



Préparé en coopération avec la Commission mixte internationale

Levé du Système mondial de navigation par satellite pour l'harmonisation des référentiels américain et canadien dans le bassin du lac Champlain

Par Robert H. Flynn, Paul H. Rydlund Jr. et Daniel J. Martin

Scientific Investigations Report 2016–XXXX

US Department of the Interior
US Geological Survey

US Department of the Interior

Sally Jewell, secrétaire

US Geological Survey

Suzette M. Kimball, directrice intérimaire

US Geological Survey, Reston, Virginie : 20xx

Révision et nouvelle impression : 20xx

Pour plus d'information sur l'US Geological Survey (USGS) - la source d'information fédérale sur la terre, ses ressources naturelles et vivantes, ses risques naturels et son environnement - voir <http://www.usgs.gov> (en anglais) ou appeler le 1-888-ASK-USGS

Pour avoir un aperçu des documents d'information de l'USGS (cartes, images et publication), voir <http://www.usgs.gov/pubprod> (en anglais).

Pour commander ce rapport et les autres documents d'information de l'USGS, voir <http://store.usgs.gov> (en anglais)

Référence suggérée :

Flynn, R.H.; Rydlund, P.H.; et Martin, D.J., 2016, Levé du Système mondial de navigation par satellite pour l'harmonisation des référentiels américain et canadien dans le bassin du lac Champlain : US Geological Survey Scientific Investigations Report 2016-XXXX, xx p. (<http://dx.doi.org/10.3133/sir/20xxxxx>).

Dans ce document, toutes les mentions de noms commerciaux, raisons sociales ou noms de produits répondent à des besoins purement descriptifs et ne constituent aucunement une marque d'approbation de la part du gouvernement des États-Unis.

L'essentiel de la teneur du présent document est du domaine public, mais certains éléments d'information peuvent être couverts par des droits d'auteurs, selon ce qui est indiqué dans le texte. Le cas échéant, toute personne souhaitant les reproduire doit obtenir l'autorisation du détenteur des droits d'auteur à cet effet.

Remerciements

Les auteurs remercient la Commission mixte internationale qui a financé l'étude d'harmonisation des référentiels pour le bassin du lac Champlain; ils remercient également les membres du Groupe de travail technique international du lac Champlain et de la rivière Richelieu Pierre-Yves Caux (Commission mixte internationale), Paul Boudreau (Environnement Canada), Marc Véronneau (Ressources naturelles Canada, Levés géodésiques du Canada) et Joe Babb (US State Department, affectation à la Commission mixte internationale) pour le rôle qu'ils ont joué dans la définition de la portée de la présente étude et sa conception. Les autres membres du groupe de travail technique sont les suivants : Jean-François Cantin (coprésident canadien du groupe de travail technique et gestionnaire, Section hydrologie et écohydraulique, Services hydrologiques nationaux, Environnement Canada), Keith Robinson (coprésident américain du groupe de travail technique et directeur du New England Water Science Center, US Geological Survey (USGS)), Richard Turcotte (bureau du Québec, Canada, ministère du Développement durable et de l'Environnement), William Saunders (National Weather Service), Vincent Fortin (Environnement Canada), Daniel LeBlanc (bureau du Québec, Canada, ministère du Développement durable et de l'Environnement), Blaine Hastings (Department of Environmental Conservation du Vermont), and Fred Dunlap (coordinateur pour le bassin du lac Champlain, New York).

Les auteurs remercient Guy Morin et Julie Thérien (Environnement Canada) qui ont fourni les données sur les marqueurs de référence et les niveaux au Canada, et qui ont participé au repérage des données et à l'obtention des autorisations d'accès en vue de l'exécution des levés GNSS dans le bassin du lac Champlain au Canada.

Les auteurs remercient également les personnes suivantes de leur participation à la collecte des données GNSS du 14 au 16 avril 2015 : Ann Chalmers (USGS, Vermont), John « Duke » Erbland (USGS, Caroline du Sud), Jonathan Graham (USGS, Georgie), Doug Nagle (USGS, Caroline du Sud) et Glenn Berwick (USGS, New Hampshire).

Les auteurs remercient aussi Madeleine Papineau (Commission mixte internationale) et Stephanie Castle (Lake Champlain Basin Program) qui ont assuré le soutien administratif et le secrétariat pour ce projet.

Table des matières

Remerciements.....	iii
Table des matières	v
Facteurs de conversion	xxvi
Abréviations.....	xxvi
Résumé	xxviii
Introduction.....	1
Objet et portée	6
Description de la zone d'étude	8
Méthodologie	10
Collecte de données de terrain	13
Traitement des données	14
Écarts des référentiels	15
Résultats.....	15
Sommaire	18
Références	21
Annexes.....	27
Annexe 1.....	27
Annexe 2.....	27
Annexe 3.....	27
Annexe 4.....	27

Figures

Figure 1. Carte du bassin hydrographique du lac Champlain avec les emplacements des limnimètres et repères de barrages pris en compte par le levé GNSS.....	5
Figure 2 Niveaux quotidiens moyens, maximums et minimums selon le Système de référence altimétrique nord-américain de 1988, dérivés du levé GNSS pour la période de collecte de données (jours juliens 105 et 106) aux limnimètres de l'USGS du lac Champlain.	18

Tableaux

Tableau 1.Limnimètres et repères de barrages du lac Champlain et de la rivière Richelieu ayant servi au levé GNSS	7
Tableau 2. Résultats du levé des repères du Système mondial de navigation par satellite traités par l'ajustement réseau OPUS Projects.....	16
Tableau 3. Les écarts pour la conversion des mesures altimétriques publiées au Système de référence altimétrique nord-américain de 1988, limnimètres du lac Champlain et de la rivière Richelieu.....	17

Facteurs de conversion

Pouces et livres en unités du système international

Multiplieur	par	pour obtenir
Longueur		
pouces (po)	2,54	centimètres (cm)
pieds (pi)	0,3048	mètres (m)
milles (mi)	1,609	kilomètres (km)
Superficie		
milles carrés (mi ²)	2,590	kilomètres carrés (km ²)

Conversion des températures de degrés Fahrenheit (°F) en degrés Celsius (°C) : °C = (°F – 32) / 1,8

Abréviations

CGG 2013	Modèle canadien du géoïde gravimétrique de 2013
CGVD 2013	Système canadien de référence altimétrique de 2013
CGVD 28	Système canadien de référence altimétrique de 1928
CMI	Commission mixte internationale
CORS	Station de référence en fonctionnement continu
CPA	Centre de phase de l'antenne
EC	Environnement Canada
FEMA	Federal Emergency Management Administration
GNSS	Système mondial de navigation par satellite
GRAV-D	Gravity for the Redefinition of American Vertical Datum
LGC	Levés géodésiques du Canada
LIDAR	Light Detection and Ranging
NAD 83	Système de référence nord-américain de 1983 (référentiel horizontal)

NAVD 88	Système de référence altimétrique nord-américain de 1988
NGS	National Geodetic Survey (États-Unis)
NGVD 29	National Geodetic Vertical Datum 1929
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NSRS	National Spatial Reference System
NWS	National Weather Service
OPUS	Online Positioning User Service
PPP	Positionnement ponctuel précis
RHC	Relevés hydrologiques du Canada
RINEX	Receiver Independent Exchange Format
RNCan	Ressources naturelles Canada
SCRS	Système canadien de référence spatiale
USACE	US Army Corps of Engineers
USGS	US Geological Survey
WGS 84	Système géodésique mondial de 1984

Levé du Système mondial de navigation par satellite pour l'harmonisation des référentiels américain et canadien dans le bassin du lac Champlain

