



Environnement
Canada

Environment
Canada



Création d'un modèle hydraulique 2D de la rivière Richelieu entre Rouses Point et Sorel (tâche 2-3)

Membres de l'équipe : Paul Boudreau, Jean-François Cantin, André Bouchard, Olivier Champoux, Patrice Fortin, Jean-Michel Fiset, Nicolas Fortin, Julie Thérien et Guy Morin

Rapport technique rédigé par Environnement Canada pour le Groupe de travail technique international du lac Champlain et de la rivière Richelieu

Octobre , 2015

Canada 

Le contenu de cette publication ou de ce produit peut être reproduit en tout ou en partie, et par quelque moyen que ce soit, sous réserve que la reproduction soit effectuée uniquement à des fins personnelles ou publiques mais non commerciales, sans frais ni autre permission, à moins d'avis contraire.

On demande seulement :

- de faire preuve de diligence raisonnable en assurant l'exactitude du matériel reproduit;
- d'indiquer le titre complet du matériel reproduit et l'organisation qui en est l'auteur;
- d'indiquer que la reproduction est une copie d'un document officiel publié par le gouvernement du Canada et que la reproduction n'a pas été faite en association avec le gouvernement du Canada ni avec l'appui de celui-ci.

La reproduction et la distribution à des fins commerciales est interdite, sauf avec la permission écrite de l'administrateur des droits d'auteur de la Couronne du gouvernement du Canada, Travaux publics et Services gouvernementaux (TPSGC). Pour de plus amples renseignements, veuillez communiquer avec TPSGC au 613-996-6886 ou à droitdauteur.copyright@tpsgc-pwgsc.gc.ca.

Photos : © Environnement Canada

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre de l'environnement, 2012.

Also available in English

Table des matières

Introduction.....	1
1. Analyse de scénarios	2
2. Apports en eau	2
3. Modèle numérique d'élévation.....	3
4. Modèle 2D du Richelieu.....	6
4.1 Maillage amont (de Saint-Jean-sur-Richelieu au barrage de Chambly)	8
4.2 Maillage aval (bassin de Chambly à Sorel).....	17
Conclusion	22
Références.....	22

Liste des figures

FIGURE 1 : LOCALISATION DES STATIONS ET TRIBUTAIRES SUR LE BASSIN DU LA RIVIÈRE RICHELIEU.	3
FIGURE 2 : MAILLAGE DE RÉDUCTION POUR PASSER DES PROFONDEURS AU ZÉRO DES CARTES EN DONNÉES ALTIMÉTRIQUES CGVD28.....	5
FIGURE 3 : ÉQUATION DES ONDES LONGUES (FORME CONSERVATIVE) EN RÉGIME PERMANENT RÉSOLUES PAR H2D2	7
FIGURE 4 : TRONÇON NON-MODÉLISÉ (LIGNE ROUGE).....	8
FIGURE 5 : BARRAGE FRYER ET MAILLAGE CORRESPONDANT	9
FIGURE 6 : PONT YULE SUR LA ROUTE 112.	10
FIGURE 7 : COEFFICIENTS DE FROTTEMENT ÉTALONNÉS DES RAPIDES FRYERS AU BARRAGE DE CHAMBLY	11
FIGURE 8 : PROFIL DES NIVEAUX MESURÉS ET SIMULÉS POUR LE 25 OCTOBRE 2011.....	12
FIGURE 9 : RELATION NIVEAU-DÉBIT POUR LE BARRAGE DE CHAMBLY.....	16
FIGURE 10 : BARRAGE DE SAINT-OURS ET MAILLAGE CORRESPONDANT.....	17
FIGURE 11 : ÉCART ENTRE LA BATHYMÉTRIE DU SHC ET CELLE D'EC, TRANSECT LONGITUDINAL EN AMONT À PARTIR DE SOREL	19
FIGURE 12 : ÉCART ENTRE LA BATHYMÉTRIE DU SHC ET CELLE D'EC, TRANSECT LONGITUDINAL DE ST-OURS À SOREL, QUÉBEC	19
FIGURE 13 : BATHYMÉTRIE DU SHC ET CELLE D'EC, TRANSECT TRANSVERSAL A	20
FIGURE 14 : ÉCART ENTRE LA BATHYMÉTRIE DU SHC ET CELLE D'EC, TRANSECT TRANSVERSAL A	20
FIGURE 15 : BATHYMÉTRIE DU SHC ET CELLE D'EC, TRANSECT TRANSVERSAL B	21
FIGURE 16 : ÉCART ENTRE LA BATHYMÉTRIE DU SHC ET CELLE D'EC, TRANSECT TRANSVERSAL B	21

