et Transformation de surfaces d’eau en limites de zones inondées*, rapport présenté à la Commission mixte internationale, 2015, 22 p.

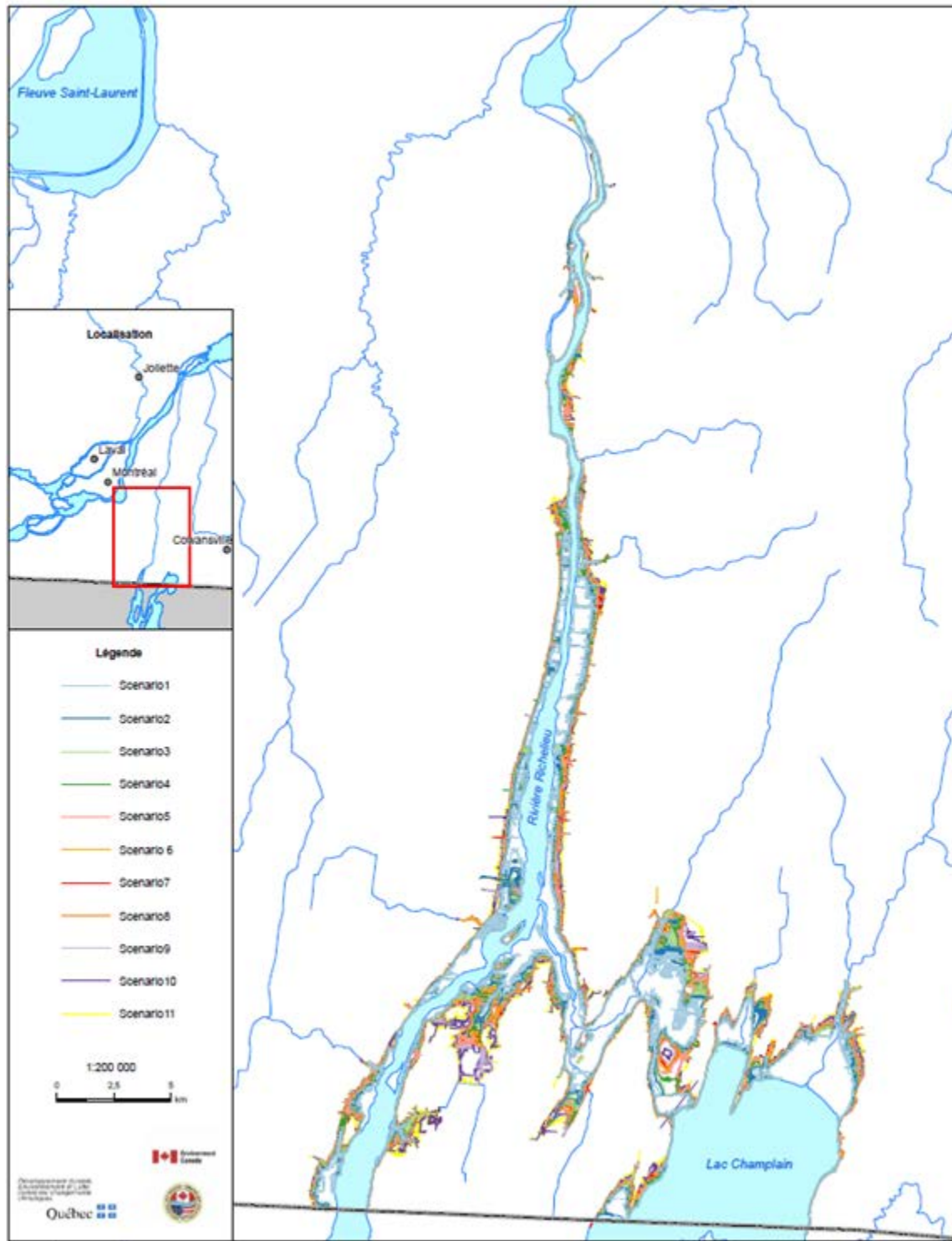
FLYNN, R.H., et L. HAYES. *Cartes des plaines inondables du lac Champlain dans les États du Vermont et de New York*, rapport de recherche scientifique 2016-XXXX de la Commission géologique des États-Unis, projet de rapport présenté à la Commission mixte internationale, 2015, 27 p.

Des cartes statiques d'inondation ont été produites par EC et le MDDELCC pour la rivière Richelieu de la frontière internationale jusqu'à Saint-Jean-sur-Richelieu, et par l'USGS pour les parties des zones riveraines du lac Champlain pour lesquelles des données LIDAR sont disponibles. Des cartes correspondant aux 11 scénarios de niveau d'eau du lac au limnimètre de Rouses Point, NY, de l'USGS (voir le tableau 4.1.1) ont été créées pour chacun des deux plans d'eau.

#### Cartes statiques d'inondation pour la rivière Richelieu

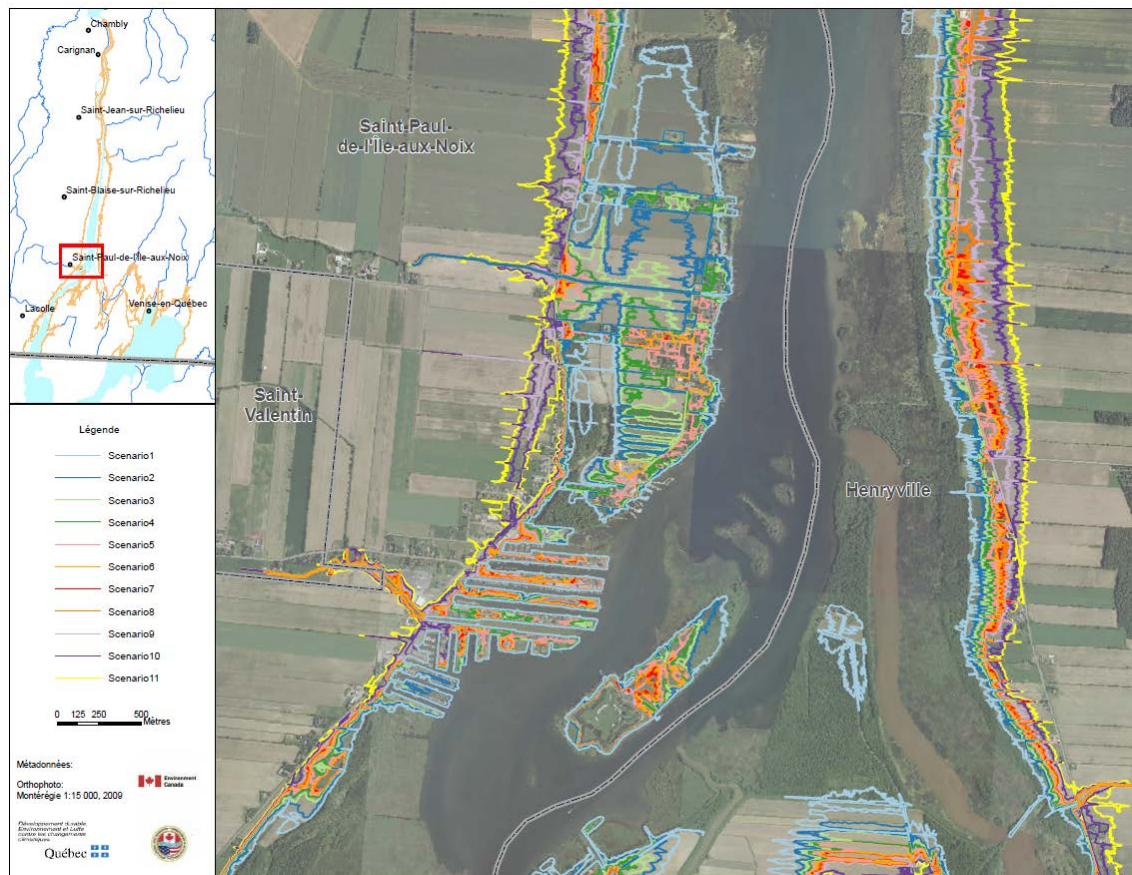
EC a utilisé les résultats de la modélisation H2D2 du lac Champlain pour cartographier les niveaux de la rivière pour les 11 scénarios de niveau d'eau du lac. Les résultats du modèle ont fourni pour chacun de ses nœuds l'altitude de la rivière. Ces données ont ensuite été converties en un ensemble de données de surface d'un système d'information géographique (SIG). Ces données de surface du SIG ont défini la couche d'inondation pour les cartes d'inondation. Pour la rivière Richelieu, les cartes d'inondation donnent également la profondeur de l'eau sous la surface, obtenue en soustrayant l'altitude locale du sol au fond de l'eau, fournie par le MAN, de l'altitude de la surface de l'eau fournie par le modèle hydraulique 2D.

La figure 4.2.1 montre les 11 scénarios pour la partie québécoise de la région étudiée. Même à cette échelle de 1/200 000, on peut voir que l'eau couvre les zones riveraines de la rivière Richelieu et de la baie Missisquoi du lac Champlain. De la même manière, dans le cas des scénarios où les niveaux d'eau et les débits sont les plus élevés, les cartes montrent clairement un lien hydraulique entre la baie Missisquoi et la rivière Richelieu, en passant par la Rivière du Sud.

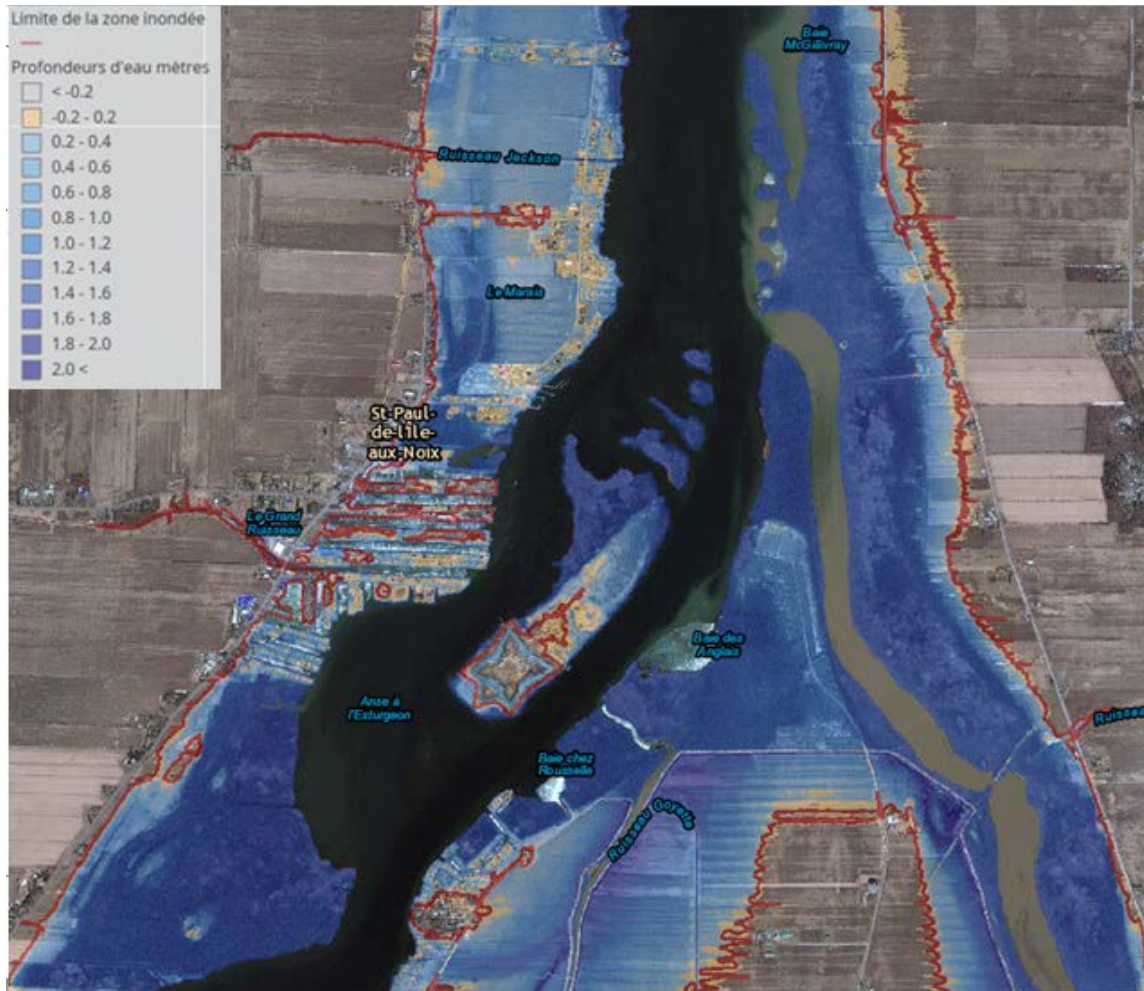


**Figure 4.2.1 – Zones de la rivière Richelieu pour lesquelles 11 cartes statiques d’inondation ont été créées**

La figure 4.2.2 montre un détail des contours des inondations aux environs de Saint-Paul-de-l'Île-aux-Noix. La progression de la taille des zones inondées, des scénarios de plus faible débit à ceux de plus fort débit, y est nettement visible. Cette figure montre également les limites des zones atteintes par l'eau pour les divers scénarios. D'autre part, la figure 4.2.3 montre les hauteurs d'inondation simulées, également aux environs de Saint-Paul-de-l'Île-aux-Noix, pour le scénario 7, qui correspond à un débit de 1 539 m<sup>3</sup>/s et à un niveau d'eau de 31,32 m (NAVD 88) à Rouses Point.