Par Robert H. Flynn,¹ Paul H. Rydlund Jr.,¹ et Daniel J. Martin²

Résumé

À partir de la fin avril et pendant tout le mois de mai 2011, le lac Champlain et la rivière Richelieu ont connu une crue historique provoquée par des précipitations printanières record conjuguées à la fonte d'une couche de neige chaude et saturée (la troisième accumulation annuelle en importance à avoir jamais été enregistrée). Le seuil d'inondation a été dépassé du 13 avril au 19 juin 2011, soit un total de 67 jours. Pendant cette période de hautes eaux, l'érosion des berges et les inondations ont été aggravées par les vagues soulevées par le vent et associées au fetch à l'échelon local et à la seiche sur l'ensemble du lac. En mai 2011, le lac Champlain a atteint un niveau record. Cette année-là, on a enregistré divers pics de niveau aux trois limnimètres de l'USGS installés sur le lac Champlain. Les maximums enregistrés en mai 2011 allaient de 103,20 pi (National Geodetic Vertical Datum, NGVD 29) à l'extrémité nord du lac Champlain (son exutoire et le début de la rivière Richelieu à Rouses Point, New York) à 103,57 pi (NGVD 29) à son extrémité sud (Whitehall, New York). Les mesures de niveaux de la rivière Richelieu au Canada renvoient à un référentiel altimétrique différent de celui employé sur le

¹ U.S. Geological Survey

² National Oceanic and Atmospheric Administration

lac Champlain aux États-Unis, ce qui complique l'évaluation des niveaux de crue en temps réel ainsi que la comparaison des pics de crue dans l'ensemble du bassin du lac Champlain au États-Unis et au Canada.

Le 19 mars 2012, à la suite de la crue d'avril et mai 2011, les gouvernements du Canada et des États-Unis ont chargé la Commission mixte internationale (CMI) d'élaborer une ébauche de plan d'étude sur les causes et les effets de la crue de 2011 du lac Champlain et de la rivière Richelieu et d'élaborer des mesures possibles d'atténuation. Le groupe de travail a identifié plusieurs défis à relever dont l'harmonisation des référentiels altimétriques sur l'ensemble du bassin hydrographique. Il est donc devenu nécessaire d'harmoniser les référentiels altimétriques pour l'évaluation des crues et en vue des futurs travaux de modélisation des débits dans le bassin hydrographique du lac Champlain aux États-Unis et au Canada.

En avril 2015, l'USGS et Environnement Canada (EC) ont entrepris des travaux conjoints de détermination précise de niveaux définissant un référentiel altimétrique commun pour des marqueurs de référence sélectionnés sur l'ensemble du lac Champlain et de la rivière Richelieu. Pour harmoniser les référentiels altimétriques employés aux États-Unis et au Canada, on a effectué un levé de neuf localités du bassin au moyen du Système mondial de navigation par satellite (GNSS) pour obtenir des données satellitaires simultanées; on a traité ces données pour produire des mesures de niveau à deux marqueurs de référence associés à des barrages et sept associés à des limnimètres en service dans tout le bassin (sur le lac Champlain et la rivière Richelieu) . Les levés GNSS ont eu lieu du 14 au 16 avril 2015, et les localités couvertes allaient du sud du lac Champlain (près de Whitehall, New York) à l'extrémité nord de la rivière Richelieu à Sorel, au Québec (lieu de sa confluence avec le Saint-Laurent au Canada).

On a converti les niveaux mesurés pendant les trois jours de levés en mesures rapportées au Système de référence altimétrique nord-américain (NAVD 88) à partir des écarts calculés et des niveaux historiques. Dans le présent rapport, on nomme « écart » la correction à apporter aux données publiées provenant d'un

limnimètre donné pour calculer les niveaux rapportés au Système de référence altimétrique nord-américain de 1988. Les écarts présentés dans ce rapport peuvent servir à l'estimation des niveaux du lac Champlain et de la rivière Richelieu dans un référentiel altimétrique commun. Les données limnimétriques rapportées au référentiel commun (établi à partir de ces écarts) peuvent également servir à l'étalonnage des modèles de débits et aux fins des travaux de modélisation à venir pour le lac Champlain et la rivière Richelieu.

Introduction

Au printemps et au début de l'été 2011, la région du lac Champlain a connu des crues historiques causées par la fonte d'une couche de neige chaude et saturée à la fin du printemps et par de fortes pluies printanières sur l'ensemble du bassin du fleuve Saint-Laurent (non représenté ici). À la fin avril et pendant tout le mois de mai 2011, les précipitations et la fonte des neiges (troisième accumulation annuelle à avoir jamais été enregistrée, National Oceanic and Atmospheric Administration, 2012) ont amené le lac à des niveaux sans précédent. Pendant cette période de hautes eaux, l'érosion des berges et les fluctuations des niveaux du lac ont été aggravées par les vagues soulevées par le vent, associées au fetch localement et à la seiche sur l'ensemble du lac (Bjerklie *et al.*, 2014) (le fetch est la longueur du trajet du vent sur une surface d'eau, et la seiche est une oscillation stationnaire de grande longueur d'onde). Sur le lac, on avait déjà signalé des effets de seiche (Shanley and Denner, 1999) provoqués par le vent et par des changements de pression atmosphérique.

En mai 2011, le lac Champlain a atteint un niveau record. Le record enregistré au limnimètre de l'USGS n° 04295000 - rivière Richelieu (lac Champlain) à Rouses Point, New York - (USGS, 2015a) (Figure 1) était de 103,20 pi (NGVD 29) le 6 mai 2011. Le record enregistré au limnimètre de l'USGS n° 04294500 - lac Champlain, de Burlington, Vermont - (USGS, 2015b) (Figure 1), était de 103,27 pi (NGVD 29), également le 6 mai 2011. Le niveau maximum enregistré au limnimètre de l'USGS n° 04279085 - lac Champlain, au nord de Whitehall, New York - (USGS, 2015c) (Figure 1) était de 103,57 pi (NGVD 29) le 9 mai 2011; ce dernier niveau était influencé par le vent et par une seiche. Les mesures de niveaux de la rivière Richelieu au Canada renvoient à un référentiel altimétrique différent de ceux employés sur le lac Champlain aux États-Unis, ce qui complique l'évaluation des

niveaux de crue en temps réel ainsi que la comparaison des pics de crue dans l'ensemble du bassin du lac Champlain au États-Unis et au Canada.

Au limnimètre de l'USGS n° 04295000 - rivière Richelieu (lac Champlain) à Rouses Point - (Figure 1) selon les définitions du National Weather Service (NWS) de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), le seuil d'inondation majeure (*major flood stage*) est de 101,5 pi (NGVD 29), le seuil d'inondation moyenne (*moderate flood stage*) est de 101,0 pi (NGVD 29) et le seuil d'inondation mineure (*minor flood stage*) est de 100,0 pi (NGVD 29) (NOAA-NWS, 2015). À la suite des épisodes de pluie et de ruissellement d'avril et mai 2011, le niveau du lac Champlain est demeuré au-dessus du seuil d'inondation pendant 67 jours consécutifs et a atteint son maximum le 6 mai. Il est demeuré au-dessus du seuil d'inondation majeure défini par le NWS pendant tout le mois de mai (Bjerklie *et al.*, 2014). Pendant cette période de hautes eaux, l'érosion des berges, les inondations et les dommages connexes ont été aggravés par les vagues de plus de trois pieds soulevées par le vent et associées au fetch à l'échelon local et à la seiche sur l'ensemble du lac (Lake Champlain Basin Program, 2013). Lors des inondations de mai 2011, le Vermont a déclaré l'état d'urgence et une déclaration de désastre présidentielle a été émise le 15 juin (déclaration n° 1995-DR, FEMA 2011).

À la suite des inondations d'avril et mai 2011, les gouvernements du Canada et des États-Unis ont demandé à la Commission mixte internationale d'étudier les options possibles de réduction des effets des crues. Le 19 mars 2012, ils l'ont chargée d'élaborer une ébauche de plan d'étude des causes et des effets de la crue de 2011 du lac Champlain et de la rivière Richelieu et d'élaborer des mesures possibles d'atténuation. La Commission a alors créé le Groupe de travail international du plan d'étude du lac Champlain et de la rivière Richelieu à qui elle a confié cette tâche (Commission mixte internationale, juillet 2013). Le groupe de travail a identifié plusieurs défis à relever dont l'harmonisation des référentiels altimétriques sur l'ensemble du bassin hydrographique.