Liste des tableaux

TABLEAU 1 : JEUX DE DONNÉES BATHYMÉTRIQUES ET TOPOMÉTRIQUES UTILISÉS	4
TABLEAU 2 : VALEURS DE ZÉRO DES CARTES POUR LA RIVIÈRE RICHELIEU	4
TABLEAU 3 : ÉTALONNAGE POUR LE 25 OCTOBRE 2011.....	13
TABLEAU 4 : NIVEAUX D'EAU ET DÉBITS DÉFINISSANT LES SCÉNARIOS	14
TABLEAU 5 : RELATION NIVEAU-DÉBIT AU BARRAGE DE CHAMBLY.....	15
TABLEAU 6 : DÉBIT SORTANT À LA LIMITE AMONT ET NIVEAUX UTILISÉS À LA LIMITE AVAL DU MODÈLE POUR LES 11 SCÉNARIOS.	16

Introduction

Selon le plan de travail final du 23 janvier 2015, la tâche 2-3 consiste à créer un modèle hydraulique 2D de la rivière Richelieu entre Rouses Point et Sorel. Les objectifs sont définis comme suit :

1. *Une analyse de scénarios sera réalisée et comprendra l'identification des principaux affluents qui seront inclus dans le domaine du modèle. Tous les apports à la rivière seront répartis entre ces affluents. Des événements de référence à des fins d'étalonnage seront définis (niveaux d'eau, apports) et inclus.*
2. *Les données d'étalonnage de l'inondation de 2011 seront recueillies de diverses sources comme le ministère de la Sécurité Publique, le Centre d'Expertise Hydrique du Québec, Parcs Canada, Ressources naturelles Canada, etc.*
3. *Modèle numérique d'élévation (MNE) : les données sur l'élévation des rives de la rivière, la bathymétrie de la rivière Richelieu et les observations existantes du substrat seront regroupées et incorporées dans le maillage d'éléments finis du modèle hydraulique.*
4. *Les structures construites importantes comme les ponts, les quais, les barrages, les écluses, etc. susceptibles d'influencer les simulations de niveau d'eau seront numérisées et incorporées dans le maillage d'EF.*
5. *Maillage d'EF : production d'un maillage hydrodynamique de la rivière Richelieu en respectant les critères des tâches précédentes.*
6. *Calibration et étalonnage du modèle hydrodynamique. Calibration et validation du modèle hydrodynamique. Des mesures de performance seront utilisées pour évaluer la performance du modèle là où des observations sont également faites. Ces mesures comprendront (a) l'erreur moyenne entre les simulations et les observations, (b) l'erreur absolue moyenne entre les simulations et les observations, (c) l'erreur quadratique moyenne entre les simulations et les observations et (d) le coefficient de corrélation Pearson (r) entre les élévations observées et simulées.*
7. *Simulation des scénarios hydrodynamiques correspondant à l'élévation de surface du lac Champlain sélectionnée pour les cartes statiques des plaines inondables afin de produire des profils longitudinaux de la surface de l'eau de la rivière Richelieu.*
8. *Un rapport technique décrivant le travail de modélisation hydrodynamique et les résultats de son application sera rédigé.*

Le présent rapport, qui documente toutes les activités ci-dessus, contient les chapitres suivants :

1. Analyse de scénarios, 2. Apports en eau, 3. Modèle numérique d'élévation, 4. Modèle hydrodynamique 2D du Richelieu, et enfin conclusion.