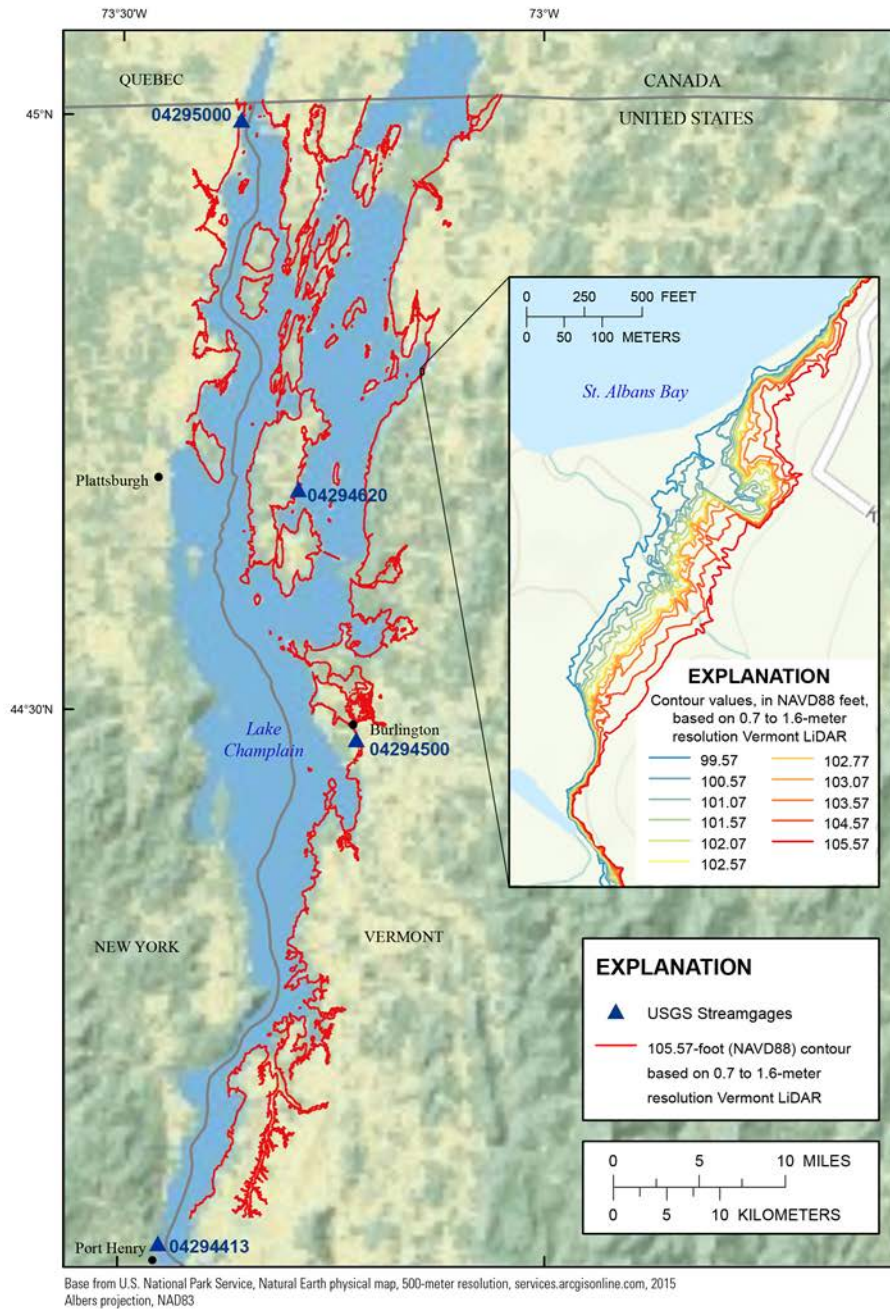
**Figure 4.2.2 – Détail des profils d’inondation de la rivière Richelieu aux environs de Saint-Paul-de-l’Île-aux-Noix**



**Figure 4.2.3 – Hauteurs d’inondation simulées pour le scénario 7, aux environs de Saint-Paul-de-l’Île-aux-Noix**

#### Cartes statiques d’inondation pour le lac Champlain

L’USGS a créé des cartes numériques d’inondation pour environ 160 km (100 milles) de zones riveraines du lac Champlain dans les comtés d’Addison, de Chittenden, de Franklin et de Grand Isle dans le Vermont, et dans le comté de Clinton dans l’État de New York – voir la figure 4.2.4 (cette figure a été produite en anglais). Les surfaces du lac illustrées dans les cartes d’inondation correspondent à des surfaces planes linéaires liées à des valeurs mesurées au limnimètre de Rouses Point. Les profils d’inondation pour les cartes statiques des plaines inondables du lac Champlain ont été étalonnés en comparant la carte statique d’inondation pour 103,20 pi selon NGVD 29 (ou 102,77 pi selon NAVD 88) créée pour ce projet et les zones inondées déterminées lors de l’inondation de mai 2011 à l’aide d’images satellitaires et de niveaux maximaux documentés atteints par les eaux. Les conditions aux autres limnimètres du lac et les effets de dénivellation dus au vent n’ont pas été pris en considération pour la création de cette carte.



**Figure 4.2.4 – Zones du lac Champlain pour lesquelles des cartes d’inondation ont été créées, et carte détaillée montrant les zones inondées pour les 11 scénarios de niveau d’eau du lac**

## 4.3 Contrôle de qualité des cartes produites

### 4.3.1 Écarts résiduels entre les courbes de niveau d'inondation près de la frontière

Bien que beaucoup de soin ait été apporté à évaluer et à compenser les effets des deux systèmes altimétriques différents, au moyen d'observations fournies par le GNSS sur l'ensemble du bassin versant, les courbes de niveau finales présentent certains écarts résiduels mineurs à la frontière. Pour un même scénario de niveau d'eau, les deux courbes sont distantes l'une de l'autre de 1 à 2 m (voir les figures 4.3.1 A et B). Ces écarts peuvent s'expliquer par le fait que deux ensembles de données et des techniques différentes ont été utilisés pour la production des courbes de niveau. La résolution horizontale des données LIDAR est de 1 m au Canada, alors qu'elle est de 0,70 m aux États-Unis.

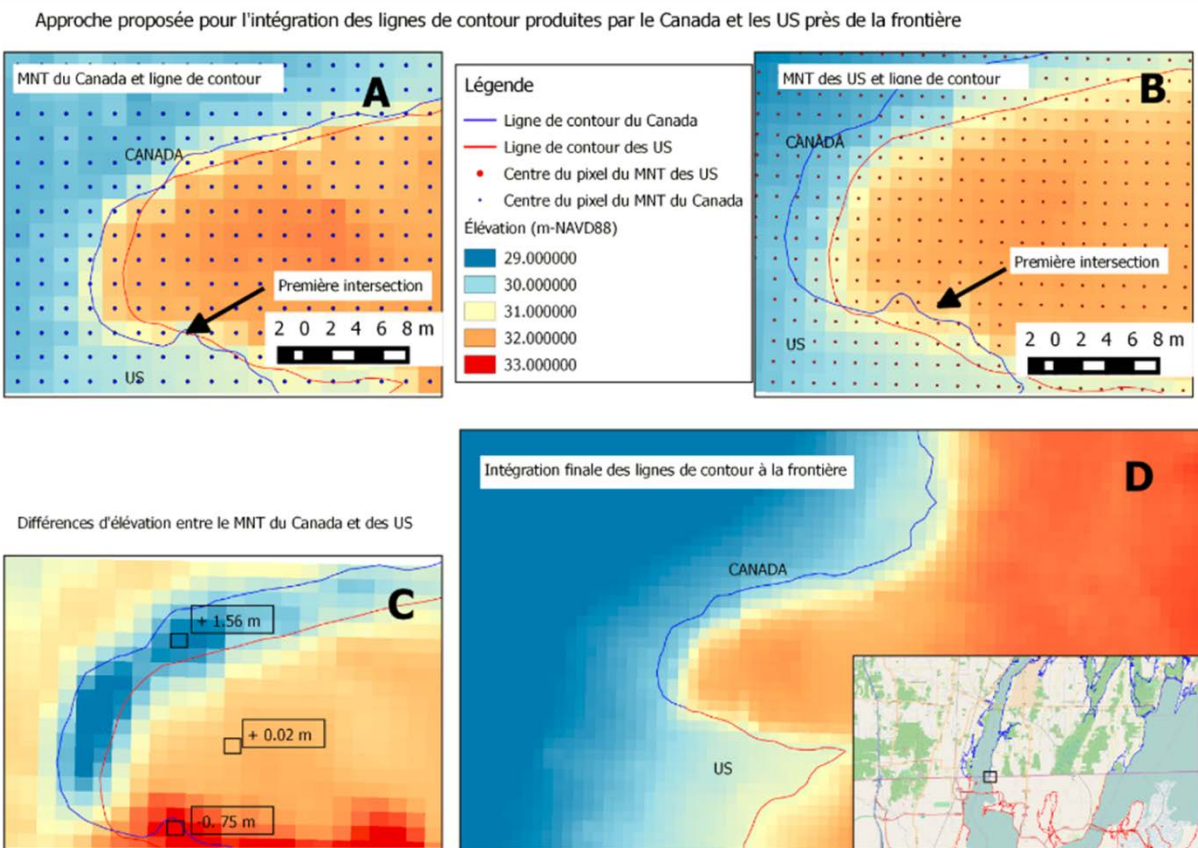


Figure 4.3.1 – Écarts entre les courbes de niveau d'inondation à la frontière

La cause la plus probable des écarts observés entre les courbes de niveau est liée à l'utilisation d'ensembles différents de données LIDAR. La figure 4.3.2 C illustre les différences entre les données LIDAR américaines et canadiennes. Deux explications possibles des différences entre les valeurs d'altitude ont été proposées. Premièrement, chacun des ensembles de données a ses propres précision et degré d'incertitude. Les moments et les méthodes de collecte ainsi que l'étalonnage ont été différents, d'où des données altimétriques différentes. La seconde explication possible est un léger décalage horizontal entre les deux ensembles de données. Sur



les rives d'un cours d'eau ou d'un lac, un décalage horizontal de 1 ou 2 m peut entraîner des différences dans les données altimétriques.

Voici la méthode qui, en première approximation, a été mise au point et appliquée à chaque courbe de niveau pour résoudre ce problème à la frontière internationale. Pour chaque scénario de niveau d'eau, on a cartographié deux courbes de niveau. À la frontière (ou à quelques mètres de celle-ci), pour chaque scénario de niveau d'eau, la première intersection entre les deux courbes de niveau a été choisie comme lieu officiel de transition des courbes de niveau. Au nord de ce point, la courbe de niveau américaine était supprimée et l'on ne conservait que celle du Québec, alors qu'au sud de ce point, la courbe de niveau du Québec était supprimée et l'on ne conservait que celle des États-Unis. Le résultat final est illustré à la figure 4.3.2 D, où l'on voit une courbe de niveau homogène et continue tracée près de la frontière.

La cause réelle des écarts observés entre les courbes de niveau n'a pas été formellement identifiée. Afin d'éviter des problèmes semblables dans l'avenir, il faudra s'attaquer à ces différences résiduelles entre les deux ensembles de données LIDAR, en créant un seul MAN homogène pour la totalité du bassin versant du lac Champlain et de la rivière Richelieu.

### **4.3.2 Dénivellation due au vent et action des vagues**

Même si les limites des zones inondées sont représentées par des courbes nettes dans les cartes d'inondation, ces cartes comportent un degré d'incertitude. Les limites d'inondation indiquées résultent d'estimations à partir des stades d'inondation à la station limnimétrique de l'USGS à Rouses Point, NY, et ne peuvent donc pas refléter partout avec exactitude les conditions locales. Des facteurs météorologiques propres à chaque lieu (moment et répartition des précipitations), ainsi que les vagues et les variations de niveau d'eau du lac dues au vent, peuvent entraîner des niveaux d'eau différents des altitudes statiques représentées à la station limnimétrique de Rouses Point, ce qui peut se traduire par des différences avec les limites d'inondation représentées sur les cartes. Des zones supplémentaires peuvent en outre être inondées en raison de conditions telles que des retenues d'eau dues à des débris ou embâcles localisés.

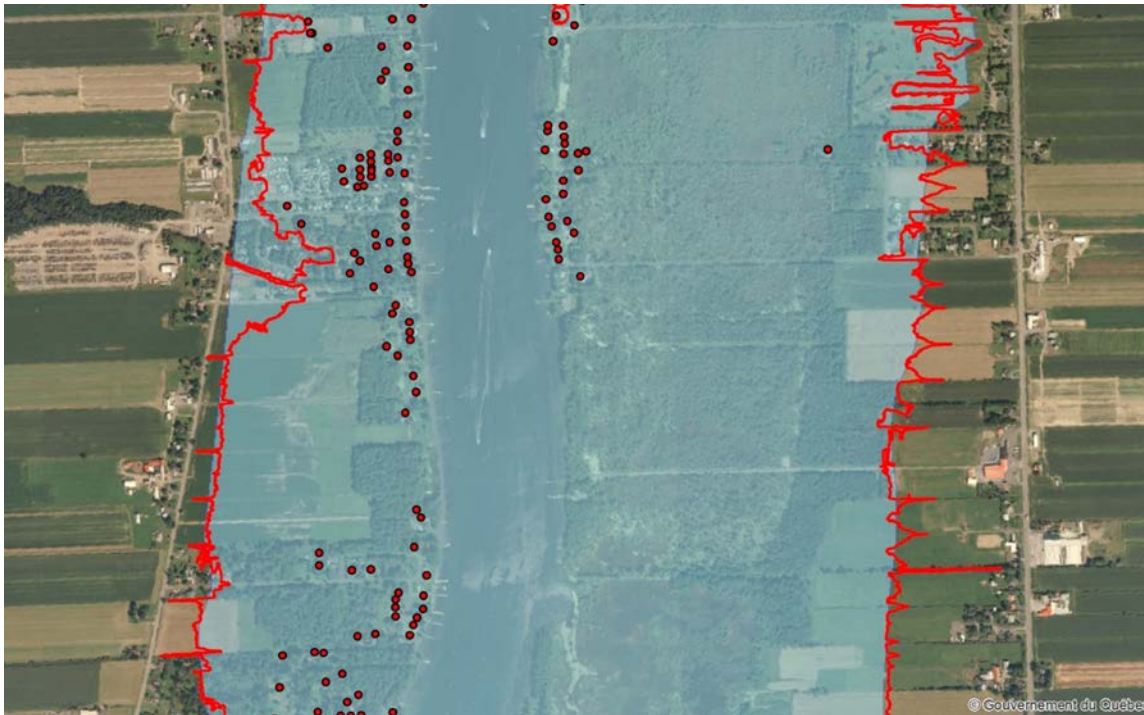
Les cartes d'inondation ne devraient pas être utilisées pour la navigation, la réglementation, l'émission de permis ou pour toute autre fin juridique. Ces cartes constituent un outil de planification des mesures d'urgence pour les autorités et le grand public en ce qui concerne les terres pouvant être inondées en cas de crue.

### **4.3.3 Inondation de 2011 simulée et inondation réelle**

EC et le CEHQ ont effectué une analyse sommaire du rendement des modèles en reproduisant une simulation de l'inondation de 2011 pour la rivière Richelieu. La figure 4.3.2 montre les zones que les autorités québécoises ont considérées comme inondées au printemps 2011, superposées au scénario 7 – celui qui se rapproche le plus des conditions extrêmes de l'inondation de 2011. Même s'il y a certaines différences entre les deux estimations de l'inondation, la figure 4.3.2 montre qu'elles concordent raisonnablement bien. On croit que les différences sont dues aux effets du vent, à l'incertitude inhérente de  $\pm 20$  cm ou aux contributions des affluents locaux.

L'analyse sommaire donne à conclure que la modélisation hydrodynamique 2D dans des conditions d'équilibre, combinée aux méthodes de cartographie du MAN LIDAR, représente raisonnablement bien les zones inondées, même si le modèle 2D, tel qu'il est actuellement

exploité, n'a pas la capacité de tenir compte de la dénivellation due au vent, ni de l'action des vagues.