À la frontière, on relevait des écarts entre les différents référentiels altimétriques employés pour le lac et la rivière, soit le Système canadien de référence altimétrique de 1928 (CGVD 28), le Système de référence altimétrique nord-américain de 1988 (NAVD 88) et le National Geodetic Vertical Datum of 1929 (NGVD 29); pour assurer la cohérence et la continuité des données, il fallait donc harmoniser les référentiels géospatiaux. Ainsi selon les données publiées, à la baie Missisquoi, le niveau rapporté au référentiel CGVD 28 serait inférieur à celui de Rouses Point, aux États-Unis, rapporté au NGVD 29, avec un écart d'environ 0,354 pi (10,8 cm) ($\text{NGVD 29} - \text{CGVD 28} = 0,354 \text{ pi}$); et il serait supérieur à celui de Rouses Point rapporté au NAVD 88 d'environ 0,098 pi (3 cm) ($\text{CGVD 28} - \text{NAVD 88} = 0,098 \text{ pi}$) (Commission mixte internationale, 2013). Il était donc devenu nécessaire d'harmoniser les référentiels altimétriques pour l'évaluation des crues et en vue des futurs travaux de modélisation des débits dans le bassin hydrographique du lac Champlain aux États-Unis et au Canada. En avril 2015, l'USGS et EC ont entrepris des travaux conjoints de détermination précise de niveaux définissant un référentiel altimétrique commun pour des marqueurs de référence sélectionnés sur l'ensemble du lac Champlain et de la rivière Richelieu.

Les mesures altimétriques définies à partir d'ellipsoïdes, de géoïdes et de la topographie représentent autant de tentatives de modélisation de la forme de la terre au moyen de coordonnées mondiales réelles. Un ellipsoïde ressemble à une sphère, avec un rayon polaire plus court que le rayon équatorial. Son centre coïncide avec le centre calculé de la planète avec un ajustement optimal à la forme générale de celle-ci. Un géoïde est un modèle du niveau mondial moyen de la mer sous la seule influence de la gravitation et de la rotation de la terre. L'écart vertical entre le géoïde et l'ellipsoïde est appelé ondulation du géoïde, et il peut être positif ou négatif. On calcule généralement les altitudes topographiques à partir d'observations par satellite ou LiDAR ou de photographies aériennes, par rapport au niveau moyen de la mer. L'écart entre l'altitude topographique et l'ellipsoïde est appelé altitude ellipsoïdale. L'écart entre l'altitude topographique et le géoïde est appelé altitude orthométrique (GISTutor, 2015).

En 2013, Ressources naturelles Canada (RNCan) a publié un nouveau référentiel altimétrique canadien remplaçant le CGVD 28, qui avait été défini à partir du niveau de la mer à l'emplacement de marégraphes installés sur les côtes est et ouest. Le nouveau Système canadien de référence altimétrique de 2013 (CGVD 2013) est un référentiel basé sur le géoïde (Ressources naturelles Canada, 2013). Cette surface, sur laquelle le NGS des États-Unis et LGC se sont entendus en 2012, représente le potentiel moyen du niveau moyen de la mer mesuré par une série de marégraphes installés à divers endroits du Canada et des États-Unis. Ce nouveau référentiel canadien dérive du modèle canadien du géoïde gravimétrique de 2013 (CGG 2013) (Ressources naturelles Canada, 2013).

En 1993, le NAVD 88 a été inscrit à l'échelon fédéral comme le référentiel altimétrique officiel du National Spatial Reference System (NSRS) pour les États contigus des États-Unis et l'Alaska, et il le reste à ce jour. À noter cependant que tous les limnimètres du lac Champlain aux États-Unis renvoient encore au vieux référentiel NGVD 29, à l'exception du limnimètre n° 04294620 - lac Champlain près de Grand Isle, Vermont - installé récemment (avril 2015). Le NGS prévoit de remplacer le NAVD 88 par un référentiel altimétrique basé sur la gravimétrie en 2022 en vertu de la proposition GRAV-D (gravity for the Redefinition of the American Vertical Datum), conformément à son plan décennal (NOAA-NGS, 2014). Tout comme les modèles américains de géoïde (actuellement Geoid12A), le NAVD 88 s'étend au Canada mais il n'a jamais été adopté dans ce pays.



Figure 1. Carte du bassin hydrographique du lac Champlain avec les emplacements des limnimètres et repères de barrages pris en compte par le levé GNSS.

Note explicative: La figure 1 a été produite en anglais. Au Canada, on y retrouve les repères (BM) des limnimètres (streamgages) d'Environnement Canada (EC) et des barrages (dams) pour différents site dans le bassin de la rivière Richelieu (Richelieu River Basin) au Québec. À Saint-Jean-sur- Richelieu le repère (BM) est placé à la marina. À Saint-Paul-de-l'Île-aux-Noix, le repère est placé au Centre de plein air l'Estacade (Estacade Outdoor Center). Aux États-Unis (United States), on y retrouve les repères (BM) des limnimètres (lake gage) de l'USGS à deux sites.

Objet et portée

Ce rapport présente les méthodes de collecte de données et les données limnimétriques corrigées pour le bassin du lac Champlain qui doivent permettre au renvoi à un même référentiel pour tous des limnimètres du bassin. L'objet de cette étude était de produire des mesures altimétriques précises des neuf repères situés dans le bassin du lac Champlain (Figure 1); sept de ces repères font partie du réseau de limnimètres en service qui fournissent des mesures en temps réel en continu des niveaux du lac et des mesures en continu des niveaux et des débits de la rivière Richelieu. Ces limnimètres sont exploités par l'USGS aux États-Unis et par EC au Canada. Les limnimètres installés dans l'ensemble du bassin du lac Champlain (Figure 1) servent à la régularisation des niveaux d'eau. Cependant les référentiels altimétriques utilisés aux États-Unis et au Canada sont différents (Tableau 1). Aux États-Unis, les niveaux d'eau du lac Champlain renvoient au NGVD 29 et au NAVD 88; au Canada, ceux de la rivière Richelieu renvoient au CGVD 28. L'évaluation des crues et la création de modèles numériques précis (modèles altimétriques ou modèles hydrauliques d'écoulement des eaux dans le bassin du lac Champlain) doivent se fonder sur des données altimétriques comparables. Pour comprendre et gérer les niveaux du lac, il est essentiel d'avoir des données altimétriques précises renvoyant à un référentiel altimétrique unique.

Tableau 1. Limnimètres et repères de barrages du lac Champlain et de la rivière Richelieu ayant servi au levé GNSS

Note explicative: EC (Environnement Canada); CGVD 28 (Système canadien de référence altimétrique de 1928); USGS (US Geological Survey); NGVD 29 (National Geodetic Vertical Datum de 1929)

Numéro du repère	Nom de la station	Nom du site	Organisme	Référentiel altimétrique	Date de début, limnimètre	Date de fin, limnimètre
92KSP76	02OJ022	Fleuve Saint-Laurent à Sorel, Québec, Canada	EC	CGVD 28	1912	2011
78L264	-	Rivière Richelieu au barrage de Saint-Ours à Saint-Ours, Québec, Canada	EC	CGVD 28		
732306	-	Rivière Richelieu au barrage Fryers à Chambly, Québec, Canada	EC	CGVD 28		
Placé	02OJ016	Rivière Richelieu à Saint-Jean-sur-Richelieu, Québec, Canada	EC	CGVD 28	1972	Date actuelle
Placé	02OJ036	Rivière Richelieu à Saint-Paul-de-l'Île-aux-Noix, Québec, Canada	EC	CGVD 28	2011	Date actuelle
77L9003	02OH001	Lac Champlain à Philipsburg, Québec, Canada	USGS	NGVD 29	1964	Date actuelle
MR5 de l'USGS	04295000	Rivière Richelieu (lac Champlain) à Rouses Point, New York, États-Unis	USGS	NGVD 29	1871	Date actuelle
Placé	04294500	Lac Champlain à Burlington, Vermont, États-Unis	USGS	NGVD 29	1907	Date actuelle
Placé	04279085	Lac Champlain au nord de Whitehall, New York, États-Unis	USGS	NGVD 29	1999	Date actuelle