1. Analyse de scénarios

Il est rapidement apparu que l'utilisation de Rouses Point comme limite amont du modèle serait problématique; en effet lorsque le niveau du lac Champlain est très élevé comme en 2011, les eaux de crue de la baie Missisquoi inondent des zones humides près d'Embranchement Holzgang-Messierand et se déversent directement dans la rivière du Sud qui rejoint la rivière Richelieu juste en aval de l'Île-aux-Noix. Le modèle devrait inclure ce « contournement » et donc également cette partie du lac Champlain. Mais le modèle du lac Champlain créé à la tâche 1-2 couvrirait déjà le tronçon supérieur de la rivière Richelieu y compris les plaines inondables de la baie Missisquoi et son « contournement », ainsi que la rivière elle-même jusqu'à un point situé en aval du seuil rocheux de Saint-Jean-sur-Richelieu; il était donc beaucoup plus logique de se servir des résultats de ce modèle pour la partie de la rivière Richelieu allant de Rouses Point à Saint-Jean-sur-Richelieu. Par conséquent le modèle dont il est question dans le présent rapport se limite au tronçon qui commence juste en amont du seuil de Saint-Jean-sur-Richelieu et se termine à l'embouchure de la rivière à Sorel. Ainsi en combinant les modèles du lac et de la rivière, on a couvert l'ensemble du domaine.

Dans le cadre de l'étude, le groupe de travail a créé 11 scénarios ou événements de référence basés sur les niveaux à la station limnimétrique de Rouses Point dans l'État de New York. Ces 11 scénarios correspondent aux niveaux suivants à Rouses Point dans le référentiel NGVD29 (National Geodetic Vertical Datum of 1929) : 100,0, 101,0, 101,5, 102,0, 102,5, 103,0, 103,2, 103,5, 104,0, 105,0 et 106,0 pieds.

La condition imposée à l'amont du modèle à Saint-Jean-sur-Richelieu est un débit. Les débits sont donnés par les résultats du modèle du lac Champlain pour les 11 scénarios.

2. Apports en eau

Concernant les points d'entrée du modèle hydrodynamique, en consultation avec le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ), il a été décidé d'inclure les sept tributaires suivants 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. La Figure 1 montre leur emplacement. Les débits associés aux autres tributaires moins importants ainsi que le débit diffus entrant dans la rivière Richelieu sont répartis entre ces sept entrées du modèle. On a constitué une base de données de tous les apports d'eau pour pouvoir facilement alimenter le modèle et simuler des événements historiques. Ce travail est décrit dans le rapport du modèle du lac Champlain (Environnement Canada 2015).