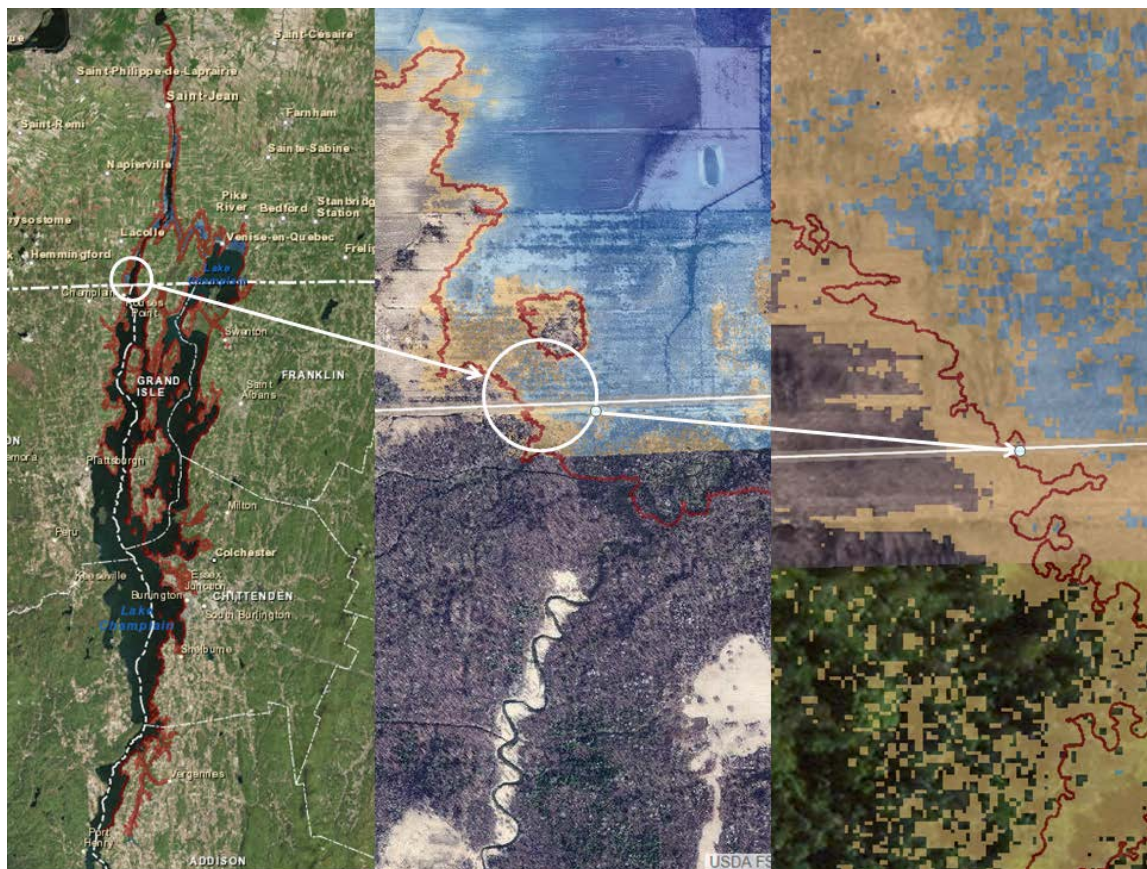
**Figure 4.3.2 – Exemple de comparaison entre la carte d’inondation pour le scénario 7 (103,2 pi – NGVD 29, en bleu) et l’étendue de l’inondation de 2011 (délimitée en rouge) selon les données du ministère de la Sécurité publique du Québec.** La surface approximative occupée par les eaux est tirée d’une analyse d’une image obtenue par télédétection en mai 2011; les points rouges désignent des sites identifiés comme ayant été inondés.

#### 4.4 Disponibilité des cartes d’inondation

Les cartes d’inondation de la rivière Richelieu sont disponibles dans la page Web de cartographie dynamique de la CMI, à l’adresse <http://arcg.is/1MhXui2>, sous forme d’un ensemble de cartes individuelles ou d’un ensemble unique de données de SIG.

Les cartes du lac Champlain sont également disponibles dans le site Web de la CMI, ainsi que dans le site *Flood Inundation Mapping Science* de l’USGS, à l’adresse [http://water.usgs.gov/osw/flood\\_inundation/](http://water.usgs.gov/osw/flood_inundation/) et dans le site du service de prévisions hydrologiques avancées du NWS (*National Weather Service – Service météorologique national des États-Unis*), à l’adresse <http://water.weather.gov/ahps/>, qui donne également des hydrogrammes des prévisions d’inondation pour la rivière Richelieu (lac Champlain) à Rouses Point, NY (station n° 04295000), et dans le lac Champlain à Burlington, VT (station n° 04294500).

La figure 4.4.1 présente différentes vues tirées de la page Web de cartographie dynamique de la plaine inondable produite par la CMI pour l’ensemble du bassin du lac Champlain et de la rivière Richelieu (<http://arcg.is/1MhXui2>). Elle montre l’exemple du scénario 7 près de la frontière.



**Figure 4.4.1 – Cartes d’inondation pour le lac Champlain et la rivière Richelieu au Canada et aux États-Unis – Exemple du scénario 7**

#### **4.5 Cartographie future des inondations pour le bassin versant du lac Champlain et de la rivière Richelieu**

Les cartes statiques d’inondation pour le bassin versant du lac Champlain et de la rivière Richelieu réalisées dans le cadre de ce projet constituent une bonne première étape en vue de caractériser les zones menacées en cas d’inondation future. Certaines zones autour du lac et le long de la rivière n’ont pas pu être cartographiées, en raison du manque de données (données LIDAR pour le côté ouest du lac dans l’État de New York, et données bathymétriques pour la rivière Richelieu en aval du barrage de Chambly). Les données LIDAR pour les zones riveraines du lac Champlain dans l’État de New York seront disponibles en 2016, ce qui permettra de compléter la cartographie de ce côté du lac.

Dans l’avenir, avec l’amélioration des modèles du lac et de la rivière, il sera possible de réaliser de meilleures cartes d’inondation, mises à jour de manière dynamique avec les prévisions des inondations. Ces travaux futurs tiendront compte des effets de dénivellation dus au vent ainsi que de l’action des vagues, ce qui n’est pas possible pour le moment.

## 4.6 Commentaires obtenus lors de rencontres avec des usagers choisis et d'autres parties prenantes

Deux rencontres avec des parties prenantes ont été organisées, le 3 novembre à Burlington (Vermont), aux États-Unis, et le 4 novembre à Saint-Jean-sur-Richelieu (Québec), au Canada. Ces rencontres avaient pour but de présenter les résultats du projet, notamment les cartes d'inondation versées dans le site Web de la CMI. Les participants ont pu consulter les pages Web, examiner les cartes et faire des commentaires sur ces produits. Au total, 53 personnes ont participé à ces réunions : répondants en cas d'urgence, planificateurs dans les collectivités, représentants d'organismes gouvernementaux. L'*annexe 5* donne la liste de ces participants.

Les participants ont appuyé les extraits du projet et formulé un certain nombre de commentaires utiles. Ils ont apprécié les cartes d'inondation et eu l'impression qu'elles seraient utiles dans leur travail.

### Commentaires sur l'application de cartographie et les ébauches de cartes incluses

- Il serait important d'ajouter un contexte explicite à l'onglet de chaque scénario (type d'inondation, fréquence, probabilité, notes explicatives).
- L'accès non seulement aux cartes, mais aussi à des couches de données et métadonnées, a été demandé. Cependant, des préoccupations ont été soulevées à propos de l'interprétation des cartes par le grand public (c.-à-d. par des non-spécialistes).
- Des images du terrain devraient être ajoutées à la fonction *Compare*. La possibilité de comparer deux scénarios d'inondation serait également appréciée.
- Les participants aimeraient trouver rapidement des lieux précis (p. ex. Rouses Point).
- L'effet visuel de la zone d'incertitude sur la partie canadienne de la carte était très efficace.
- Il faudrait ajouter la hauteur des eaux dans la partie des cartes portant sur le lac Champlain.
- L'accessibilité pendant les désastres et les situations d'urgence a été jugée importante.
  - Des préoccupations ont été exprimées quant à la capacité du serveur de cartes à répondre à de nombreux utilisateurs pendant une inondation. Il faudrait faire des tests pour savoir si le serveur peut répondre simultanément à de nombreux utilisateurs.
  - Il peut y avoir des pannes de courant ou d'Internet, ou des décideurs peuvent être en déplacement. Par conséquent, l'accès par des appareils mobiles rendrait les outils plus utiles pendant les circonstances extrêmes pour lesquels ils ont été conçus.
- Cette application pourrait être un bon moyen de sensibiliser le public à la dynamique du bassin versant et aux liens entre le lac et la rivière.

### Développements à venir

Les participants considèrent les travaux de la dernière année comme un bon point de départ. Ils aimeraient que le travail se poursuive en vue de la création d'un système en temps réel de prévision des crues et de cartographie des inondations pour toute la région. Ils souhaiteraient aussi que les gouvernements continuent de mettre en œuvre les recommandations contenues dans le plan d'étude de 2013, afin de définir les mesures permettant d'atténuer les inondations et leurs conséquences.

- Les participants ont jugé très important d'ajouter à l'application de cartographie et aux cartes statiques les zones riveraines du lac du côté de l'État de New York lorsque les données LIDAR seront disponibles. L'obtention de cartes d'inondation pour la zone comprise entre Chambly et Sorel le long de la rivière Richelieu a également suscité beaucoup d'intérêt.
- Les participants souhaiteraient que le travail se poursuive en ce qui concerne l'inclusion de l'effet des vents et des vagues. Cet aspect a semblé particulièrement important lors de la rencontre de Burlington.
- Au bout du compte, plusieurs usagers se sont montrés intéressés à utiliser les cartes et les modèles pour produire des scénarios de gestion de la protection contre les inondations, afin que des options de mitigation (y compris leur coût) puissent être évaluées, mais cela exigera des travaux supplémentaires.
- Une bonne communication des produits finals sera importante.

## 5 Une démarche pragmatique de prévision des crues et de cartographie des inondations

### 5.1 Vers la prochaine génération du système en temps réel de prévision des crues et de cartographie des inondations

La prévision des crues peut fournir des estimations des débits et des niveaux d'eau sur un horizon de quelques jours à quelques semaines. Ce système doit aussi montrer de manière dynamique les rives et les terres adjacentes qui peuvent être inondées. La prévision des crues et des inondations devrait fournir une information exacte, afin que les responsables des mesures d'urgence, les autorités locales, les résidents et les entreprises sachent comment réagir de manière optimale à une situation menaçante.

#### État actuel de la situation

À l'heure actuelle, des prévisions des niveaux d'eau du lac Champlain sont produites en temps réel et diffusées par le NWS pour une période de 3 jours. Elles sont fondées sur un modèle hydrologique des débits d'entrée du lac, un modèle hydraulique 1D du lac et une évaluation empirique des effets de dénivellation dus au vent. Ces prévisions donnent le niveau d'eau prévu au limnimètre de l'USGS à Rouses Point, NY.

Depuis 2014, les prévisions du NWS, ainsi que les données de surveillance en temps réel recueillies par EC et la modélisation hydrologique des débits latéraux entrants de la rivière Richelieu effectuée par Québec, servent d'intrants aux prévisions de débit de la rivière Richelieu produites et diffusées par le CEHQ. Le système actuel de prévision des crues est exploité par des équipes de prévisionnistes du NWS et du CEHQ, qui émettent manuellement des prévisions déterministes à partir des observations les plus récentes de niveau d'eau et de débit.

#### Lacunes

Le système actuel repose sur des modèles riverains unidimensionnels qui n'incluent pas les effets des courants dans le lac, du vent ou d'autres facteurs atmosphériques en plus des précipitations. De plus, il n'y a aucun lien explicite entre les niveaux d'eau prévus dans le lac ou la rivière et les zones inondées adjacentes, de sorte qu'à l'heure actuelle il n'y a aucune cartographie dynamique de la plaine inondable.

#### Améliorations futures

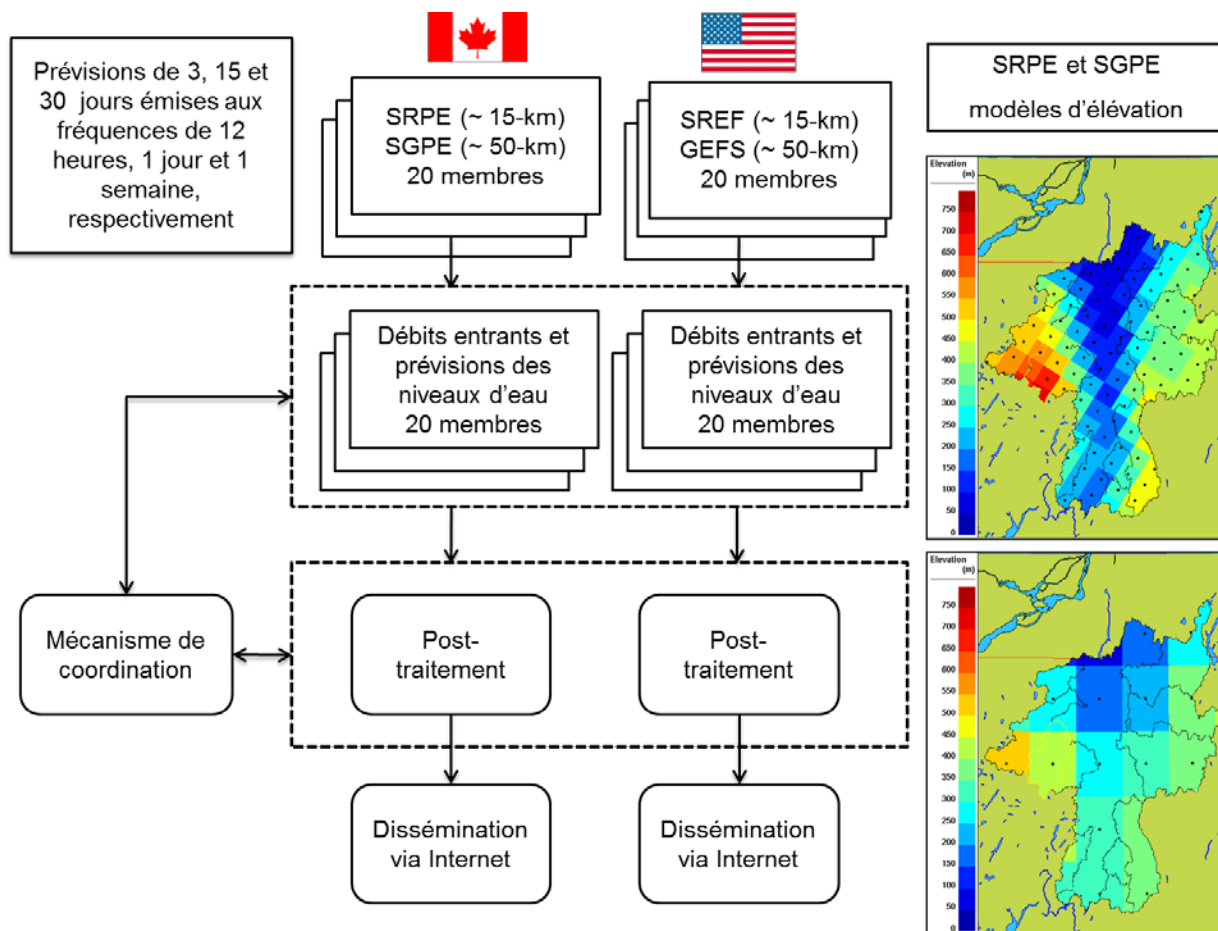
Le GTT a déterminé qu'il faudrait apporter les améliorations suivantes au système actuel pour l'ensemble du bassin versant du lac Champlain et de la rivière Richelieu :

1. inclure l'effet de dénivellation dû au vent (valeur de pointe et seiche) et l'effet des vagues sur le lac et la rivière;
2. augmenter le délai de prévision;
3. inclure une évaluation formelle des incertitudes des prévisions;
4. élaborer des cartes d'inondation liées de manière dynamique aux modèles de prévision.

Pour réaliser ces améliorations, le GTT a de plus déterminé que les capacités de modélisation des deux pays devraient permettre d'ajouter de la diversité, de réduire les biais propres à chaque modèle et de quantifier les incertitudes pour toute la gamme des conditions ayant des effets sur les inondations.

1. Les prévisions canadiennes et américaines portant sur les conditions météorologiques et hydrologiques, ainsi que sur les crues en fonction du modèle hydraulique, seraient post-traitées par un organisme international de coordination chargé de produire une seule prévision probabiliste binationale des crues, couvrant une période de 0 à 30 jours et accompagnée d'une estimation des incertitudes.
2. La prévision probabiliste des crues serait mise à la disposition des organismes chargés de leur diffusion à l'échelle fédérale, d'État, provinciale et locale.