Du 14 au 16 avril 2015, l'USGS, Environnement Canada, le National Geodetic Survey (NGS) des États-Unis et Levés géodésiques du Canada (LGC) ont entrepris un travail conjoint de transformation des référentiels altimétriques pour permettre le renvoi de toutes les données limnimétriques de la zone d'étude (lac Champlain, rivière Richelieu et leurs plaines inondables) au NAVD 88, au CGVD 28 ou au CGVD 2013. À l'aide du Système mondial de navigation par satellite (GNSS), on a donc effectué des levés à partir de sept limnimètres (quatre sur le lac et trois sur la rivière) et de deux sites de barrages pour obtenir des données satellitaires simultanées; on a ensuite traité ces

données pour obtenir des hauteurs ellipsoïdales d'une précision de l'ordre du centimètre renvoyant à la dernière version du Système de référence nord-américain (NAD 83) établie par les États-Unis, actuellement la version NAD 83 (2011), époque 2010.00 (cadre de référence géométrique équivalant à la version canadienne NAD 83 (SCRS), époque 2010.0). On a calculé les altitudes orthométriques NAVD 88 et CGVD 2013 à partir des hauteurs géoïdales des modèles GEOID12A ou CGG 2013 respectivement.

Description de la zone d'étude

Le lac Champlain est une étendue d'eau douce d'une superficie d'environ 435 mi² (Lake Champlain Basin Program, 2015) située principalement sur le territoire des États-Unis, mais dont une partie se trouve dans la province de Québec, au Canada. C'est le lac le plus étendu des États-Unis si l'on excepte les cinq Grands Lacs (Stickney *et al.*, 2001). L'eau qui le traverse s'écoule vers le nord à partir de Whitehall, New York, vers son exutoire à la frontière canado-américaine, où il donne naissance à la rivière Richelieu au Québec. Celle-ci rejoint le Saint-Laurent à Sorel, au Québec, et le fleuve se déverse lui-même dans l'océan Atlantique dans le golfe du Saint-Laurent. La rivière Richelieu coule de Rouses Point, New York à Sorel, au Québec. Le lac Champlain s'étend sur une distance d'environ 120 mi de Whitehall, New York, au sud, au début de la rivière Richelieu, au Québec (LCBP, 2015). À première vue, il se divise en trois régions facilement identifiables (Bjerklie *et al.*, 2014); la partie sud est étroite comme une rivière, la partie centrale est large et comporte quelques petites îles, et c'est la partie nord qui est la plus large avec plusieurs grandes îles. La plupart des affluents du lac sont des cours d'eau à forte pente qui atteignent un débit maximal en moins de 24 heures après des précipitations ou la fonte des neiges. Le principal événement hydrologique de l'année est la fonte des neiges au printemps; à ce moment-là, généralement, le lac Champlain reçoit près de la moitié de son débit annuel sur une période de six à huit semaines (Shanley and Denner, 1999). Le débit sortant ne suit pas instantanément le débit

entrant, et le lac joue un important rôle de régulation du débit de la rivière Richelieu. Sa capacité de stockage fait qu'il atteint son niveau maximum avec plusieurs jours de retard sur le maximum de débit entrant. Les bassins de la rivière et du lac se caractérisent par de fortes crues printanières et par des débits moindres pendant tout le reste de l'année. C'est principalement le niveau du lac qui détermine le débit de la rivière Richelieu, puisque quelque 95 pour cent du débit sortant de celle-ci à son embouchure sur le Saint-Laurent provient du lac Champlain (Riboust et Brissette, 2015).

La superficie du bassin hydrographique du lac Champlain est de 8 234 mi², dont 56 pour cent se trouvent au Vermont, 37 pour cent dans l'État de New York et 7 pour cent au Québec. La population du bassin hydrographique se divise comme suit : 68 pour cent au Vermont, 27 pour cent dans l'État de New York et 5 pour cent au Québec (Lake Champlain Basin Program, 2015). Le lac Champlain est entouré des montagnes Vertes à l'est (Vermont), des Adirondacks à l'ouest (New York) et des monts Taconic au sud (New York et Vermont). Dans son bassin versant, les précipitations moyennes varient de 30 à 50 po/an (760 à 1 270 mm/an) selon la localité (Howland *et al.*, 2006), et la température moyenne de l'air est de 7 °C (45 °F) (Shanley and Denner, 1999).

Le lac Champlain s'est formé il y a environ 11 000 ans, à la fin de la dernière ère glaciaire; celle-ci a laissé une vaste étendue d'eau douce qui couvrait l'emplacement actuel des Grands Lacs, du lac Champlain et d'une bonne partie de la vallée du Saint-Laurent (Lake Champlain Research Consortium, 2004). Il a environ 587 mi de rivages, une largeur maximale de 12 mi et une profondeur moyenne de 64 pi; il atteint une profondeur maximale de 400 pi entre Charlotte, Vermont, et Essex, New York (Lake Champlain Land Trust, 2015). Son niveau moyen annuel est de 95,5 pi (NGVD 29), et la variation moyenne annuelle entre ses maximums et ses minimums moyens est d'environ 6 pi; depuis le début de la consignation des relevés quotidiens dans les années 1870, l'intervalle de variation maximal a été de 9,4 pi (Lake Champlain Basin Program, 2015). En 1939, à la suite des inondations des années 1930, on

a construit un barrage à l'île Fryers (non représenté) pour régulariser le débit de la rivière Richelieu (Riboust and Brissette, 2015). Cependant on n'a jamais construit les digues au voisinage du barrage ni effectué le dragage des hauts-fonds de Saint-Jean-sur-Richelieu (Figure 1) (Commission mixte internationale, 2013). Le barrage de l'île Fryers n'a jamais été mis en service et la rivière Richelieu n'est toujours pas régularisée (Riboust and Brissette, 2015).

Le lac Champlain se trouve dans la province physiographique des basses terres de Champlain. Bien qu'à première vue le lac se divise en trois régions (Bjerklie *et al.*, 2014), plusieurs paramètres physiques, chimiques et de qualité de l'eau permettent de reconnaître cinq zones distinctes (Lake Champlain Basin Program, 2015), à savoir le sud, la partie principale (ou large), la baie Mallets, la mer intérieure (ou bras nord-est) et la baie Missisquoi. Le temps de rétention de l'eau est d'environ trois ans dans la partie principale et de moins de deux mois dans la partie sud (LCBP, 2015). Burlington, au Vermont, est la plus grande ville riveraine du lac avec 42 284 habitants (en 2013, US Bureau of Census, 2015a). Les deuxième et troisième villes par ordre de population sont Plattsburgh, New York, et Colchester, Vermont, avec respectivement 19 898 habitants (en 2013, US Bureau of Census, 2015b) et 17 299 habitants (en 2013, US Bureau of Census, 2015c).