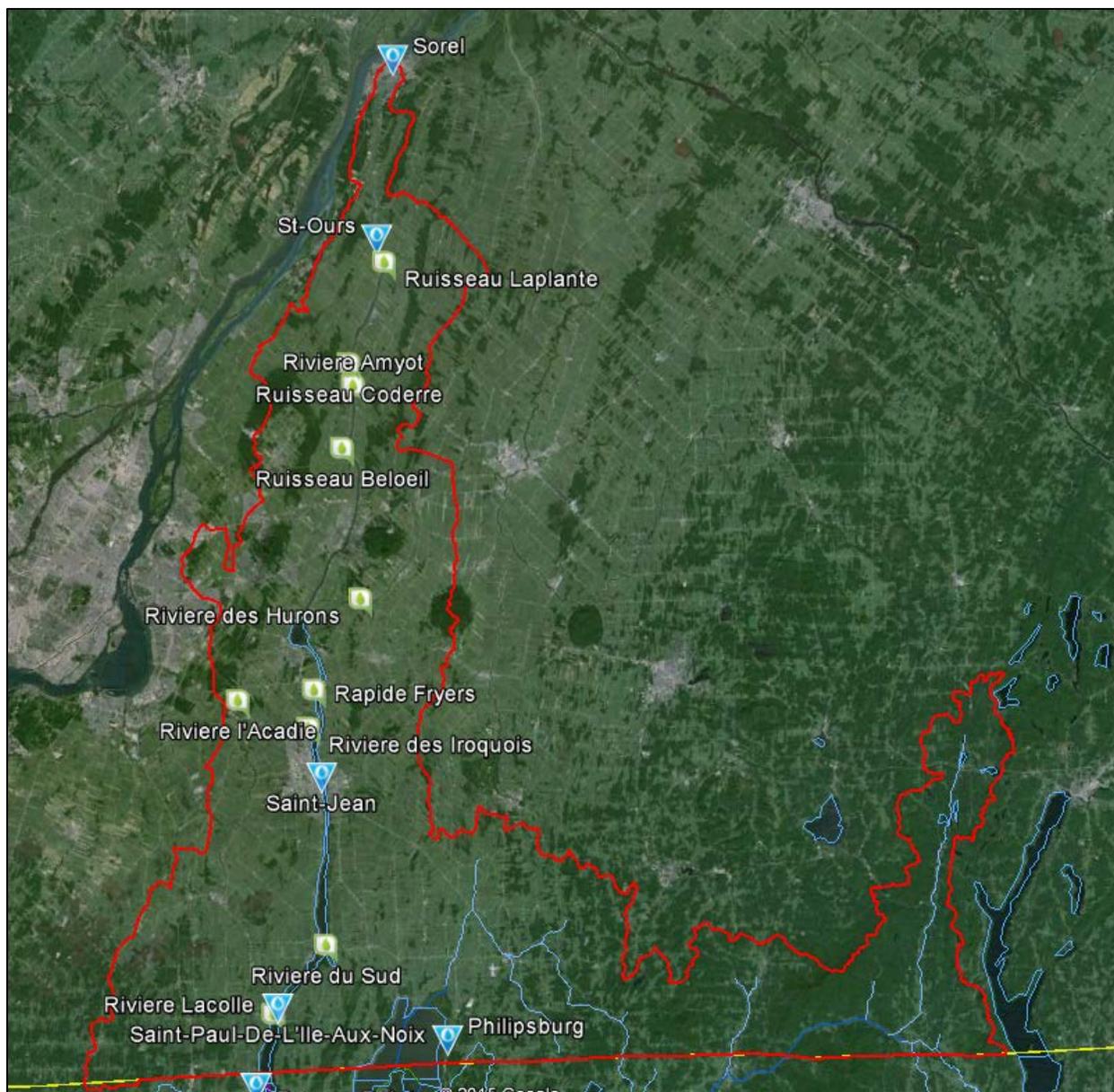


Figure 1 : Localisation des stations et tributaires sur le bassin de la Rivière Richelieu.

3. Modèle numérique d'élévation.

Jeux de données altimétriques disponibles

Pour construire le modèle numérique d'élévation (MNE) de la rivière Richelieu à l'aval de la station des rapides Fryers, trois jeux de données sont disponibles. Il s'agit de données LiDAR pour la topographie des berges fournies par le CEHQ, des données du Service hydrographique du Canada (SHC) pour la bathymétrie de la rivière du bassin de Chambly à Sorel ainsi que des

transects de bathymétrie fournis par Parc Canada, qui couvrent la portion entre les rapides Fryers et le bassin Chambly. Cette dernière bathymétrie a été numérisée à partir de plans datant d'avant 1966 pour un projet de modification du canal de Chambly.

Le Tableau 1 indique le nom, la source, la résolution horizontale et le référentiel altimétrique de chacun de ces trois jeux de données topométriques et bathymétriques ayant servi à la modélisation de ce tronçon de rivière.

Tableau 1 : Jeux de données bathymétriques et topométriques utilisés

Nom	Source	Résolution horizontale	Référentiel altimétrique
LiDAR CEHQ		Nuage de points de LiDAR (plusieurs points au mètre)	CGVD28
SHC	SHC	Nuage de points de bathymétrie mesuré pour la rivière Richelieu	Zéro des cartes
Archive 1966	Parc Canada	Transects bathymétriques	CGVD28

Transformation des référentiels altimétriques

Le référentiel altimétrique du MNE final est le NAVD88. Par conséquent les jeux de données devaient subir une transformation qui est détaillée ci-dessous.

Bathymétrie, Service hydrographique du Canada (SHC)

Les données provenant du SHC sont exprimées en profondeur par rapport au zéro des cartes. Le Tableau 2 donne les valeurs de zéro pour différents emplacements le long du Richelieu.