La démarche envisagée par le GTT repose sur des efforts semblables consentis dans les Grands Lacs. Elle est solide et peut être mise en œuvre à l'aide de différents modèles à mesure qu'ils deviennent disponibles et qu'ils sont perfectionnés. Même si certains modèles ont été choisis à titre préliminaire, ces choix ne sont certainement pas définitifs. La figure 5.1.1 résume certaines composantes du système proposé de prévision des crues et de cartographie des inondations.



**Figure 5.1.1 – Composantes du système proposé de prévision des crues et de cartographie des inondations**

Plus précisément :

- Les systèmes de prévisions probabilistes des deux pays devraient être utilisés. Dans la configuration actuelle, cela représenterait 40 prévisions distinctes (définies comme des membres d'ensemble) : 20 du Canada et 20 des États-Unis.
- Le délai de prévision devrait tirer parti des systèmes de prévisions d'ensemble à court terme (de 0 à 3 jours), qui ont une meilleure résolution spatiale, et des systèmes de prévisions à plus long terme (de 4 à 30 jours), dont la résolution est moins bonne. Le tableau 5.1.1 résume les résolutions temporelle et spatiale des systèmes actuellement disponibles. Les sites Web du système de prévisions d'ensemble nord-américain (SPENA) donnent plus de renseignements sur ces produits : [https://meteo.gc.ca/ensemble/naefs/index\\_f.html](https://meteo.gc.ca/ensemble/naefs/index_f.html); <http://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/naefs/>.

**Tableau 5.1.1 – Résolutions temporelle et spatiale des systèmes canadien et américain de prévisions d'ensemble**

T = 0 - 3 jours		T = 4 - 30 jours	
Canada	U.S.	Canada	U.S.
Système global de prévisions d'ensemble (SGPE) 15 km, 20 membres	Short Range Ensemble forecasting System (SREF) 20membres 16km	Système global de prévisions d'ensemble (SGPE) 50 km, 20 membres	Global Ensemble Forecasting System (GEFS) 32 km, 20 membres
Résultats horaires, rafraichissement aux 12 heures	Outputs every 3 hours, refresh rate of 6 hours	Résultats aux 6 heures, rafraichissement aux 12 heures (semaines 1 et 2), puis aux semaines (semaines 3 et 4)	Outputs every 6 hours, refresh rate of 12 hours during weeks 1 and 2, weekly refresh for weeks 3 and 4

- Pour produire divers scénarios de ruissellement et de débits entrants, des membres atmosphériques seraient introduits dans les modèles hydrologiques exploités au Canada et aux États-Unis pour les prévisions à court terme et à long terme : prévisions portant sur la température de l'air, les précipitations sous forme de neige et de pluie pour les semaines initiales, de même que les vents pour les 3 premiers jours. Au Canada, les modèles hydrologiques et de surface du sol considérés sont une combinaison du modèle GEM-Hydro de versants et de surface du sol d'Environnement Canada, couplé à un modèle des cours d'eau, et du modèle hydrologique HYDROTEL actuellement utilisé par le CEHQ. Ces modèles fournissent une simulation de la fonte des neiges, du bilan altimétrique de l'eau ainsi que de l'écoulement des eaux de la rivière sur les terres.
- Les niveaux d'eau et les débits du lac Champlain et de la rivière Richelieu seraient simulés à l'aide des modèles exploités respectivement aux États-Unis et au Canada, dans lesquels on inclurait les débits entrants des affluents et les vents (pour les prévisions à court terme sur 3 jours), produisant ainsi une enveloppe probabiliste des niveaux d'eau et débits potentiels du lac et de la rivière. Les modèles envisagés sont : au Canada, H2D2, modèle d'éléments finis mis au point à l'INRS-ETE avec l'appui d'EC; aux États-Unis, FVCOM (*Finite Volume Community Ocean Model* – Modèle des volumes finis d'océanologie côtière), actuellement utilisé pour les Grands Lacs. Ce dernier modèle sert aux prévisions 2D et 3D immédiates et à plus long terme des courants, niveaux d'eau,



vents, vagues et glaces dans les Grands Lacs. Le GLERL (*Great Lakes Environmental Research Laboratory* – Laboratoire de recherches sur l’environnement des Grands Lacs) de la NOAA met au point des applications de ce modèle, qui est tenu à jour et exploité par le CO-OPS (*Center for Operational Oceanographic Products and Services* – Centre de produits et services opérationnels d’océanographie) de la NOAA. Une application semblable du FVCOM serait mise au point pour le bassin versant du lac Champlain et de la rivière Richelieu.

- Chaque cycle de simulation commencerait par une procédure d’assimilation, au cours de laquelle les variables d’état internes des modèles seraient modifiées afin de mieux représenter les conditions hydrologiques et hydrauliques présentes, et d’assurer une transition harmonieuse entre les niveaux d’eau et débits observés et prévus du lac et de la rivière, les débits entrants des affluents, ainsi que la vitesse et la direction des vents. La procédure d’assimilation serait mise au point de manière à tirer pleinement parti de l’information et de l’expertise disponibles.
- Avec la disponibilité prévue en 2016 du MAN LIDAR complet pour l’ensemble du bassin versant, les cartes de prévision des crues pourraient décrire les contours prévus de toute inondation, ainsi que la hauteur des eaux prévue localement en tout point de la surface des terres. Ce produit est considéré comme potentiellement utile pour optimiser la préparation en cas d’inondation, mais aussi comme un outil de communication pour informer le public de la gravité des inondations à l’échelle locale.

Cette démarche présente des ressemblances avec la méthode de modélisation qui fournit des simulations et prévisions précises de l’altitude de la surface de l’eau dans les eaux transfrontalières des Grands Lacs. En vertu de la méthode appliquée pour les Grands Lacs, les États-Unis et le Canada exploitent des modèles atmosphériques et hydrodynamiques parallèles. EC et la NOAA font tourner leurs modèles respectifs de manière indépendante, puis échangent les résultats obtenus. Dans le cas du lac Ontario et du fleuve Saint-Laurent, le Conseil international de contrôle du fleuve Saint-Laurent mène ses activités en exploitant les résultats des modèles atmosphériques et hydrodynamiques des deux pays.

Le recours à une démarche semblable pour le bassin versant du lac Champlain et de la rivière Richelieu constitue l’avenue la plus probable pour l’amélioration du rendement et la coordination des prévisions portant sur ce bassin versant.

## **5.2 Principaux points abordés lors de l’atelier technique et autres résultats de consultations menées auprès d’experts**

Le projet de système de prévision des crues et de cartographie des inondations décrit à la section 5.1 a été présenté à des experts lors d’un atelier technique spécial tenu en marge du congrès de l’IAGLR (*International Association for Great Lakes Research* – Association internationale pour la recherche sur les Grands Lacs) en mai 2015, à Burlington, dans le Vermont. L’*annexe 4* donne la liste des experts qui ont participé à cet atelier. Le GTT a posé aux experts des questions précises et a recueilli leur avis sur ces questions et sur d’autres sujets jugés importants.

Voici les questions qui ont été posées aux experts :

#### Prévisions météorologiques et hydrologiques

1. Un horizon de prévision de 0 à 3 jours est-il raisonnable?
2. Est-il faisable d'obtenir des prévisions des vents sur un horizon supérieur à 3 jours?
3. Devrions-nous adopter une méthode probabiliste ou déterministe?

#### Hydraulique du lac Champlain et de la rivière Richelieu

4. Quelle précision peut-on attendre de prévisions des inondations?
5. Devrions-nous ajouter l'action des vagues (hauteur, période, montée, débordement) ou des glaces en plus des effets de seiche?

#### Ensemble du système de prévision

6. Quelle est la meilleure manière de communiquer les prévisions des inondations et les cartes d'inondation? Quelles sont les caractéristiques souhaitables?
7. Devrait-on envisager d'ajouter de la valeur aux prévisions automatisées? Si oui, comment?
8. Caractéristiques souhaitées des cartes d'inondation :
  - a. Délimitation de la plaine inondable seulement?
  - b. Ajout de renseignements sur la hauteur des eaux?
  - c. Ajout de caractéristiques du terrain (bâtiments, routes, etc.)?
9. Est-il souhaitable d'utiliser un ensemble commun de prévisions des inondations pour produire les cartes canadiennes et américaines des inondations? Devrait-on mettre sur pied un conseil ou un comité?
10. Quel mécanisme de coordination serait raisonnable : un conseil ou un comité? Y a-t-il besoin de coordination?
11. Avons-nous oublié quelque chose d'important?
12. Y a-t-il d'autres options que nous devrions envisager?

Essentiellement, la démarche proposée par le GTT a reçu l'appui du groupe d'experts, qui a également fourni des idées sur des points précis. Voici les points saillants des intrants des experts :

- La méthode probabiliste comporte de nombreux avantages par rapport aux solutions déterministes : les produits probabilistes fournis avec leur degré d'incertitude permettent aux usagers de prendre des décisions en fonction de leur propre niveau acceptable de risque. La méthode probabiliste permet en outre de définir les intervalles de confiance associés aux cartes d'inondation, et limite potentiellement les problèmes et responsabilités juridiques.
- Ce serait une bonne idée d'inclure dans les prévisions les zones inondées et les hauteurs locales des eaux. Cela pourrait être très utile comme outil de sensibilisation lorsqu'il serait question de reconstruire une habitation au même endroit après une inondation majeure.
- Les experts ont indiqué que les mises à jour des prévisions pourraient survenir plus souvent qu'aux 12 heures comme cela est proposé, à condition de démontrer qu'une fréquence supérieure améliore les avertissements et la préparation en cas d'inondation.

- Les effets de dénivellation dus au vent (valeurs de pointe et seiche) devraient être inclus dans le modèle, car leurs répercussions sur les inondations sont importantes et évoluent rapidement. De plus, la partie du lac Champlain appelée « mer intérieure » ne réagit pas de la même manière que le corps principal du lac à l'ajout des vents dans le modèle, en raison de la présence de multiples ponts-jetées comportant de petites ouvertures et isolant ainsi des parties du lac.
- Les effets de l'action des vagues (hauteur, période, montée, débordement) devraient être pris en considération dans le travail de modélisation, car on a démontré dans le passé qu'ils peuvent avoir des répercussions importantes.
- Les effets des glaces devraient être documentés à l'aide de données historiques permettant d'évaluer le cas échéant les lieux et l'ampleur de leurs répercussions sur les inondations.
- Il faudrait définir des indicateurs de rendement du système de prévision des crues, les utiliser à l'occasion d'événements futurs et les perfectionner avec le temps. La NOAA et d'autres organismes utilisent déjà de tels indicateurs.
- Les experts ont confirmé que les organismes fédéraux, provinciaux et d'État chargés de la cartographie des inondations ont souvent élaboré leurs propres normes et procédures. Les responsabilités d'un éventuel organisme de coordination du bassin versant du lac Champlain et de la rivière Richelieu consisteraient essentiellement en la production de prévisions des inondations – niveaux d'eau et zones inondées – devant être diffusées par les organismes responsables selon leurs propres normes de présentation des prévisions.
- Les experts ont en outre mentionné qu'il faut prendre des précautions lorsque l'on combine des données de diverses sources pour créer des cartes d'inondation. Il faut aussi veiller à tenir compte des erreurs combinées dans le calcul des intervalles de confiance et la quantification des incertitudes.

### **5.3 Une démarche pragmatique en vue d'un système opérationnel de prévision des crues et de cartographie des inondations**

Pour améliorer dans l'avenir le rendement des prévisions, il faut un système de modélisation qui combine les aspects atmosphériques, hydrologiques et hydrauliques, ainsi que la dénivellation due au vent et l'action des vagues. De plus, une méthode qui relie plus étroitement les niveaux d'eau du lac et de la rivière aux limites des terres adjacentes inondables est nécessaire pour faire en sorte que les zones inondées soient incluses dans les prévisions.

Le GTT soumet que la démarche de modélisation décrite à la section 5.1 fournirait l'information requise pour la production des prévisions les meilleures possibles en matière d'inondations. Il endosse l'avis des experts consultés selon lequel des produits probabilistes (fournis avec leur degré d'incertitude) permettraient aux usagers de prendre des décisions en fonction de leur propre niveau acceptable de risque.

Le GTT suggère de plus que les aspects décrits ci-après soient abordés dans un éventuel système en temps réel de prévision des crues et de cartographie des inondations.

### 5.3.1 Coordination

Le GTT propose de mettre sur pied un organisme binational (formé de représentants des États-Unis, du Canada, des États de New York et du Vermont, ainsi que du Québec), afin d'assurer la coordination des activités de prévision pour le bassin versant du lac Champlain et de la rivière Richelieu. Ce groupe coordonnerait les activités des organismes responsables de l'exécution des divers systèmes de modélisation, tirant partie de la diversité et de la redondance des prévisions des inondations pour émettre les meilleures prévisions probabilistes conjointes possibles. Ces prévisions feraient l'objet d'un accord mutuel et seraient mises à la disposition des organismes responsables des avertissements d'inondation et de la cartographie des inondations dans les pays, États et province touchés.

L'organisme binational de coordination serait plus actif au cours des mois précédant la crue nivale du printemps, jusqu'à ce que les niveaux d'eau et les débits reviennent à un état de faible risque, pendant les crues déclenchées par de fortes tempêtes (comme l'ouragan Irène en 2011), ou en réaction à d'autres événements pour lesquels il faut connaître avec précision les niveaux d'eau et les débits.

L'organisme de coordination devrait faire intervenir les organismes de prévision et viser à faciliter les échanges de connaissances scientifiques à jour et les activités de développement organisationnel dans le bassin versant du lac Champlain et de la rivière Richelieu. L'élaboration, la mise en œuvre et l'entretien des modèles, la disponibilité et l'analyse des données d'observation et de prévision, ainsi que la mesure des rendements des prévisions, sont des exemples d'activités conjointes possibles. L'organisme de coordination devrait aussi encourager les agences à établir des objectifs communs, des priorités de développement et des outils de prévision compatibles pour le lac Champlain et la rivière Richelieu. Enfin, l'organisme de coordination devrait appuyer les organismes opérationnels et favoriser la collaboration binationale pour la production de prévisions quotidiennes des crues.

L'organisme de coordination devrait de plus promouvoir les échanges d'information et des pratiques exemplaires au sein des organismes qui diffusent et interprètent les prévisions en vue des besoins des usagers, par exemple pour des fins de sécurité. Ces organismes devraient avoir des échanges opérationnels, en particulier dans des situations d'inondation, concernant les divers produits de prévision disponibles. Ils devraient aussi produire des messages cohérents et utiles à l'intention des usagers, en exploitant au mieux les données disponibles. Chaque organisme devrait conserver la responsabilité de diffuser et d'interpréter les prévisions à l'intention de ses clients.

### 5.3.2 Lien entre les résultats des modèles et la cartographie des inondations

La mise au point de cartes en temps réel des inondations devrait être étroitement associée au développement d'un système de prévisions pour le lac Champlain et la rivière Richelieu. Les résultats des prévisions portant sur le lac et la rivière devraient être harmonieusement reliés aux MAN des États-Unis et du Canada pour produire en temps réel des cartes d'inondation, le tout alimentant des applications de diffusion en ligne qui afficheraient dans des délais très courts les résultats des modèles sur des cartes topographiques détaillées.

L'intégration presque en temps réel des MAN et des prévisions concernant le lac et la rivière permettrait aux organismes chargés des mesures d'urgence à l'échelle locale, d'État, provinciale et fédérale, de préparer les cartes d'inondation selon leurs propres normes et de les diffuser à

leurs clients respectifs avec une valeur ajoutée telle que l'identification des conséquences possibles des inondations sur des propriétés et des infrastructures cruciales – routes, ponts, égouts, installations d'eau potable, etc.