Méthodologie

Au cours de cette étude, l'USGS, en coopération avec EC, le NGS et LGC, a mis en place les récepteurs GNSS bifrquence de précision en vue d'effectuer des levés statiques simultanés (Canadian Geodetic Survey, 2003; Rydland and Densmore, 2012; Canadian Geodetic Survey, 2013) à sept limnimètres repères du lac Champlain et de la rivière Richelieu et à deux repères liés à deux barrages sur la rivière Richelieu au Canada. Étant donné que les référentiels altimétriques en usage aux États-Unis et au Canada sont différents, on a dû effectuer une conversion afin de créer un référentiel commun

pour l'étude des niveaux des crues dans le bassin du lac Champlain, qui couvre le lac lui-même et la rivière Richelieu. Le Groupe de travail technique international du lac Champlain et de la rivière Richelieu devait opérer cette transformation pour obtenir les données nécessaires aux fins de la modélisation hydraulique et de la prévision des crues du lac et de la rivière. Les levés GNSS ont été effectués à partir de repères de contrôle associés à des limnimètres et installés à l'emplacement de deux barrages dans la plaine inondable de Champlain-Richelieu. À partir des mesures du levé, on a créé un mode de transformation des systèmes de référence altimétrique pour permettre la conversion l'ensemble des données existantes de la zone d'étude soit dans le NAVD 88, soit dans le CGVD 2013.

L'harmonisation des référentiels pour le lac Champlain a été effectuée par une mesure de l'altitude ellipsoïdale à l'échelle centimétrique à partir d'observations statiques GNSS de sept localités du lac et de la rivière, (Whitehall, New York, États-Unis; Burlington, Vermont, États-Unis; Rouses Point, New York, États-Unis; Philipsburg, Québec, Canada; Saint-Paul-de-l'Île-aux-Noix, Québec, Canada; Saint-Jean-sur-Richelieu, Québec, Canada; et Sorel, Québec, Canada) et de l'emplacement de deux barrages, (barrage Fryers à Chambly, Québec, Canada et barrage de Saint-Ours à Saint-Ours, Québec, Canada) (Figure 1). Les altitudes orthométriques ont été calculées à partir des altitudes ellipsoïdales et des modèles actuels de géoïde (GEOID12A et CCG2013).

À partir des observations GNSS effectuées aux repères et des niveaux différentiels, on a calculé des altitudes précises définissant un référentiel altimétrique commun pour les marqueurs de référence visés du lac et de la rivière. Aux fins du présent rapport, on définit un repère comme une marque dont le niveau géodésique a été déterminé par le levé GNSS, un marqueur de référence est la marque représentant un niveau matérialisé et qui sert à déterminer le niveau au limnimètre, et un repère de contrôle est une marque rapportée à des référentiels publiés altimétrique et horizontal. On a mis à jour les données des marqueurs de référence en fonction du référentiel altimétrique commun et à l'aide des

écarts de niveau pour matérialiser les altitudes mesurées par le GNSS aux marqueurs de référence. Dans certains cas le repère était également le marqueur de référence.

Les observations GNSS ont été effectuées à partir de marqueurs de référence de levé représentant l'origine d'un réseau de nivellement différentiel à chacun des neuf sites décrits ci-dessus. Des repères ont été installés sur le site de deux limnimètres du lac Champlain et de deux limnimètres de la rivière Richelieu parce que les dispositifs en place ne convenaient pas aux observations satellitaires GNSS, à cause de la distance entre les bornes existantes et les repères de contrôle, ou à cause de l'absence de tels repères. Le 14 avril 2015, ces repères ont été placés aux emplacements des limnimètres de l'USGS n° 04279085 - lac Champlain au nord de Whitehall, New York - et n° 04294500 - lac Champlain à Burlington, Vermont -, et également aux emplacements des limnimètres d'EC n° 02OJ016 - Saint-Jean-sur-Richelieu, Québec - et n° 02OJ036 - Saint-Paul-de-l'Île-aux-Noix, Québec. Les altitudes de tous les repères installés et de tous les marqueurs de référence existants ont été rapportées au canevas altimétrique (Kenney, 2010, et CGS, 2013) des limnimètres par nivellement différentiel. Sur les autres emplacements existaient des repères préétablis qui convenaient aux fins du levé GNSS et du nivellement différentiel pour l'association aux marqueurs de référence du réseau établi de limnimètres.

Les observations GNSS aux limnimètres ont été effectuées en simultané sur 12 heures, le 15 avril 2015, et elles ont été suivies d'observations simultanées de 6 heures le 16 avril 2015 à des fins de redondance. Les observations du barrage Fryers à Chambly (sept heures) et du barrage de Saint-Ours (six heures) ont été effectuées en simultané sur cinq heures le 14 avril 2015. Aucune observation redondante n'a été effectuée le lendemain (15 avril 2015) aux barrages de Chambly et Saint-Ours.

Bien que des observations de quatre heures suffisent généralement aux fins de contrôle géodésique à l'échelon national, des observations redondantes de quatre heures étant recommandées pour accroître le degré de confiance, dans cette étude, on a effectué des séances d'observation de douze

heures avec des observations redondantes de six heures pour une meilleure précision. Au-delà de quatre heures, les observations gagnent peu en précision (Eckl *et al.*, 2011). On considère généralement que les observations plus longues donnent des mesures plus précises de l'altitude ellipsoïdale NAD 83, ce qui se traduit par une meilleure précision de l'estimation de l'altitude orthométrique NAVD 88.

Bien que toutes les antennes GNSS soient microcentrées, elles étaient toutes orientées vers le nord pour plus de précision. L'orientation a un effet sur la précision lorsqu'on se sert de modèles absolus de calibration du centre de phase des antennes (CPA) puisque ceux-ci prennent en compte non seulement l'altitude, mais également l'azimut du satellite. Les antennes du réseau CORS (Continuously Operating Reference Station) sont également orientées vers le nord.

Les données d'observation GNSS pour les emplacements des limnimètres du lac, de la rivière et des barrages ont d'abord subi un post-traitement par le Online Positioning User Service, qui a été effectué aux États-Unis (OPUS, National Geodetic Survey, 2015b). Les solutions OPUS seront versées dans la base de données OPUS. LGC a également traité les données d'observations GNSS au moyen de l'outil de positionnement ponctuel précis du Système canadien de référence spatiale (SCRS-PPP) de RNCAN.

Collecte de données de terrain

Les équipes de terrain de l'USGS ont déployé sept appareils statiques GNSS aux États-Unis et au Canada en vue de la collecte de données GNSS du 15 au 16 avril 2015 (respectivement jours juliens 105 et 106) aux endroits spécifiés du lac et de la rivière (Tableau 1, Figure 1). Au Canada, elles ont installé ces appareils le 14 avril 2015 (jour julien 104) aux emplacements de deux barrages (Tableau 1, Figure 1). Les procédures de collecte de données suivies pendant les levés GNSS étaient conformes aux lignes directrices pour les levés de réseaux statiques présentées par RNCAN (Canadian Geodetic Survey, 2013) et l'USGS (Rydlund and Densmore, 2012). Le ciel était bien visible à toutes les localités pendant

les observations GNSS, soit du 14 au 16 avril 2015. On a mis en place quatre repères et on s'est servi de niveaux différentiels pour mesurer les différences d'altitude entre les repères GNSS et les marqueurs de référence des limnimètres. Les fichiers journaux des levés GNSS se trouvent aux Annexes 1 et 2, et ils contiennent des informations telles que la hauteur de l'antenne pendant la collecte de données et une localisation descriptive des repères. Les niveaux d'eau instantanés sont les lectures des limnimètres en service à chaque site et diffusées par l'intermédiaire de l'interface Web du National Water Information System (NWIS-Web) (NWIS, 2015) et du site Eau d'Environnement Canada (Environnement Canada, 2015), ou des mesures directes effectuées à partir de marqueurs de référence existants et de niveaux différentiels.

Les limites possibles du levé GNSS étaient la mauvaise qualité des données satellitaires, des erreurs d'équivalence entre les repères de levé GNSS et les marqueurs de référence, et les erreurs de multitrajets. Les erreurs multitrajets résultent de la réflexion des signaux vers le récepteur GNSS, et elles peuvent être dues à la proximité des appareils de la surface de l'eau en présence d'un couvert végétal environnant. À l'examen des données, on a déterminé que leur qualité était bonne.