Tableau 1 : Valeurs de zéro des cartes pour la rivière Richelieu

Station	Nom de la station	Zéro des cartes en niveau moyen de la mer (m)
15900	Philipsburg	28,346
15905	Cantic	28,350
15910	Saint-Paul-de l'Île-aux-Noix	28,349
15913	Saint-Jean-sur-le-Richelieu	28,350
15916	Barrage Fryer	26,300
15914	Bassin de Chambly	6,707
	Beloeil	6,635
15919	Saint-Ours Amont	6,455
15920	Saint-Ours aval	4,415
15930	Sorel	3,805

Pour obtenir des altitudes en CGVD28, on a soustrait chacune des données de profondeur renvoyant au zéro des cartes du SHC de la valeur du zéro des cartes exprimée par rapport au

niveau moyen de la mer, cette valeur étant elle-même calculée par interpolation à partir du maillage de réduction de la Figure 2. Les valeurs du zéro des cartes exprimées par rapport au niveau moyen de la mer du Tableau 2 renvoient aux sommets des triangles du maillage de réduction; ainsi il est possible de calculer une valeur de réduction par interpolation pour tous les points situés à l'intérieur du maillage.

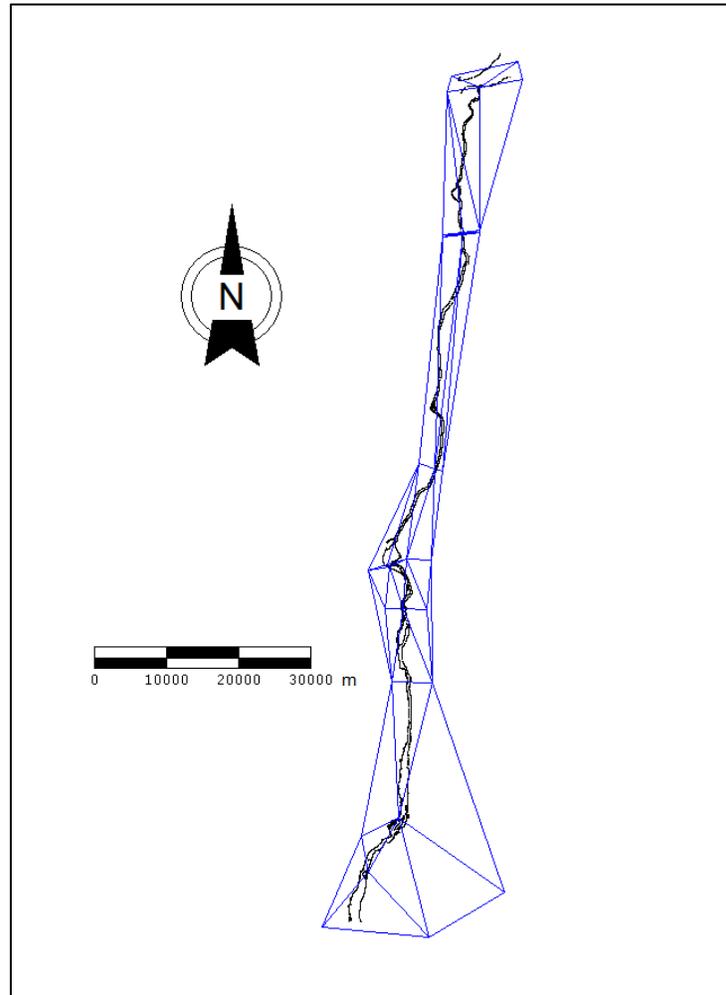


Figure 2 : Maillage de réduction pour passer des profondeurs au zéro des cartes en données altimétriques CGVD28.

Archive 1966 de Parcs Canada

Ce jeu de données a subi une première transformation, soit la conversion des unités du système impérial (pi) au système métrique (m). Ainsi l'équation suivante a été appliquée à toutes données bathymétriques :

$$1) \textit{Altitude (m)} = \textit{Altitude(pi)} * 0,3048$$

Pour les trois jeux de données, la dernière transformation qui a été effectuée est la conversion entre le référentiel CGVD28 et le NAVD88. Cette transformation a été effectuée à l'aide de la grille de conversion correspondante qui est décrite dans le rapport du modèle du lac Champlain (Environnement Canada 2015).