Ces cartes d'inondation ne seront pas conçues pour être utilisées à des fins de planification et de réglementation, mais plutôt pour les mesures d'urgence et pour connaître le potentiel d'inondation étant donné les conditions actuelles et à venir.

### 5.3.3 Modélisation des vagues

Même si l'on ne s'attend pas à ce que l'action des vagues seule modifie de manière significative le débit à la sortie du lac Champlain, et qu'elle n'a aucun effet sur le niveau d'eau moyen, elle peut sûrement causer des dommages locaux aux infrastructures. Les tempêtes qui traversent le lac Champlain peuvent provoquer des vagues pouvant atteindre jusqu'à 2 mètres ([http://www.weather.gov/media/btv/lake/Science\\_behind\\_the\\_forecast.pdf](http://www.weather.gov/media/btv/lake/Science_behind_the_forecast.pdf)).

Le NWS utilise à l'heure actuelle un modèle simple de vagues pour des conditions se limitant au fetch (<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/JC089iC03p03586/pdf>), mais le Canada et les États-Unis sont en voie de remplacer leurs modèles nationaux de prévision des vagues par le modèle WaveWatch III (<http://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch/>) de la NOAA, modèle de 3<sup>e</sup> génération applicable à une grande variété de conditions. Ce modèle bénéficie d'un appui à long terme de la NOAA et d'EC, et est continuellement amélioré par la collectivité.

Le GTT propose d'inclure un outil de prévision des vagues fondé sur le modèle WaveWatch III dans le futur système de prévision des crues pour le lac Champlain. Ce modèle pourrait servir à abaisser le seuil auquel des avertissements d'inondation seraient émis pour le lac. Une difficulté en ce qui concerne l'étalonnage du modèle WaveWatch III pour le lac Champlain vient de l'absence de station d'observation des vagues sur le lac. Il serait utile d'installer, du moins pour la phase d'étalonnage du modèle, des bouées de mesure des vagues dans la partie principale du lac ainsi que dans la partie appelée « mer intérieure ».

### 5.3.4 Options en matière de modèles de prévision

Comme on l'a mentionné plus haut à la section 5.1, même si certains modèles ont été choisis à titre préliminaire, ces choix ne sont certainement pas définitifs. Quelques options supplémentaires sont présentées ici, mais le choix définitif devrait faire partie d'une éventuelle prochaine phase de développement d'un système opérationnel en temps réel de prévision des crues et de cartographie de la plaine inondable.

**Modèles atmosphériques :** Pour répondre aux besoins actuels de prévision du temps, la NOAA exploite chaque jour de multiples modèles atmosphériques, à des diverses échelles de détail et de fréquences. Pour la prochaine version du modèle de prévision du lac Champlain, on envisage d'utiliser des intrants atmosphériques fournis par un système de prévisions d'ensemble. Les principaux systèmes de prévisions d'ensemble actuellement exploités par la NOAA comprennent le GEFS (*Global Ensemble Forecasting System* – Système global de prévisions d'ensemble) et le SREF (*Short Range Ensemble Forecasting* – Système de prévisions d'ensemble à court terme). Pour fournir au modèle hydrologique futur un ensemble complet d'intrants, on a suggéré de combiner des intrants atmosphériques à court terme (SREF) et à long terme (GEFS). À mesure qu'ils seront disponibles, d'autres modèles pourront être pris en considération à la place du SREF et du GEFS.

EC exploite un ensemble similaire de systèmes de prévisions, à savoir le Système régional de prévisions d'ensemble (SRPE), pour les prévisions à court terme, et le Système global de prévisions d'ensemble (SGPE), pour les prévisions à long terme (jusqu'à 30 jours). EC prévoit introduire dans les modèles hydrologiques une combinaison des prévisions fournies par le SRPE et le SGPE, afin d'obtenir une seule prévision hydrologique d'ensemble.

Il est à noter qu'EC et la NOAA contribuent tous deux au Système de prévision d'ensemble Nord-Américain (SPENA), qui combine à l'heure actuelle les prévisions du GEFS et du SGPE, et qui devrait bientôt inclure aussi celles du SREF et du SRPE. Il existe donc un ensemble coordonné de prévisions atmosphériques qui pourrait aussi être utilisé, ce qui permettrait d'inclure dans les modèles hydrologiques et hydrodynamiques d'EC et de la NOAA des prévisions atmosphériques des deux pays.

**Modèles hydrologiques et hydrauliques** : Pour la simulation du lac Champlain aux États-Unis, un système intégré reliant les modèles atmosphériques (p. ex. la combinaison SREF/GEFS mentionnée dans le tableau 5.1.1) à un modèle hydrodynamique 3D du lac (p. ex. FVCOM) pourrait être ultimement mis en place. Le FVCOM est actuellement utilisé dans le GLCFS (*Great Lakes Coastal Forecast System* – Système de prévisions côtières des Grands Lacs) et dans le GLOFS (*Great Lakes Operational Forecasting System* – Système de prévisions opérationnelles des Grands Lacs). Ces systèmes fournissent des prévisions portant sur les niveaux d'eau, les vents de surface, les effets de seiche, la hauteur des vagues, les courants et la température de surface, les profils de température et l'épaisseur des glaces. Dans les conditions actuelles d'exploitation par la NOAA, le GLCFS fournit des prévisions 2 fois par jour.

Pour la simulation du lac Champlain et de la rivière Richelieu au Canada, les systèmes de prévisions régionales et globales mentionnés dans le tableau 5.1.1 seraient reliés à une combinaison du modèle GEM-Hydro de versants et de surface du sol d'EC, couplé à un modèle des cours d'eau, et s'il y a lieu du modèle hydrologique HYDROTEL actuellement utilisé par le CEHQ. Les débits entrants et les vents prédits seraient inclus dans un modèle hydrodynamique 2D tel que H2D2 pour produire 2 fois par jour des prévisions de niveau d'eau.

**Prise en considération des incertitudes** : Pour aider à quantifier l'incertitude associée à des perturbations aux paramètres des modèles atmosphériques ou hydrodynamiques, on peut lancer l'exécution des modèles en introduisant de telles perturbations (en général une perturbation par exécution d'un modèle). La fourchette de résultats de ces exécutions des modèles aide à quantifier les effets potentiels de ces perturbations. Les méthodes automatisées d'exécutions multiples de modèles sont souvent appelées « exécutions d'ensemble » des modèles. Les modèles futurs du lac Champlain devraient être mis en œuvre de manière à profiter de cette méthode, afin qu'ils puissent donner non seulement une prévision, mais aussi l'incertitude associée à cette prévision. D'autres incertitudes associées à la dénivellation due au vent ainsi qu'à l'action des vagues pourraient également être communiquées.

## 6 Résumé des conclusions et recommandations

### 6.1 Conclusions concernant le système en temps réel de prévision des crues et de cartographie des inondations

#### Prévisions météorologiques

Une comparaison des prévisions du SREF et du SRPE sur des événements choisis de 2015 a montré que les deux systèmes ont une capacité de prévision semblable<sup>5</sup> à celle du SRPD, les prévisions du SREF étant légèrement meilleures. Il semble donc possible de prévoir la composante nord-sud des vents sur un horizon de 3 jours à des fins de prévision des crues, mais il faudra mettre au point une procédure d'étalonnage et d'étude des phénomènes de sous-échelle avant que les prévisions des vents puissent servir dans des modèles hydrodynamiques, étant donné en particulier que les prévisions du SREF et du SRPE ont des biais très différents.

Les résultats des vérifications indiquent que le SGPE a une capacité utile de prévision allant jusqu'à 5 jours : pour le 1<sup>er</sup> jour, la corrélation entre les précipitations observées et le membre de contrôle du SGPE est très élevée (coefficient de corrélation de 0,95), puis elle chute à 0,54 pour le 5<sup>e</sup> jour. À plus long terme, le SGPE n'a pas de capacité significative de prévision. L'utilisation de la moyenne de l'ensemble plutôt que du membre de contrôle du SGPE n'a pas permis d'allonger le délai utile de prévision, mais a effectivement augmenté légèrement la corrélation pour les 2 premiers jours.

Même si l'utilisation des prévisions mensuelles de température pourrait être justifiée en février, il pourrait être plus approprié d'utiliser les données de température des 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> semaines de février pour prévoir de manière fiable les crues devant survenir plus tard dans la saison. D'autre part, la possibilité d'utiliser des prévisions mensuelles d'ensemble pour les 3 mois pourrait s'avérer intéressante pour les périodes plus chaudes de l'année (été et automne), où les observations des températures passées sont moins représentatives des conditions actuelles.

#### Données altimétriques utilisées au Canada et aux États-Unis

Des écarts entre les données des deux côtés de la frontière internationale dans le bassin versant du lac Champlain et de la rivière Richelieu ont empêché de comparer les altitudes de la surface de l'eau et les inondations d'un pays à l'autre. Pour corriger ces écarts, des membres du personnel de l'USGS, d'EC, ainsi que des Levés géodésiques du Canada et des États-Unis, ont mené en avril 2015 un projet visant à définir une transformation des données altimétriques, de telle sorte que toutes les données sur les niveaux d'eau pour le bassin du lac Champlain et de la rivière Richelieu soient représentées de manière homogène dans les deux pays. Des lieux choisis correspondant à des stations limnimétriques et fluviométriques, ainsi que des lieux hydrosensibles dans la plaine inondable du bassin versant du lac Champlain et de la rivière Richelieu ont fait l'objet de levés intensifs pendant une période de 2 jours. Cela a donné des corrections verticales permettant de représenter les niveaux d'eau dans l'un ou l'autre des deux systèmes de référence fondés sur le géoïde (NAVD 88 ou CGVD2013). Ces corrections

---

<sup>5</sup> La capacité de prévision d'un système donné est définie comme son rendement par rapport à une autre technique de référence.

permettent maintenant de convertir les niveaux d'eau des deux côtés de la frontière à une seule valeur commune, ce qui est essentiel pour créer des cartes d'inondation cohérentes pour le lac et la rivière.

#### Mise en place de deux nouvelles stations limnimétriques

Deux nouvelles stations limnimétriques ont été installées sur le lac Champlain, à Port Henry et à l'est de Grand Isle. La station de Port Henry est jugée précieuse à long terme pour le lac, parce qu'elle fournit des données sur le niveau d'eau dans une partie du lac qui n'est pas représentée par les autres stations en fonction. De plus, la station de Port Henry décrit les conditions dans la partie sud du milieu du lac mieux que celle de Whitehall, située à l'extrême sud du lac. La modélisation préliminaire du lac montre que le limnimètre de Port Henry est plus utile pour l'estimation de l'impact des vents. La station limnimétrique de Grand Isle deviendra probablement essentielle pour l'étalonnage de la partie « mer intérieure » du modèle hydraulique, car c'est la seule station qui mesure les niveaux d'eau dans la portion sud de cette partie fermée du lac.

#### Collecte de nouvelles données sur les substrats et la répartition des plantes aquatiques dans la rivière Richelieu, entre Saint-Jean-sur-Richelieu et Rouses Point sur le lac Champlain

De nouvelles données sur le substrat et les plantes aquatiques immergées ont été recueillies entre le pont Gouin à Saint-Jean-sur-Richelieu et la frontière internationale près de Rouses Point. La campagne de collecte des données a eu lieu entre les 8 et 17 septembre 2015. Ces nouvelles données pourraient servir à créer des cartes à jour du substrat, ainsi que de l'assemblage et de la densité des plantes aquatiques, ce qui permettrait d'améliorer les coefficients de frottement du modèle.

#### Modélisation hydraulique 2D expérimentale du lac Champlain

Un modèle hydraulique 2D d'éléments finis a été créé pour le lac Champlain entre Whitehall, NY, et Saint-Jean-sur-Richelieu, au Québec. Ce modèle utilise un seul système de référence altimétrique (NAVD 88), et une base de données hydrologiques a été mise sur pied pour représenter les débits entrants de 13 affluents, y compris une estimation des zones non mesurées. Ce modèle expérimental permet de prévoir avec exactitude dans des conditions d'équilibre les crues du lac et de la rivière dans tout le domaine du modèle. Des simulations préliminaires montrent aussi que les niveaux d'eau dans le corps principal du lac et dans la partie appelée « mer intérieure », reliée au reste par des ouvertures relativement petites dans une série de ponts-jetées. On s'attend à ce que le recours à un modèle 2D permette de prédire avec plus de précision que la méthode 1D actuelle les niveaux d'eau dans les diverses zones du bassin versant du lac Champlain et de la rivière Richelieu, en particulier lorsque l'on mettra en œuvre dans l'avenir une version dynamique du modèle hydraulique.

On a observé des lacunes et erreurs importantes dans les données bathymétriques actuellement disponibles, essentiellement dans la région comprise entre Saint-Jean-sur-Richelieu et Sorel, et il s'est avéré impossible d'étalonner le modèle hydraulique pour cette région. Des données bathymétriques supplémentaires ont été recueillies dans la section de contrôle hydraulique



naturel située près de Saint-Jean-sur-Richelieu, mais il faut encore une description plus fine afin de compléter l'étalonnage du modèle hydraulique pour l'ensemble des débits possibles.

#### Création d'une base de données LIDAR combinée à un modèle altimétrique numérique pour le bassin versant

De nouvelles données LIDAR ont été recueillies au cours de ce projet dans l'État de New York. Une fois qu'elles seront officiellement traitées et livrées, de même que les données LIDAR en cours de collecte et de traitement dans le Vermont, une base de données LIDAR complète sera disponible pour l'ensemble du bassin versant du lac Champlain et de la rivière Richelieu. Les données pour les États de New York et du Vermont seront disponibles en 2016.

D'autres efforts seront nécessaires pour créer une base de données unique et homogène de LIDAR et de MAN pour l'ensemble du bassin versant. À l'heure actuelle, les données canadiennes et américaines de LIDAR et de MAN ne correspondent pas entièrement et n'ont pas la cohérence voulue pour créer un MAN unique utilisable pour la modélisation et la cartographie des inondations pour l'ensemble du bassin versant.

#### Méthode la meilleure de prévision des crues et de cartographie des inondations

La démarche présentée à la section 5.1 a été élaborée par les membres du GTT, soumise à d'autres experts, puis améliorée en fonction de leurs avis. Le GTT estime que sa mise en œuvre opérationnelle produira le meilleur système en temps réel binational possible de prévision des crues et de cartographie des inondations pour l'ensemble du bassin versant du lac Champlain et de la rivière Richelieu.

En résumé, le GTT recommande d'adopter une méthode probabiliste partant de modèles atmosphériques, en passant par des modèles hydrologiques, jusqu'à des modèles hydrodynamiques avec incorporation en temps réel d'observations. Une telle méthode mettrait à profit les capacités des États-Unis et du Canada de produire des cartes d'inondation probabilistes (avec un degré d'incertitude qui soit communiqué). Cette façon de faire permettrait aux usagers de prendre des décisions en fonction de leur propre niveau acceptable de risque. Elle permettrait en outre de définir les intervalles de confiance associés aux cartes d'inondation, et limiterait potentiellement les problèmes et responsabilités juridiques.

Un organisme binational de coordination assurerait la coordination entre les organismes intervenant dans les prévisions. Son action porterait sur les aspects suivants : développement et entretien des modèles; post-traitement des prévisions afin de produire une seule prévision probabiliste binationale des inondations sur un horizon de 0 à 30 jours avec une estimation des incertitudes; contrôle de la qualité; diffusion des prévisions produites.