Traitement des données

Environnement Canada (en coopération avec LGC) et l'USGS (en coopération avec le NGS des États-Unis) ont traité les données d'observation GNSS de façon indépendante et par des méthodes différentes. LGC a traité les données statiques GNSS à l'aide du système SCRS-PPP (Kouba and Heroux, 2011) pour obtenir des altitudes ellipsoïdales. On a appliqué le modèle canadien du géoïde gravimétrique de 2013 (CGG 2013) comme post-traitement des données issues du SCRS-PPP pour produire des mesures d'altitude orthométrique rapportées au CGVD 2013 (Huang and Veronneau, 2013; Veronneau *et al.*, 2014a; Veronneau *et al.*, 2014b). Le NGS du NOAA a traité les données statiques GNSS à l'aide du logiciel OPUS du NGS (OPUS; NGS, 2015b) pour produire des coordonnées

géographiques et de grille de précision et des mesures d'altitude ellipsoïdale (NGS, 2012b). Il a aussi calculé des altitudes orthométriques NAVD 88 à l'aide de GEOID12A (NGS, 2012a) pour chacun des repères. Il a effectué un ajustement de tous les repères relativement réseau CORS (National Geodetic Survey, 2015a) à l'aide d'OPUS Projects (National Geodetic Survey, 2014c). Les données ainsi traitées avec OPUS Projects sont présentées à l'Annexe 4 de ce rapport en vue de la conversion des données altimétriques de surface d'un limnimètre à un seul référentiel uniforme (Huang and Veronneau, 2013; Veronneau *et al.*, 2014a; Veronneau *et al.*, 2014b).

Écarts des référentiels

Les référentiels altimétriques des limnimètres du Canada et des États-Unis sont présentés au Tableau 1. On s'est servi des données altimétriques dérivées des mesures GNSS pour calculer les écarts à employer pour la conversion des niveaux publiés au référentiel NAVD 88, que ce soit par l'intermédiaire des observations GNSS aux marqueurs de référence des limnimètres ou par nivellement différentiel entre les bornes existantes avec les observations GNSS et les marqueurs de référence des limnimètres. Les écarts altimétriques qui sont présentés sont le résultat de la conversion au référentiel NAVD 88 à partir des données publiées soit en NGVD 29, soit en CGVD 28.

Résultats

Le Tableau 2 présente les mesures d'altitude ellipsoïdale et orthométrique de tous les points de levé calculés par le logiciel OPUS Projects du NGS (OPUS; NGS, 2015b). Les résultats du traitement des données statiques par OPUS sont présentés à l'Annexe 2. L'Annexe 3 contient l'information sur le nivellement entre les points du levé GNSS et les marqueurs de référence des limnimètres.

Tableau 2. Résultats du levé des repères du Système mondial de navigation par satellite traités par l'ajustement réseau OPUS Projects.

Note explicative : OPUS (Online Positioning Users Service); pi (pieds); WGS 84 (World Geodetic System 1984); NAVD 88 (Système de référence altimétrique nord-américain de 1988)

Numéro du repère	Nom de la station	Nom du site	Ellipsoïde OPUS ⁽¹⁾ Hauteur (pi)	Ondulation du géoïde, N ₁₂ (pi)	Altitude orthométrique OPUS (pi)
			WGS 84	GEOID12A	NAVD 88
92KSP76	02OJ022	Fleuve Saint-Laurent à Sorel, Québec, Canada	-75,889	-102,812	26,923
78L264	-	Rivière Richelieu au barrage de Saint-Ours à Saint-Ours, Québec, Canada	-56,486	-102,073	45,587
732306	-	Rivière Richelieu au barrage Fryers à Chambly, Québec, Canada	-30,463	-99,636	69,173
Placé	02OJ016	Rivière Richelieu à Saint-Jean-sur-Richelieu, Québec, Canada	0,758	-98,747	99,505
Placé	02OJ036	Rivière Richelieu à Saint-Paul-de-l'Île-aux-Noix, Québec, Canada	11,499	-97,316	108,816
77L9003	02OH001	Lac Champlain à Philippsburg, Québec, Canada	5,755	-96,667	102,421
MR5 de l'USGS	04295000	Rivière Richelieu (lac Champlain) à Rouses Point, New York, États-Unis	5,558	-96,572	102,129
Placé	04294500	Lac Champlain à Burlington, Vermont, États-Unis	7,169	-95,364	102,533
Placé	04279085	Lac Champlain au nord de Whitehall, New York, États-Unis	6,066	-96,745	102,812

¹WGS 84, partie de NAD 83 (2011) époque 2010.00

On a calculé les écarts entre les lectures publiées des limnimètres et les altitudes NAVD 88 à partir des altitudes dérivées de GNSS et des données de nivellement différentiel (Annexe 4). On a calculé les niveaux quotidiens moyens, maximums et minimums (NAVD 88) pour la période de collecte des données (jours juliens 104 à 106) aux limnimètres à lecture instantanée de l'USGS installés sur le lac Champlain (Figure 2). L'altitude moyenne de la surface à Whitehall, New York, dans la partie sud du lac Champlain, était supérieure à celle de la partie nord du lac (Rouses Point, New York, et Burlington, Vermont) (Figure 2). Le vent et la seiche ont contribué à l'élévation du niveau de la partie sud du lac.

Sur le lac Champlain, les limnimètres à lecture instantanée se trouvent à Philippsburg, Québec (n° 02OH001 d'EC), Rouses Point, New York (n° 04295000 d'USGS), à Burlington, Vermont (n°

04294500 d'USGS) et à Whitehall, New York (n° 04279085 d'USGS). Les limnimètres à lecture instantanée d'EC installés sur la rivière Richelieu (Québec) se trouvent à Sorel (n° 02OJ022), Saint-Jean-sur-Richelieu (n° 02OJ016) et Saint-Paul-de-l'Île-aux-Noix (n° 02OJ036) (Figure 1). L'Annexe 4 et le Tableau 3 montrent les écarts altimétriques entre les mesures calculées aux repères GNSS et les marqueurs de référence des limnimètres.

Tableau 3. Les écarts pour la conversion des mesures altimétriques publiées au Système de référence altimétrique nord-américain de 1988, limnimètres du lac Champlain et de la rivière Richelieu.

Note explicative : Écart, valeur à ajouter ou à soustraire aux données limnimétriques publiées pour les convertir au NAVD 88; unités, unités des corrections correspondantes, qui sont aussi celles des données publiées; pi, pieds; NAVD 88, Système de référence altimétrique nord-américain de 1988; EC, Environnement Canada; CGVD 28, Système canadien de référence altimétrique de 1928; USGS, US Geological Survey; NGVD 29, National Geodetic Vertical Datum 1929)

Nom de la station	Nom du site	Organisme	Référentiel des données altimétriques publiées	¹ Écart (pi) pour la conversion des données altimétriques publiées en NAVD 88
02OJ022	Fleuve Saint-Laurent à Sorel, Québec, Canada	EC	Altitude, CGVD 28	+0,115
02OJ016	Rivière Richelieu à Saint-Jean-sur-Richelieu, Québec, Canada	EC	Altitude, CGVD 28	-0,061
02OJ036	Rivière Richelieu à Saint-Paul-de-l'Île-aux-Noix, Québec, Canada	EC	Altitude, CGVD 28	-0,206
02OH001	Lac Champlain à Philipsburg, Québec, Canada	EC	Altitude, CGVD 28	-0,213
04295000	Rivière Richelieu (lac Champlain) à Rouses Point, New York, États-Unis	USGS	Altitude, NGVD 29	-0,431
04294500	Lac Champlain à Burlington, Vermont, États-Unis	USGS	Altitude, NGVD 29	-0,523
04279085	Lac Champlain au nord de Whitehall, New York, États-Unis	USGS	Altitude, NGVD 29	-0,268

¹ Le nombre de décimales indiqué est celui qui est publié pour le site.