## 6.2 Conclusions concernant les cartes statiques d'inondation

### Cartes statiques d'inondation

Les travaux actuels ont fait grandement progresser la création de cartes d'inondation pour le lac Champlain et la rivière Richelieu. Ces cartes constituent un outil de planification des mesures d'urgence pour les autorités et le grand public en ce qui concerne les terres pouvant être inondées en cas de crue. Des cartes statiques d'inondation ont été créées, du côté américain pour les zones riveraines du lac Champlain situées dans le Vermont et une partie de celles qui sont situées dans le nord-est de l'État de New York. Au Canada, des cartes statiques d'inondation ont été créées pour la rivière Richelieu, de la frontière jusqu'aux rapides Fryer. Ces cartes sont accessibles dans le site Web de la CMI, à l'adresse <http://arcg.is/1MhXui2>. Un MAN LIDAR complet disponible au Canada a aussi permis de représenter la hauteur des eaux pour les 11 scénarios de crue.

Un ensemble de 11 scénarios de niveau d'eau à la station limnimétrique de Rouses Point, NY, a servi à créer les cartes statiques d'inondation. Ces scénarios portent sur une altitude de la surface du lac allant de 100 à 106 pi (de 30,480 à 32,308 m) et devraient couvrir la totalité des conditions de crue sur le lac. Ces cartes ont toutefois leurs limites et ne reflètent pas sur l'ensemble du bassin les conditions dynamiques réelles liées aux variations constantes de la dénivellation due au vent et de l'action des vagues, qui entraînent des variations locales des niveaux d'eau. Pour les cartes du lac Champlain, on a supposé que toute la surface du lac est horizontale en amont de la station limnimétrique de Rouses Point. Dans le cas de la rivière Richelieu, la pente de la surface de l'eau a été établie à l'aide d'un modèle hydraulique 2D. De plus, la disponibilité de données LIDAR pour toute la plaine inondable a permis de produire des estimations locales des hauteurs d'inondation associées à chaque scénario.

Certains travaux de cartographie n'ont pas encore été effectués :

- La zone riveraine du lac Champlain dans l'État de New York pourra être cartographiée lorsque les données LIDAR de l'État de New York seront disponibles en 2016. Pour le moment, cette partie des zones riveraines du lac Champlain ne peut pas être cartographiée pour les situations d'inondation. Une petite partie devra également être cartographiée dans le comté de Rutland (partie sud du Vermont) une fois que les données LIDAR auront été recueillies dans cette zone.
- Les niveaux d'eau et les débits de la rivière Richelieu n'ont pas pu être modélisés avec exactitude entre l'entrée du bassin de Chambly et le fleuve Saint-Laurent, en raison de la piètre qualité des données bathymétriques. Il est essentiel de recueillir de nouvelles données bathymétriques du bas Richelieu pour obtenir un modèle hydraulique de cette partie du bassin versant et permettre la création de cartes d'inondation entre le barrage de Chambly et Sorel.

Des cartes d'inondation affichées dans un format cohérent et commun, d'une manière qui soit facile d'accès par le Web au Canada comme aux États-Unis, constitueraient un précieux outil pour les services d'urgence, les autorités locales et les gestionnaires de la plaine inondable.

Dans l'avenir, grâce à des modèles améliorés du lac et de la rivière ainsi qu'un nouveau système de prévision des crues, les prévisions produites devront être liées à des cartes d'inondation montrant en temps réel les conditions présentes et les conditions futures prévues, et montrant les

effets des vagues et de la dénivellation due au vent sur les degrés d'inondation, alors que les cartes actuelles sont statiques et ne montrent pas les conditions présentes.

### 6.3 Recommandations

1. Pour créer un système en temps réel de prévision des crues et de cartographie des zones inondées, le GTT recommande que l'approche probabiliste à deux volets présentée au chapitre 5 pour la prévision des crues soit adoptée et mise en œuvre, y compris la modélisation de la dénivellation due au vent et de l'action des vagues. Cette démarche comprendra l'élaboration de modèles hydrodynamiques du lac Champlain, qui seront utilisés de la même manière que les modèles actuels des Grands Lacs, c'est-à-dire pour fournir les volets américain et canadien d'un modèle de prévision à l'organisme binational de coordination, qui les considérera dans ses propres prévisions.
2. Pour étalonner et valider un futur système de prévision, le GTT recommande que les stations limnimétriques de Port Henry et de Grand Isle demeurent en exploitation, à tout le moins pour la collecte de données couvrant une fourchette représentative de niveaux d'eau en vue de l'étalonnage du modèle hydraulique. Le GTT recommande en outre que l'on installe, au moins pour la phase d'étalonnage d'un modèle de vagues, des bouées de mesure des vagues dans la partie principale du lac et dans la portion du lac appelée « mer intérieure ».
3. Le GTT recommande qu'un organisme binational de coordination soit mis sur pied sous les auspices de la CMI pour : coordonner l'action des organismes qui interviennent dans les prévisions en temps réel, en ce qui concerne l'élaboration et la mise à jour des modèles, la disponibilité des données d'observation, le contrôle de qualité des prévisions du modèle; la production de prévisions binationales de niveau d'eau. La mise sur pied de cet organisme de coordination assurera la transmission de messages cohérents aux intervenants en cas d'urgence et au public à propos des prévisions de niveau d'eau du lac Champlain et de la rivière Richelieu qui sont diffusées.
4. En vue d'améliorer la capacité de prévision des crues pour l'ensemble du bassin versant du lac Champlain et de la rivière Richelieu, le GTT recommande l'acquisition de nouvelles données bathymétriques sur la rivière Richelieu, entre Sorel et la section de contrôle hydraulique naturel située près de Saint-Jean-sur-Richelieu, ainsi que la réalisation de cartes à jour du substrat et des assemblages de plantes aquatiques.
5. Afin de créer des produits en temps réel de prévision des crues et de cartographie des zones inondées pour l'ensemble du bassin versant du lac Champlain et de la rivière Richelieu, le GTT recommande qu'un MAN unique et cohérent soit produit pour l'ensemble du bassin versant du lac Champlain et de la rivière Richelieu une fois que toutes les données LIDAR et bathymétriques auront été recueillies et auront fait l'objet d'un contrôle de la qualité.
6. Le GTT recommande que des cartes statiques d'inondation soient produites pour l'ensemble du bassin versant du lac Champlain et de la rivière Richelieu.
7. Le GTT recommande que les nouvelles données recueillies, les données d'observation des vents et les nouveaux modèles servent à étalonner une version dynamique du modèle hydraulique de l'ensemble du bassin versant du lac Champlain et de la rivière Richelieu.

## Annexe 1 – Lettres de renvoi des gouvernements

### Lettre de renvoi du gouvernement des États-Unis adressée à la CMI



**United States Department of State**

*Bureau of Western Hemisphere Affairs  
Washington, D.C. 20520-6258*

July 24, 2014

Mr. Chuck Lawson  
Secretary, U.S. Section  
International Joint Commission  
2000 L St. NW, Suite 615  
Washington, D.C. 20440

#### *Lake Champlain and Richelieu River Reference*

Dear Mr. Lawson:

The Governments of Canada and the United States thank the International Joint Commission (IJC) for its July 2013 Plan of Study: “The Identification of Measures to Mitigate Flooding and the Impacts of Flooding of Lake Champlain and Richelieu River” which the IJC undertook in response to our governments’ request in a March 19, 2012, letter to investigate flood mitigation solutions following devastating floods in that region in the spring of 2011.

We particularly appreciate the IJC’s presentation of individually scalable options for study implementation. We understand that the IJC recommends Option C at \$14 million (to be funded jointly by Canada and the United States) as the best option for a thorough understanding of the causes and solutions for flood mitigation through a long-term study. Our governments are not at this time, however, able to commit to such a large scale, long-term undertaking, and thus cannot make a reference including that option now.

Instead, in accordance with Article IX of the Boundary Waters Treaty, the Governments of Canada and the United States request that the International Joint Commission assist our governments in the implementation, with existing 2014 funding, of two scalable components in the study. These components will provide valuable information to assist affected communities in floodplains in a practical and immediate fashion and also provide a basis for a future real-time flood forecasting and inundation mapping system.

This reference is limited to initiating and completing work on the following, which will be organized and implemented by a small technical working group, to be convened by the IJC:

1. Addressing and closing data gaps through data collection and harmonization of topographic, bathymetric, aquatic vegetation, soil texture, Light Detection and Ranging (LiDAR) and observed climate and hydrometric data collection (per section 3.1, page 34 of the July 2013 Plan of Study) as are necessary as a basis for the earliest possible initiation of a real-time flood forecasting and inundation mapping system. This system would consist of the development of new real-time Lake Champlain and Richelieu River hydrologic and hydraulic models for predicting lake and river levels, and a precise Digital Elevation Model of the flood plain to delineate the contours of corresponding inundated areas.
2. Creation of static flood inundation maps using a combination of existing and new data and modeling to provide practical information to communities. These maps would show which areas would be affected if Lake Champlain and Richelieu River water levels hit different heights.

Subject to each government's national appropriations process, Canada and the United States may consider a subsequent reference on other components of the 2013 Plan of Study, including using data from this work to produce a real time flood forecasting and inundation mapping system.

In examining and collecting data, the IJC-assembled working group should build on the technical data gap analysis outlined in the IJC July 2013 plan of study and decide early on which government agency will take leadership on the different elements. The study should incorporate and take advantage of existing systems and government mechanisms already in place on both sides of the border. These include the bilateral agreement that the NOAA has with Environment Canada, the Canada-Quebec St. Lawrence Action Plan, and a Vermont river management/river easement program that deals with river stability and other elements. The group should also assess and use data from the U.S. national initiative to promote better soil health through management to increase water infiltration and water holding capacity on a landscape basis and wetland restoration, among other things. The working group should also take into account and build on work done at the state and provincial levels.

Although the political-social study component identified in the 2013 Plan of Study cannot be undertaken at this time, the workgroup should be sensitive throughout this process to local stakeholders' concerns as expressed during the previous plan of study.

The Commission is requested to pursue its activities expeditiously and to report periodically to the Governments. This should include an initial work plan by August 2014 and interim briefings at the October 2014 and April 2015 semi-annual meetings. The final report should be completed by September 2015.

The United States and Canada underscore their joint commitment to the principle of parity, including funding, under the Boundary Waters Treaty. To undertake the work described above, the United States Government commits \$487,000 of appropriated 2014 fiscal year funds. The Government of Canada commits a minimum of \$150,000 of existing Canadian Section IJC funds and in-kind contributions (the dollar value of which shall be mutually agreed by the Governments), with the understanding that ultimate funding of all references relating to this matter will, in cumulative total, be funded by the two Governments on a basis of parity.

Canada's total contribution of resources over the course of this and any future references will equal those of the United States, subject to national appropriations.

The governments of Canada and the United States welcome the opportunity to collaborate and assist the Commission in its work. An identical letter is being sent to the Secretary of the Canadian Section of the Commission by the Canadian Department of Foreign Affairs, Trade and Development.

Sincerely,



Sue Saarnio  
Acting Deputy Assistant Secretary  
Bureau of Western Hemisphere Affairs  
United States Department of State

## Traduction de la lettre de renvoi du gouvernement du Canada à la CMI

Le 31 juillet 2014

135, promenade Sussex  
Ottawa (Ontario) K1A 0G2

Mme Camille Mageau  
Secrétaire, Section canadienne  
Commission Mixte Internationale  
234, avenue Laurier Ouest, 22<sup>e</sup> étage  
Ottawa (Ontario) K1P 6K6

### *Renvoi au sujet du lac Champlain et de la rivière Richelieu*

Madame,

Les gouvernements du Canada et des États-Unis remercient la Commission mixte internationale (CMI) d'avoir publié en juillet 2013 le *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*, en réponse à la demande de nos gouvernements d'étudier les solutions d'atténuation des inondations à la suite des inondations dévastatrices dans la région au printemps 2011, demande exprimée dans une lettre datée du 19 mars 2012.

Nous apprécions particulièrement la présentation faite par la CMI des options distinctes et individuellement modifiables pour la mise en œuvre de l'étude. Nous comprenons que la CMI recommande l'option C, au coût de 14 millions de dollars (financement conjoint entre le Canada et les États-Unis), comme la meilleure option pour bien comprendre les causes des inondations et les solutions visant leur atténuation par l'intermédiaire d'une étude à long terme. Nos gouvernements ne sont cependant pas en mesure, pour le moment, de prendre un engagement d'une telle portée et d'une telle durée, et ne peuvent donc pas faire un renvoi comprenant cette option.

Les gouvernements du Canada et des États-Unis demandent plutôt, conformément à l'article IX du Traité des eaux limitrophes, que la CMI les aide à mettre en œuvre deux éléments modifiables de l'étude, avec les fonds de 2014. Ces éléments fourniront des données précieuses qui aideront les collectivités touchées dans les plaines inondables d'une manière pratique et immédiate, et constitueront la base d'un futur système de prévision des inondations en temps réel et de cartographie des plaines inondables.

Ce renvoi se limite au lancement et à l'achèvement des travaux suivants, lesquels seront organisés et mis en œuvre par un petit groupe de travail technique formé par la CMI :

1. Aborder et combler les lacunes dans les données en recueillant et en harmonisant les données sur la topographie, la bathymétrie, la végétation aquatique et la texture des sols, et en faisant l'acquisition de données par radar optique (LIDAR) ainsi que de données climatiques et hydrométriques d'observation (d'après la section 3.1, page 34, du Plan d'étude de juillet 2014), au besoin, en vue du lancement le plus rapidement possible d'un système de prévision des inondations en temps réel et de cartographie des plaines inondables. Ce système permettrait d'élaborer de nouveaux modèles hydrologiques et hydrauliques en temps réel pour le lac Champlain et la rivière Richelieu afin de prévoir les niveaux d'eau du lac et de la rivière, ainsi qu'un modèle altimétrique numérique précis de la plaine inondable pour délimiter les contours des zones inondées correspondantes.

2. Créer des cartes statiques des plaines inondables en utilisant une combinaison de données existantes et de données nouvelles et en procédant à la modélisation pour fournir de l'information pratique aux collectivités. Ces cartes montreraient les zones qui seraient touchées si les niveaux d'eau du lac Champlain et de la rivière Richelieu atteignaient des hauteurs différentes.

Le Canada et les États-Unis, étant chacun assujettis à un processus d'affectation de crédits propre à leur gouvernement, peuvent envisager un renvoi ultérieur au sujet d'autres éléments du Plan d'étude de 2013, notamment l'utilisation de données de ces travaux pour produire un système de prévision des inondations en temps réel et de cartographie des plaines inondables.

En examinant et en recueillant les données, le groupe de travail formé par la CMI devrait se fonder sur l'analyse des lacunes dans les données techniques énoncées dans le Plan d'étude de juillet 2013 et désigner rapidement l'organisme gouvernemental qui dirigera les différents éléments. L'étude devrait intégrer les systèmes existants et les mécanismes gouvernementaux déjà en place des deux côtés de la frontière, et en tirer profit. Parmi ceux-ci figurent les accords bilatéraux que la NOAA a conclus avec Environnement Canada, le plan d'action sur le Saint-Laurent Canada-Québec et un programme de gestion ou de servitude des cours d'eau du Vermont qui traite de la stabilité des cours d'eau et d'autres éléments. Le groupe devrait aussi évaluer et utiliser les données issues de l'initiative nationale des États-Unis visant la promotion d'une meilleure santé des sols grâce, entre autres, à une gestion favorisant l'augmentation de l'infiltration de l'eau et de la capacité de rétention d'eau à l'échelle du paysage, de même que la restauration des milieux humides. Le groupe de travail devrait aussi tenir compte des travaux menés à l'échelle des provinces et des États, et en tirer parti.

Bien que l'élément politico-social défini dans le Plan d'étude de 2013 ne puisse être abordé à l'heure actuelle, le groupe de travail devrait être sensible tout au long du processus aux préoccupations exprimées par les intervenants locaux lors de la préparation du plan d'étude précédent.

On demande à la Commission de mener ses activités de manière expéditive, et de rendre compte périodiquement aux gouvernements. Elle doit notamment présenter un premier plan de travail d'ici août 2014 et des documents d'information provisoires lors des réunions semestrielles d'octobre 2014 et d'avril 2015. Le rapport final doit être achevé au plus tard en septembre 2015.

Le Canada et les États-Unis soulignent leur engagement au principe de la parité, y compris sur le plan du financement, pour l'application du Traité des eaux limitrophes. Afin de réaliser les travaux indiqués plus haut, le gouvernement des États-Unis engage 487 000 \$ des fonds alloués pour l'exercice 2014. Le gouvernement du Canada fournira au moins 150 000 \$ des fonds dont dispose la Section canadienne de la CMI et des contributions en nature (dont la valeur en dollars sera convenue d'un commun accord par les gouvernements), étant entendu que le total cumulé du financement des travaux dont est saisie la CMI dans ce dossier sera assumé à parité par les deux gouvernements.

La contribution totale du Canada en termes de ressources tout au long du présent renvoi et de tous les renvois futurs sera équivalente à celle des États-Unis, selon les crédits parlementaires nationaux.

Les gouvernements du Canada et des États-Unis sont heureux de collaborer et d'aider la Commission dans ces travaux. Une lettre identique à celle-ci est également envoyée au secrétaire de la Section américaine de la Commission par le département d'État des États-Unis.

Veuillez agréer, Madame, mes salutations distinguées.

Le directeur,  
Affaires transfrontalières – États-Unis,

Christopher Wilkie



## Annexe 2 – Directive de la CMI

### DIRECTIVE À L'INTENTION DU GROUPE DE TRAVAIL TECHNIQUE INTERNATIONAL DU LAC CHAMPLAIN ET DE LA RIVIÈRE RICHELIEU

La présente directive a pour objet de créer le Groupe de travail technique international du lac Champlain et de la rivière Richelieu et de lui confier le mandat d'examiner les questions que les gouvernements du Canada et des États-Unis ont soumises à la Commission mixte internationale au sujet des débordements du lac Champlain et de la rivière Richelieu, dans leurs lettres de renvoi des 24 et 31 juillet 2014 (copie jointe), et d'en faire rapport à la Commission. Comme ils l'indiquent dans leurs lettres, les gouvernements demandent que la Commission réalise deux volets du plan d'étude du lac Champlain et de la rivière Richelieu qui a été présenté en 2013. Le plan d'étude a été établi à la suite des inondations de 2011 dans le bassin du lac et de la rivière, et il s'appuie sur la longue expérience que la Commission a acquise de l'étude de la gestion des eaux du bassin, y compris par son ordonnance d'approbation de 1937 et par le renvoi que lui ont présenté les gouvernements en 1973 pour lui demander d'étudier et de rendre compte de la faisabilité et de la pertinence de régulariser l'eau de la rivière Richelieu dans la province de Québec afin de remédier aux conditions extrêmes dans la rivière et dans le lac Champlain (voir les dossiers 38A et 98R). Il y est recommandé une étude complète des mesures pour atténuer les inondations et leurs répercussions dans le bassin versant. La Commission doit réaliser deux volets modifiables que prévoit le plan d'étude, en respectant les limites du financement.

Ces volets sont les suivants :

1. S'attaquer aux lacunes et les combler par la collecte et l'harmonisation, selon les besoins, des données sur la topographie, la bathymétrie, la végétation aquatique et la texture des sols, des données acquises par radar optique (LIDAR), ainsi que de données climatiques et hydrométriques d'observation (d'après la section 3.1, page 38, du plan d'étude de juillet 2013), en vue du lancement le plus rapide possible du système de prévision en temps réel et de cartographie des plaines inondables. Ce système suppose l'élaboration de modèles hydrologiques et hydrauliques en temps réel pour le lac Champlain et la rivière Richelieu afin de prévoir les niveaux d'eau du lac et de la rivière, ainsi que d'un modèle altimétrique numérique précis des plaines inondables pour délimiter les contours des zones inondées correspondantes.
2. Créer des cartes statiques des plaines inondables en utilisant une combinaison de données anciennes et nouvelles de même qu'en recourant à la modélisation, pour fournir de l'information pratique aux collectivités. Ces cartes montreront les zones qui seraient touchées si les niveaux d'eau du lac Champlain et de la rivière Richelieu atteignaient diverses hauteurs.

Pour l'aider à organiser et à réaliser les travaux décrits dans les lettres de renvoi de juillet, la Commission nomme les membres et les coprésidents du Groupe de travail technique. Les coprésidents convoquent les réunions du Groupe de travail technique, les président et dirigent ensemble la planification et la réalisation des travaux. Le Groupe de travail technique est

binational et se compose d'un nombre égal de membres provenant de chaque pays. La Commission prend les dispositions voulues pour la prestation des services de secrétariat afin que soient exécutées les tâches que confieront les coprésidents ou le Groupe de travail technique. La Commission oriente le Groupe de travail technique et, selon ce que détermine celui-ci, elle cherche à obtenir une assistance technique des deux gouvernements. Les membres du Groupe de travail technique et de tout comité ou sous-groupe de travail que le Groupe de travail technique peut créer assument leurs propres dépenses, sauf s'il en est convenu autrement avec la Commission.

Le Groupe de travail technique travaille avec la Commission et les organismes que celle-ci détermine pour effectuer les tâches; il fournit à ces organismes et au personnel de la Commission des décisions, des évaluations et des conseils d'ordre technique sur la meilleure façon de réaliser les tâches assignées par la Commission, en respectant le budget et l'échéancier prévus dans le renvoi présenté par les gouvernements. Étant donné que les tâches envisagées comportent des facteurs inconnus quant à l'étendue et à la résolution des données existantes, à la portée de la collecte de données nécessaires pour combler les lacunes et à la nature de la modélisation informatique et des produits ou interfaces graphiques qui sont nécessaires pour rendre les données utiles au public et aux gouvernements, le Groupe de travail technique peut proposer à la Commission des modifications à apporter aux tâches.

Pour faciliter la sensibilisation du public, le Groupe de travail technique diffuse aussi largement que possible les renseignements relatifs à son plan de travail, y compris les données, ses rapports et d'autres documents, comme il convient. En collaboration avec la Commission, il établit et tient à jour un site Web hébergé par la Commission comme moyen de diffuser l'information touchant la réalisation de ses tâches. Dans la mesure du possible, il communique sur son site Web tous les documents qui sont rendus publics selon les règles de procédures de la Commission.

Le Groupe de travail technique tient la Commission au courant de ses progrès et de la direction qu'il prend. Il demeure au fait des activités et des conditions dans l'ensemble du bassin et informe la Commission de celles qui seraient susceptibles d'influer sur ses travaux. En plus de communiquer régulièrement avec les membres désignés du personnel de la Commission, le Groupe de travail technique est prêt à rencontrer la Commission au moins deux fois par année si les commissaires lui en font la demande, auquel cas il présente un rapport d'étape par écrit à la Commission au moins trois semaines avant la rencontre.

Le Groupe de travail technique agit en tant qu'organisme unitaire. Ses membres servent la Commission à titre professionnel, de manière impartiale, pour le bien commun des deux pays, et non en qualité de représentants de leur pays, de leur organisme d'attache ou de tout autre groupe d'appartenance. Le Groupe de travail technique s'efforce de prendre ses décisions par consensus et informe immédiatement la Commission de toute divergence irréconciliable. S'il y a des imprécisions dans les consignes reçues de la Commission, il faut demander des éclaircissements à celle-ci sans attendre.

Dans le mois suivant sa création, le Groupe de travail technique soumet à l'approbation de la Commission un plan de travail initial qui précise le calendrier des tâches à accomplir, les

produits à livrer et le budget, et qui se fonde sur la présente directive. Le plan de travail comprend une proposition qui décrit comment la consultation du public sera menée. Ce plan de consultation explique comment le Groupe de travail technique collaborera avec les gouvernements fédéraux, les provinces et les États, ainsi qu'avec les autres parties prenantes et le public. Le Groupe de travail technique rassemble les données nécessaires en vue du lancement du système de prévision en temps réel et de cartographie des plaines inondables, y compris les cartes statiques des plaines inondables, et présente son rapport final au plus tard le 15 septembre 2015. Le rapport final devrait renfermer les constatations, les conclusions et les recommandations du Groupe de travail technique au sujet des questions dont les gouvernements ont saisi la Commission.

Les documents officiels (y compris les lettres, notes de service et communications de toutes sortes) sont confidentiels et ne peuvent être diffusés qu'après que la Commission les a rendus publics. La Commission considère que tous les documents officiels du Groupe de travail technique et de ses comités ou groupes de travail sont également confidentiels. Par conséquent, ces documents doivent être identifiés comme tels et conservés dans des dossiers distincts.

Le 12 septembre 2014

## Annexe 3 – Composition du Groupe de travail technique international du lac Champlain et de la rivière Richelieu, ainsi que son personnel de soutien technique et administratif

### Groupe de travail technique international du lac Champlain et de la rivière Richelieu

<p><b>Jean-François Cantin, ing., M.Sc.</b> Coprésident – Canada</p> <p>Gestionnaire, Section hydrologie et écohydraulique Services hydrologiques nationaux Service météorologique du Canada Environnement Canada 1550, avenue d’Estimauville Québec (Québec) G1J 0C3 Téléphone : 418 649-6565 Téléphone mobile : 418 564-0521 Télécopie : 418 648-5643 Courriel : <a href="mailto:jean-francois.cantin@ec.gc.ca">jean-francois.cantin@ec.gc.ca</a></p>	<p><b>Keith Robinson</b> Coprésident – États-Unis</p> <p>Directeur, New England Water Science Center US Geological Survey 331 Commerce Way, Suite 2 Pembroke NH 03244 Téléphone : 603 226-7807 Téléphone mobile : 603 986-2327 Télécopie : 603 226-7894 Courriel : <a href="mailto:kwrobins@usgs.gov">kwrobins@usgs.gov</a></p>
<p><b>Vincent Fortin</b> Membre du gouvernement fédéral</p> <p>Chercheur en prévision numérique environnementale Environnement Canada 2121, route Transcanadienne Dorval (Québec) H9P 1J3 Téléphone : 514 421-4630 Courriel : <a href="mailto:vincent.fortin@ec.gc.ca">vincent.fortin@ec.gc.ca</a></p>	<p><b>William (Bill) Saunders</b> Membre du gouvernement fédéral</p> <p>Hydrologue principal National Weather Service Northeast River Forecast Center 445 Myles Standish Blvd. Taunton, MA 02780 Téléphone : 508 824-5116, poste 260 Courriel : <a href="mailto:mwilliam.saunders@noaa.gov">mwilliam.saunders@noaa.gov</a></p>
<p><b>Daniel Leblanc, ing. M.Sc.A.</b> Membre du Québec</p> <p>Directeur adjoint Ministère du Développement durable, de l’Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques Direction régionale de l’analyse et de l’expertise de l’Estrie et de la Montérégie 201, place Charles-Le Moyne, 2<sup>e</sup> étage Longueuil (Québec) J4K 2T5 Téléphone : 450 928-7607, poste 305 Télécopie : 450 928-7625 Courriel : <a href="mailto:daniel.leblanc@mddelcc.gouv.qc.ca">daniel.leblanc@mddelcc.gouv.qc.ca</a></p>	<p><b>Blaine Hastings</b> Membre du Vermont</p> <p>Hydrologue Vermont Department of Environmental Conservation Watershed Management Division 1 National Life Drive, Main 2 Montpelier, VT 05620-3522 Téléphone : 802 490-6156 Courriel : <a href="mailto:Blaine.Hastings@state.vt.us">Blaine.Hastings@state.vt.us</a></p>

<p><b>Richard Turcotte, ing, Ph.D.</b> Membre du Québec</p> <p>Conseiller scientifique Direction de l'expertise hydrique Centre d'expertise hydrique du Québec Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques 675, boulevard René Lévesque Est Québec (Québec) G1R 5V7 Téléphone : 418 521-3993, poste 7145 Télécopie : 418 643-6900 Courriel : <a href="mailto:Richard.Turcotte2@mddelcc.gouv.qc.ca">Richard.Turcotte2@mddelcc.gouv.qc.ca</a></p>	<p><b>Fred Dunlap</b> Membre de l'État de New York</p> <p>Coordonnateur, NY Lake Champlain Basin New York State Dept of Environmental Conservation 1115 NYS Rte 86 - Box 296 Ray Brook, NY 12977 Téléphone : 518 897-1241 Courriel : <a href="mailto:fred.dunlap@dec.ny.gov">fred.dunlap@dec.ny.gov</a></p>
--	---

### Soutien technique

<p><b>Paul Boudreau</b> Ingénieur en hydraulique Services hydrologiques nationaux Service météorologique du Canada Environnement Canada 1550, avenue d'Estimauville Québec (Québec) G1J 0C3 Courriel : <a href="mailto:paul.boudreau@ec.gc.ca">paul.boudreau@ec.gc.ca</a></p>	<p><b>Robert Flynn</b> Hydrologue et ingénieur New England Water Science Center US Geological Survey 331 Commerce Way, Suite 2 Pembroke NH 03244 Téléphone : 603 226-7824 Télécopie : 603 226-7894 Courriel : <a href="mailto:rfflynn@usgs.gov">rfflynn@usgs.gov</a></p>
---	--

### Soutien administratif

<p><b>Soutien administratif supplémentaire pour les services en français</b> Madeleine Papineau Courriel : <a href="mailto:Papineaum@ottawa.ijc.org">Papineaum@ottawa.ijc.org</a></p>	<p><b>Soutien administratif du LCBP</b> Stephanie Castle Lake Champlain Basin Program Analyste en environnement, NEIWPC Adjointe technique, LCPB 54 West Shore Rd., Grand Isle, VT 05458 Téléphone : 802 372-3213 Télécopie : 802 372-3233 Courriel : <a href="mailto:mscastle@lcbp.org">mscastle@lcbp.org</a></p>
---	--