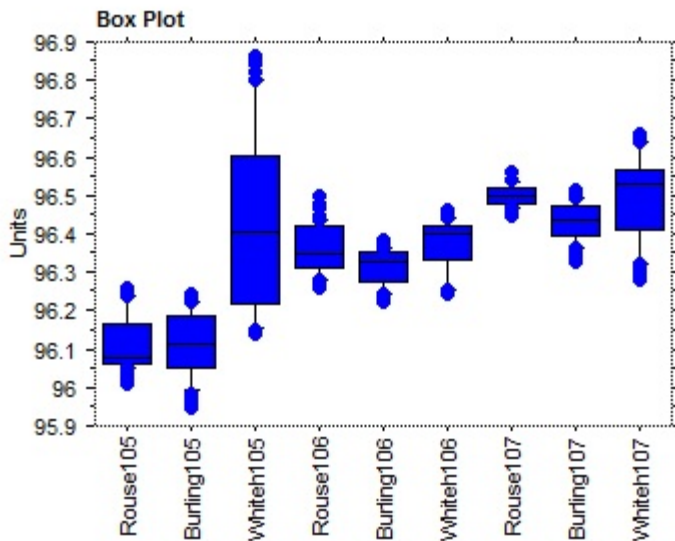


Figure 2 Niveaux quotidiens moyens, maximums et minimums selon le Système de référence altimétrique nord-américain de 1988, dérivés du levé GNSS pour la période de collecte de données (jours juliens 105 et 106) aux limnimètres de l'USGS du lac Champlain.

Note explicative : Cette figure a été produite en anglais. C'est un diagramme en boîte (boxplot) avec un axe des y en unité (Units). Ce graphique doit être mis à jour selon les normes d'unités des publications de l'USGS.]

Sommaire

Au printemps et au début de l'été 2011, la région du lac Champlain a connu des crues historiques causées par la fonte d'une couche de neige chaude et saturée à la fin du printemps et par de fortes pluies printanières sur l'ensemble du bassin du fleuve Saint-Laurent. À la fin avril et pendant tout le mois de mai, les précipitations et la fonte des neiges (troisième accumulation annuelle à avoir jamais été enregistrée) ont amené le lac à des niveaux sans précédent. Le seuil d'inondation a été dépassé du 13 avril au 19 juin 2011, soit un total de 67 jours. Pendant cette période de hautes eaux, l'érosion des berges et les

fluctuations des niveaux du lac ont été aggravées par les vagues soulevées par le vent, associées au fetch localement et à la seiche sur l'ensemble du lac (Bjerklie *et al.*, 2014) (le fetch est la longueur du trajet du vent sur une surface d'eau, et la seiche est une oscillation stationnaire de grande longueur d'onde). Les maximums enregistrés en mai 2011 allaient de 103,2 pi (NGVD 29) à l'extrémité nord du lac Champlain (son exutoire et le début de la rivière Richelieu à Rouses Point, New York) à 103,57 pi (NGVD 29) à son extrémité sud (Whitehall, New York). Il était difficile d'évaluer les niveaux de crue dans l'ensemble du bassin; en effet les mesures limnimétriques de la rivière Richelieu au Canada renvoyaient à un référentiel altimétrique différent de ceux employés sur le lac Champlain aux États-Unis, ce qui compliquait l'évaluation des niveaux de crue en temps réel ainsi que la comparaison des pics de crue dans l'ensemble du bassin du lac Champlain aux États-Unis et au Canada.

À la suite de la crue d'avril et mai 2011, les gouvernements du Canada et des États-Unis ont chargé la Commission mixte internationale (CMI) d'élaborer une ébauche de plan d'étude sur les causes et les effets de la crue de 2011 du lac Champlain et de la rivière Richelieu, et d'élaborer des mesures possibles d'atténuation. Le groupe de travail a identifié plusieurs défis à relever dont l'harmonisation des référentiels altimétriques sur l'ensemble du bassin hydrographique en vue des futurs travaux de modélisation des débits dans l'ensemble du bassin.

En avril 2015, l'USGS et EC ont entrepris des travaux conjoints de détermination précise de niveaux définissant un référentiel altimétrique commun pour des marqueurs de référence sélectionnés sur l'ensemble du lac Champlain et de la rivière Richelieu. Pour harmoniser les référentiels employés aux États-Unis et au Canada, on a effectué un levé de neuf localités au moyen du Système mondial de navigation par satellite (GNSS); on a traité les données satellitaires simultanées ainsi recueillies pour produire des mesures de niveau à deux marqueurs de référence associés à des barrages et sept associés à des limnimètres en service dans tout le bassin (sur le lac Champlain et la rivière Richelieu). Les levés GNSS ont eu lieu du 14 au 16 avril 2015, et les localités couvertes allaient du sud du lac Champlain (près de Whitehall, New York) à

l'extrémité nord de la rivière Richelieu à Sorel, au Québec (lieu de sa confluence avec le Saint-Laurent au Canada).

On a produit des mesures précises dans un référentiel altimétrique uniforme (Système de référence altimétrique nord-américain, NAVD 88) à partir des repères employés dans le levé GNSS pour l'harmonisation des référentiels, aux emplacements de sept limnimètres et de deux barrages du lac Champlain et de la rivière Richelieu. Environnement Canada, en coopération avec LGC, a traité les données statiques brutes issues du levé GNSS au moyen de l'outil de positionnement ponctuel précis du Système canadien de référence spatiale de RNCan (SCRS-PPP). L'USGS, en coopération avec le NGS de la NOAA, a traité les données statiques de façon indépendante à l'aide du Online Positioning User Service (OPUS). On a sélectionné les résultats de l'ajustement de réseau des données statiques du levé GNSS traitées à l'aide d'OPUS pour calculer les écarts permettant de convertir les mesures limnimétriques publiées en niveaux NAVD 88.

On a converti les mesures limnimétriques du lac relevées pendant la campagne de trois jours au Système de référence altimétrique nord-américain de 1988 à partir des écarts calculés, et les valeurs ainsi obtenues montraient une bonne concordance entre les limnimètres. Les écarts de niveaux, tels que calculés à la suite du levé GNSS dans le bassin, peuvent servir à évaluer les débits du lac Champlain aux États-Unis vers la rivière Richelieu au Canada. Ces valeurs permettront d'étalonner les modèles de débits créés par EC pour la rivière Richelieu et le lac Champlain. De plus, la précision accrue des mesures de niveaux pourra être mise à profit dans le modèle altimétrique numérique en cours de développement à Environnement Canada, et elle sera également utile aux nouvelles études de modélisation sur l'évaluation des effets des crues dans le bassin du lac Champlain.

Références

- Bjerklie, D.M., Trombley, T.J., and Olson, S.A., 2014, Assessment of the spatial extent and height of flooding in Lake Champlain during May 2011, using satellite remote sensing and ground-based information: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2014–5163, 18 p., <http://dx.doi.org/10.3133/sir20145163>.
- Canadian Geodetic Survey, 2003, Standard operational procedure: static GPS surveys, Document No. GGN-04, Version 1.0, Issue Date 2003-03-20, Canadian Geodetic Survey, Natural Resources Canada, Ottawa.
- Canadian Geodetic Survey, 2013, Standard operational procedure: field operations, Document No. GGN-18, Version No. 1.4, Issue Date 2013-10-30, Canadian Geodetic Survey, Natural Resources Canada, Ottawa.
- Eckl, M.C., R. Snay, T. Soler, M.W. Cline & G.L. Mader (2001). Accuracy of GPS-derived relative positions as a function of interstation distance and observing-session duration, *Journal of Geodesy*, 75(12),633-640.
- Environnement Canada, 2015, Eau, consulté le 15 mars 2015, <http://eau.ec.gc.ca/>
- Federal Emergency Management Agency, 2011, Vermont – Severe Storms and Flooding, FEMA-1995-DR, accessed February 10, 2015 at <http://www.fema.gov/pdf/news/pda/1995.pdf>
- GISTutor, 2015, Explaining the differences between ellipsoids, geoids, and topographic elevation, accessed at <http://www.gistutor.com/concepts/9-beginner-concept-tutorials/19-explaining-the-differences-between-ellipsoids-geoids-and-topographic-elevation.html> on September 28, 2015.
- Howland, W.G., B. Gruessner, M. Lescaze, and M. Stickney, 2006. Lake Champlain Experience and Lessons Learned Brief, Grand Isle, Vermont.

Huang, J. and Veronneau, M., 2013, Canadian gravimetric geoid model 2010, *Journal of Geodesy*, 87(8): 771-790, doi: 10.1007/s00190-013-0645-0.

Commission mixte internationale, juillet 2013. Plan d'étude pour la détermination des mesures visant à atténuer les inondations et leurs répercussions dans le bassin versant du lac Champlain et de la rivière Richelieu. Rapport de la CMI présenté aux gouvernements du Canada et des États-Unis, préparé par le Groupe de travail international du plan d'étude du lac Champlain et de la rivière Richelieu, xx 135 p.

Kouba, J., and Heroux, P., 2001, Precise Point Positioning using IGS Orbit and Clock products, *GPS Solutions*, 5(2): 12-28.

Kenney, T.A., 2010, Levels at gaging station: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, 3-A19, 60 p., <http://pubs.usgs.gov/tm/tm3A19/>.

Lake Champlain Basin Program, 2013, Flood resilience in the Lake Champlain Basin and Upper Richelieu River, April 11: Lake Champlain Basin Program report, 93 p.

Lake Champlain Basin Program, 2015, Lake Basins and Facts, accessed at <http://www.lcbp.org/about-the-basin/facts/> , accessed on July 7, 2015.

Lake Champlain Research Consortium, 2004, About Lake Champlain: Lake Champlain Research Consortium, at <http://academics.smcvt.edu/lcrc/aboutlake.html>.

Lake Champlain Land Trust, 2015, Lake Champlain Land Trust, accessed at <http://www.lclt.org/about-lake-champlain/lake-champlain-facts/> , accessed on July 7, 2015.

National Geodetic Survey, 2012a, GEOID12A: National Geodetic Survey, accessed February 2, 2015, at <http://www.ngs.noaa.gov/GEOID/GEOID12A/>.

National Geodetic Survey, 2012b, The National Adjustment of 2011 Project: National Geodetic Survey, accessed February 2, 2015, at <http://www.ngs.noaa.gov/web/surveys/NA2011/>.

National Geodetic Survey, 2015a, Continuously Operating Reference Station (CORS): National Geodetic Survey, accessed February 2, 2015, at <http://www.ngs.noaa.gov/CORS/>.

National Geodetic Survey, 2015b, OPUS: Online positioning user service: National Geodetic Survey, accessed February 2, 2015, at <http://www.ngs.noaa.gov/OPUS/about.jsp>.

National Geodetic Survey, 2015c, OPUS Projects: National Geodetic Survey, accessed February 2, 2015, at <http://www.ngs.noaa.gov/OPUS-Projects/OpusProjects.shtml>.

National Oceanic and Atmospheric Administration, 2012, #2 weather event—Lake Champlain record flooding: National Oceanic and Atmospheric Administration Top 5 Weather Events of 2011 Across the North Country Web page, accessed February 2015, at http://www.erh.noaa.gov/btv/events/Top5_2011/2.php.

National Oceanic and Atmospheric Administration, National Geodetic Survey, 2014, GRAV-D, accessed March 15, 2015 at <http://www.ngs.noaa.gov/GRAV-D/>

National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service (NOAA-NWS), 2015, Advanced Hydrologic Prediction Service, Lake Champlain at Rouses Point, accessed May 5, 2015 at <http://water.weather.gov/ahps2/hydrograph.php?gage=roun6&wfo=btv>

Ressources naturelles Canada, 2013, Modernisation du système de référence altimétrique, consulté le 15 mars 2015, <http://www.rncan.gc.ca/sciences-terre/geomatique/systemes-reference-geodesique/9055>

National Water Information System Web Interface, 2015, accessed March 15, 2015 at <http://waterdata.usgs.gov/vt/nwis/rt> and <http://waterdata.usgs.gov/ny/nwis/rt>

Riboust, Philippe and Francois Brissette, 2015. Climate Change Impacts and Uncertainties on Spring Flooding of Lake Champlain and the Richelieu River. *Journal of American Water Resources Association (JAWRA)* 51(3): 776-793. DOI:10.1111/jawr.12271

- Rydlund, P.H., Jr., and Densmore, B.K., 2012, Methods of practice and guidelines for using survey-grade global navigation satellite systems (GNSS) to establish vertical datum in the United State Geological Survey: U.S. Geological Survey Techniques and Methods Report 2012-11:D1, 120 p, <http://pubs.er.usgs.gov/publication/tm11D1>
- Shanley, J.B. and J.C. Denner, 1999. The Hydrology of the Lake Champlain Basin. Lake Champlain in Transition: From Research toward Restoration. American Geophysical Union, Washington, D.C., pp. 41-66.
- Stickney, M., C. Hickey, and R. Hoerr, 2001. Lake Champlain Basin Program: Working Together Today for Tomorrow. Lakes and Reservoirs: Research and Management 6:217-223.
- U.S. Bureau of Census, 2015a, State and County Quickfacts: *Population, 2013 Estimate for Burlington, Vt.*, accessed July 28, 2015 at <http://quickfacts.census.gov/qfd/states/50/5010675.html>
- U.S. Bureau of Census, 2015b, State and County Quickfacts: *Population, 2013 Estimate for Plattsburgh, N.Y.*, accessed July 28, 2015 at <http://quickfacts.census.gov/qfd/states/36/3658574.html>
- U.S. Bureau of Census, 2015c, State and County Quickfacts: *Population, 2013 Estimate for Colchester, Vt.*, accessed July 28, 2015 at <http://www.census.gov/quickfacts/table/PST040213/5000714875>
- U.S. Geological Survey, 2015a, USGS 04295000, *Richelieu River (Lake Champlain) at Rouses Point N.Y.*: U.S. Geological Survey, accessed May 5, 2015, at http://waterdata.usgs.gov/NY/nwis/uv?site_no=04295000.
- U.S. Geological Survey, 2015b, USGS 04294500, *Lake Champlain at Burlington, Vt.*: U.S. Geological Survey, accessed May 5, 2015, at http://waterdata.usgs.gov/nwis/inventory/?site_no=04294500.
- U.S. Geological Survey, 2015c, USGS 04279085, *Lake Champlain North of Whitehall, N.Y.*: U.S. Geological Survey, accessed May 5, 2015, at http://waterdata.usgs.gov/nwis/inventory/?site_no=04279085.

Veronneau, M., Huang, J., Smith, D.A., and Roman, D.R., 2014a, Canada's new vertical datum: CGVD 2013, xyHT, October 2014, pp. 43-45.

Veronneau, M., Huang, J., Smith, D.A., and Roman, D.R., 2014b, CGVD 2013, Part 2, xyHT, November 2014, pp. 41-43.

Annexes

Annexe 1.

Information sur la collecte de données par le Système mondial de navigation par satellite pour tous les repères couverts par cette étude; cette Annexe peut être consultée par voie électronique et n'est pas incluse dans le présent rapport.

Annexe 2.

Fichiers de traitement des données brutes recueillies aux repères par les systèmes mondiaux de navigation par satellite; cette Annexe peut être consultée par voie électronique et n'est pas incluse dans le présent rapport.

Annexe 3.

Information sur le nivellement des sites comportant des repères et qui n'ont pas pu être couverts directement par les systèmes mondiaux de navigation par satellite; cette Annexe peut être consultée par voie électronique et n'est pas incluse dans le présent rapport.

Annexe 4.

Information sur les écarts altimétriques pour les repères directement couverts par le levé des systèmes mondiaux de navigation par satellite; cette Annexe peut être consultée par voie électronique et n'est pas incluse dans le présent rapport.