## Annexe 4 – Experts présents à l’atelier de l’IAGLR sur la prédiction des niveaux d’eau

Participants à l’atelier technique de l’IAGLR, le 27 mai 2015, à Burlington, VT			
Nom	Organisme	Courriel	Domaines d’expertise
Tom Manley	Université <i>Middlebury College</i>	<a href="mailto:tmanley@middlebury.edu">tmanley@middlebury.edu</a>	Hydrodynamique et bathymétrie
Dmitry Beletsky	Université du Michigan	<a href="mailto:beletsky@umich.edu">beletsky@umich.edu</a>	Modélisation hydrodynamique 3D
Alvaro Linares	Université du Wisconsin	<a href="mailto:alvaro.linares@wisc.edu">alvaro.linares@wisc.edu</a>	
Adam Bechle	Université du Wisconsin	<a href="mailto:bechle@wisc.edu">bechle@wisc.edu</a>	Oscillations de haute fréquence du niveau d’eau des Grands Lacs
Jamie Dickhout	Environnement Canada	<a href="mailto:Jamie.Dickhout@ec.gc.ca">Jamie.Dickhout@ec.gc.ca</a>	Régulation du Saint-Laurent et du lac Supérieur
Jeanette Fooks	Environnement Canada	<a href="mailto:jeanette.fooks@ec.gc.ca">jeanette.fooks@ec.gc.ca</a>	Surveillance hydrométrique et hydraulique
Wendy Leger	Environnement Canada	<a href="mailto:wendy.leger@ec.gc.ca">wendy.leger@ec.gc.ca</a>	Gestion adaptative des Grands Lacs et du Saint-Laurent
Cherie-Lee Fietsch	Bruce Power	<a href="mailto:cherie-lee.fietsch@brucepower.com">cherie-lee.fietsch@brucepower.com</a>	Écologie aquatique, modélisation, écologie benthique
Francis Chua	Bruce Power	<a href="mailto:francis.chua@brucepower.com">francis.chua@brucepower.com</a>	
Jiangtao Xu	NOAA/NWS/CO-OPS	<a href="mailto:jiangtao.xu@noaa.gov">jiangtao.xu@noaa.gov</a>	Hydrodynamique et modélisation d’écosystèmes
Martin Mimeault	MDDELCC	<a href="mailto:martin.mimeault@mdelcc.gouv.qc.ca">martin.mimeault@mdelcc.gouv.qc.ca</a>	Lac Champlain
Zachary Hanson	Université Notre-Dame	<a href="mailto:zhanson@nd.edu">zhanson@nd.edu</a>	Hydrologie
Chun-Mei Chiu	Université Notre-Dame	<a href="mailto:cchiu2@nd.edu">cchiu2@nd.edu</a>	Hydrologie
David Fay	CMI	<a href="mailto:fayd@ottawa.ijc.org">fayd@ottawa.ijc.org</a>	Gestion de la quantité d’eau
Duncan Mueller	Aquatic Informatics	<a href="mailto:duncan.mueller@aquaticinformatics.com">duncan.mueller@aquaticinformatics.com</a>	Hydrologie
Jamison Romano	Aquatic Informatics	<a href="mailto:jamison.romano@aquaticinformatics.com">jamison.romano@aquaticinformatics.com</a>	Hydrométrie
Lauren Fry	US Army Corps of Engineers	<a href="mailto:lauren.fry@usace.army.mil">lauren.fry@usace.army.mil</a>	Hydrologie
Alan Hamlet	Université Notre-Dame	<a href="mailto:hamlet1@nd.edu">hamlet1@nd.edu</a>	Modélisation hydrologique
Marie-Amélie Boucher	Université du Québec à Chicoutimi	<a href="mailto:marie-amelie-boucher@uqac.ca">marie-amelie-boucher@uqac.ca</a>	Hydrologie (prévisions d’ensemble)
Aubert Michaud	IRDA	<a href="mailto:aubert.michaud@irda.qc.ca">aubert.michaud@irda.qc.ca</a>	Modélisation hydrologique
Étienne Gaborit	Environnement Canada	<a href="mailto:etienne.gaborit.s@gmail.com">etienne.gaborit.s@gmail.com</a>	Modélisation hydrologique
Richard Sanfaçon	Retraité du Service hydrologique du Canada	<a href="mailto:rsanfacon@reformat.ca">rsanfacon@reformat.ca</a>	Hydrographie, niveaux d’eau

## Annexe 4 – Participants présents aux rencontres d’usagers en novembre 2015

Participant	Organisme	Lieu de la rencontre
Eric Day	Clinton County, Emergency Services	Burlington
Wallace Day	Observateur, New York	Burlington
Rob Evans	Vermont Agency of Natural Resources (ANR)	Burlington
Emily Harris	Vermont Emergency Management and Homeland Security	Burlington
Greg Hanson	National Weather Service	Burlington
Bill Howland	Lake Champlain Basin Program	Burlington
Nathaniel Neider	St. Alban Town (planificateur)	Burlington
Rebecca Pfeiffer	Vermont ANR	Burlington
Dean Pierce	Ville de Shelburne	Burlington
Meghan Sullivan	Affaires étrangères, Commerce et Développement Canada (MAECD)	Burlington et Saint-Jean-sur-Richelieu
Ned Swanberg	Vermont Department of Environmental Conservation (DEC) River Program	Burlington
Sylvain Arteau	St-Jean-sur-Richelieu	Saint-Jean-sur-Richelieu
Claudine Beaudoin	Ministère des Affaires municipales et de l’Occupation du territoire du Québec (MAMOT)	Saint-Jean-sur-Richelieu
Denis Bourdon	Saint-Denis-sur-Richelieu	Saint-Jean-sur-Richelieu
Luc Castonguay	Ville de St-Jean-sur-Richelieu	Saint-Jean-sur-Richelieu
Daniel de Brouwer	Ville de Richelieu	Saint-Jean-sur-Richelieu
Chantale Chatelain	Comité de concertation et de valorisation du bassin de la rivière Richelieu (COVABAR)	Saint-Jean-sur-Richelieu
Michelle Chabot	Municipalité régionale de comté (MRC) du Haut-Richelieu	Saint-Jean-sur-Richelieu
Andrée Clouâtre	Municipalité de Henryville	Saint-Jean-sur-Richelieu
Marcel Comiré	COVABAR	Saint-Jean-sur-Richelieu

Chantal Couture	Parcs Canada	Saint-Jean-sur-Richelieu
Eric Desbiens	St-Jean-sur-Richelieu	Saint-Jean-sur-Richelieu
François Ferrer	Parcs Canada	Saint-Jean-sur-Richelieu
Jean-Sébastien Forest	Ministère de la Sécurité publique du Québec (MSP)	Saint-Jean-sur-Richelieu
Yannick Gignac	MAMOT	Saint-Jean-sur-Richelieu
Yvan Giroux	Ville de Richelieu	Saint-Jean-sur-Richelieu
Gerardo GolloGil	Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ)	Saint-Jean-sur-Richelieu
Simon Lajeunesse	MRC Brome-Missisquoi	Saint-Jean-sur-Richelieu
Ana Claudia de Oliveira	Agence Parcs Canada	Saint-Jean-sur-Richelieu
Francis Pelletier	MRC du Haut-Richelieu	Saint-Jean-sur-Richelieu
Jonathan Pelletier	Université du Québec à Montréal (UQAM)	Saint-Jean-sur-Richelieu
Gilbert Prichonnet	UQAM (à la retraite)	Saint-Jean-sur-Richelieu
Francis Provencher	MRC de Rouville	Saint-Jean-sur-Richelieu
Caroline Roberge	MRC du Haut-Richelieu	Saint-Jean-sur-Richelieu
Renée Rouleau	Clarenceville	Saint-Jean-sur-Richelieu
Nouri Sabo	Ressources naturelles Canada	Saint-Jean-sur-Richelieu
Philippe Thiberge	MRC de Rouville	Saint-Jean-sur-Richelieu



## Annexe 6 – Références

BERNIER, N.B., et S. BÉLAIR. « High Horizontal and Vertical Resolution Limited-Area Model: Near-Surface and Wind Energy Forecast Applications », *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 51, 2012, p. 1061–1078, doi : <http://dx.doi.org/10.1175/JAMC-D-11-0197.1>.

COMMISSION MIXTE INTERNATIONALE. *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*, rapport de la CMI présenté aux gouvernements du Canada et des États-Unis, 2013, 151 p.

COMMISSION MIXTE INTERNATIONALE. *Rapport provisoire sur la régularisation de la rivière Richelieu et du lac Champlain*, dossier 98, rapport provisoire aux gouvernements, 1975, 26 p.

COMMISSION MIXTE INTERNATIONALE. *Régularisation de la rivière Richelieu et du lac Champlain*, rapport de la CMI présenté aux gouvernements du Canada et des États-Unis, 1981. 35 p.

ENVIRONNEMENT CANADA. *Création d'un modèle hydrodynamique expérimental 2D du lac Champlain en utilisant les données bathymétriques existantes (tâche 1-2)*, rapport présenté à la Commission mixte internationale, 2015, 45 p.

ENVIRONNEMENT CANADA. *Création d'un modèle hydraulique 2D de la rivière Richelieu entre Rouses Point et Sorel (tâche 2-3)*, rapport présenté à la Commission mixte internationale, 2015, 24 p.

FILLION, L, M. TANGUAY, E. LAPALME, B. DENIS, M. DESGAGNÉ, V. LEE, N. EK, Z. LIU, M. LAJOIE, J.F. CARON et C. PAGÉ. « The Canadian Regional Data Assimilation and Forecasting System ». *Weather Forecasting*, vol. 25, 2010, p. 1645–1669., doi : <http://dx.doi.org/10.1175/2010WAF2222401.1>.

FLYNN, R.H., et L. HAYES. *Cartes des plaines inondables du lac Champlain dans les États du Vermont et de New York*, rapport de recherche scientifique 2016-XXXX de la Commission géologique des États-Unis, projet de rapport présenté à la Commission mixte internationale, 2015, 27 p.

FLYNN, R.H, P.H. RYDLUND et D.J. MARTIN. *Levé du Système mondial de navigation par satellite pour l'harmonisation des référentiels américain et canadien dans le bassin du lac Champlain*, rapport de recherche scientifique 2016-XXXX de la Commission géologique des États-Unis, projet de rapport présenté à la Commission mixte internationale, 2015, 27 p.

FORTIN, V., E. GABORIT et M. DIMITRIJEVIC. *Évaluation des prévisions météorologiques aux fins de la prévision des crues du lac Champlain et la rivière Richelieu*, rapport technique rédigé pour le Groupe de travail technique international du lac Champlain et de la rivière Richelieu, 2015, 42 p.

LIN, Y., et K.E. MITCHELL. *The NCEP Stage II/IV Hourly Precipitation Analyses: Development and Applications*, prépublication de la communication 1.2 présentée à la 19<sup>e</sup> conférence sur l'hydrologie, Société américaine de météorologie, San Diego, CA, du 9 au 13 janvier 2005, 4 p.

MANLEY, T.O., P.L. MANLEY et G.B. FISHER. *Bathymetry of Lake Champlain*, carte, Université Middlebury College, 2005.

MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES. *Contribution à la création de cartes de zones inondées pour la portion québécoise du système Lac Champlain / Rivière Richelieu : Production d'un modèle numérique de terrain en rive et Transformation de surfaces d'eau en limites de zones inondées*, rapport présenté à la Commission mixte internationale, 2015, 22 p.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA) ENVIRONMENTAL MODELING CENTER (EMC). *Overview of the NOAA/NWS/NCEP Short Range Ensemble Forecast (SREF) System*, <http://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/SREF-Docs/SREF-TPB2004.pdf>, 2004, 22 p.

SHANLEY, J.B., et J.C. DENNER. « The Hydrology of the Lake Champlain Basin », dans *Lake Champlain in Transition: From Research Toward Restoration*, Washington, D.C., AGU, 1999, p. 41-66.

## Annexe 7 – Organismes cités et liste de sigles et acronymes

<b>Sigle</b>	<b>Nom au long correspondant</b>	<b>Signification en français</b>
1D	unidimensionnel	
2D	bidimensionnel	
3D	tridimensionnel	
CaPA	Canadian Precipitation Analysis	Analyse des précipitations au Canada
CEHQ	Centre d'expertise hydrique du Québec	
CGG2013	Canadian Gravimetric Geoid model of 2013	Modèle canadien du géoïde gravimétrique de 2013
CGVD2013	Canadian Geodetic Vertical Datum of 2013	Système canadien de référence altimétrique de 2013
CGVD28	Canadian Geodetic Vertical Datum of 1928	Système canadien de référence altimétrique de 1928
CMI	Commission mixte internationale	
CO-OPS	Center for Operational Oceanographic Products and Services	Centre de produits et services opérationnels d'océanographie (États-Unis)
EC	Environnement Canada	
FEMA	Federal Emergency Management Agency	Agence fédérale des situations d'urgence (États-Unis)
FTP	File transfer protocol	Protocole de transfert de fichiers
FVCOM	Finite Volume Community Ocean Model	Modèle des volumes finis d'océanologie côtière
GEFS	Global Ensemble Forecasting System	Système global de prévisions d'ensemble (États-Unis)
GLCFS	Great Lakes Coastal Forecast System	Système de prévisions côtières des Grands Lacs
GLERL	Great Lakes Environmental Research Laboratory	Laboratoire de recherches sur l'environnement des Grands Lacs
GLOFS	Great Lakes Operational Forecasting System	Système de prévisions opérationnelles des Grands Lacs
GNSS	Global Navigation Satellite System	Système mondial de navigation par satellite
GPS	Géopositionnement par satellite	
GTT	Groupe de travail technique international du lac Champlain et de la rivière Richelieu	
HAE	Heure avancée de l'Est	
HNE	Heure normale de l'Est	
HRAP	Hydrological Rainfall Analysis Project	Projet d'analyse hydrologique des précipitations (États-Unis)
HYDROTEL	Hydrologie et télédétection	
IAGLR	International Association for Great Lakes Research	Association internationale pour la recherche sur les Grands Lacs
INRS-ETE	Institut national de la recherche scientifique – Centre Eau Terre Environnement	

<b>Sigle</b>	<b>Nom au long correspondant</b>	<b>Signification en français</b>
LCBP	Lake Champlain Basin Program	Programme du bassin du lac Champlain (États-Unis)
LGC	Levés géodésiques du Canada	
LIDAR	Light Detection And Ranging	Détection et télémétrie par ondes lumineuses
MAN	Modèle altimétrique numérique	
MDDELCC	Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (Québec)	
MNT	Modèle numérique de terrain	
MSP	Ministère de la Sécurité publique du Québec	
NAD 83	North American Datum of 1983	Système de référence nord-américain de 1983
NAVD 88	North American Vertical Datum of 1988	Système de référence altimétrique nord-américain de 1988
NCEP	National Centers for Environmental Prediction	Centres nationaux de prévisions environnementales (États-Unis)
NED	National Elevation Dataset	Ensemble national de données altimétriques (États-Unis)
NGS	National Geodetic Survey	Levés géodésiques nationaux (États-Unis)
NGVD	National Geodetic Vertical Datum	Données géodésiques altimétriques nationales (États-Unis)
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration	Agence américaine d'observation océanique et atmosphérique
NSRS	National Spatial Reference System	Système national de référence spatiale (États-Unis)
NWIS	National Water Information System	Système national d'information sur les eaux (États-Unis)
NWS	National Weather Service	Service météorologique national (États-Unis)
NY	État de New York	
OPUS	National Geodetic Survey's Online Positioning User Service	Service de localisation en ligne d'utilisateurs (États-Unis)
PNT	Prévision numérique du temps	
POM	Princeton Ocean Model	Modèle océanique de Princeton
QC	Québec	
SGPE	Système global de prévisions d'ensemble (Canada)	
SHC	Service hydrographique du Canada	
SHRDP	Système à haute résolution de prévision déterministe	
SIG	Système d'information géographique	
SMC	Service météorologique du Canada	
SPENA	Système de prévisions d'ensemble nord-américain	

<b>Sigle</b>	<b>Nom au long correspondant</b>	<b>Signification en français</b>
SREF	Short Range Ensemble Forecasting	Système de prévisions d'ensemble à court terme (États-Unis)
SRPD	Système régional de prévision déterministe (Canada)	
SRPE	Système régional de prévisions d'ensemble	
USGS	United States Geological Survey	Commission géologique des États-Unis
VCGI	Vermont Center for Geographic Information	Centre d'information géographique du Vermont
VMC	Vermont Monitoring Cooperative	Coopérative de surveillance du Vermont
VT	État du Vermont	