4. Modèle 2D du Richelieu.

Hydrologie du système

Voir section 2 Apports en eau.

Bathymétrie et topographie

L'assemblage de la bathymétrie et de la topographie sur le maillage hydrodynamique a été fait à l'aide du MNE présenté à la section 3.

Substrat et frottement

Généralement la valeur de frottement utilisée lors du développement d'un modèle hydrodynamique est variable spatialement et déduite à partir d'échantillons du substrat. Par contre pour cette étude on ne disposait pas de données de substrat pour produire des cartes de frottement.

La rugosité de la rivière est représentée par le coefficient de Manning. Ce coefficient est utilisé dans les équations pour générer une valeur de frottement qui agit sur l'écoulement. Une augmentation du coefficient de Manning provoque un ralentissement de l'écoulement et une augmentation du niveau d'eau. L'ajustement de ce coefficient sur un tronçon de rivière permet l'étalonnage ou le calage d'un modèle hydrodynamique. Initialement un coefficient de Manning uniforme de 0,02 a été appliqué sur l'ensemble du domaine. Puis, lors de l'étalonnage du modèle, les valeurs ont été ajustées pour recouper les niveaux d'eau.

Modèle hydrodynamique

La modélisation hydrodynamique a été effectuée à l'aide du modèle H2D2 développé à l'INRS-Eau (maintenant INRS-ÉTÉ) avec le soutien d'Environnement Canada. L'approche utilisée est basée sur une modélisation numérique bidimensionnelle (2D) des équations d'ondes longues aussi appelées « équations des eaux peu profondes » qui sont résolues par la méthode des éléments finis. Ce modèle utilise la forme conservative des équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement et prend en compte localement les paramètres de frottement dus aux substrats, à la végétation aquatique et à la glace. Il procure en sortie les composantes (x , y) de la vitesse moyenne (intégrée verticalement) sur tous les nœuds de calcul. Tout le domaine de simulation est ainsi décrit soit directement aux nœuds de calcul, soit par interpolation entre ces nœuds. Le modèle prend en compte le recouvrement et le découverture des berges en fonction du débit et du niveau. Le modèle mathématique est représenté par le système d'équation de la Figure 3.

Équation de conservation de la masse

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0$$

Équation de conservation de la quantité de mouvement

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x q_x}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_x q_y}{H} \right) + c^2 \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial x} (H \tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (H \tau_{xy}) \right) - \tau_x^b - \tau_x^s - f_c q_y = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_y q_x}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_y q_y}{H} \right) + c^2 \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial x} (H \tau_{yx}) + \frac{\partial}{\partial y} (H \tau_{yy}) \right) - \tau_y^b - \tau_y^s + f_c q_x = 0$$

$x(x,y)$	= Coordonnées (x vers l'est et y vers le nord)	f_c	= force de Coriolis ($f_c=2\omega \sin\phi$) (s^{-1})
q_x, q_y	= débit spécifique selon x et y (m^2/s)	τ_{ij}	= contraintes de Reynolds (kg/s^2m)
h	= hauteur d'eau (niveau)	τ_x^b, τ_y^b	= friction au fond en x et en y (kg/s^2m)
H	= profondeur de la colonne d'eau ($=h-z$) (m)	τ_x^s, τ_y^s	= friction en surface en x et en y (kg/s^2m)
c	= vitesse des vagues ($c = \sqrt{gH}$) (m/s)		
ρ	= masse spécifique de l'eau (10^3 kg/m^3)		
$u(u,v)$	= composante de la vitesse (m/s) où;		
	$u = q_x / H$ (m/s)		
	$v = q_y / H$ (m/s)		

Figure 3 : Équation des ondes longues (forme conservative) en régime permanent résolues par H2D2

Maillage aux éléments finis

Le tronçon simulé est subdivisé en éléments triangulaires qui forment le « maillage » ou la « grille d'éléments finis ». La forme et la taille de ces éléments peuvent être adaptées pour représenter la forme et la complexité du terrain, du substrat, de la végétation aquatique ou de toute autre variable. Plus le terrain est complexe, plus le maillage est fin et plus le nombre d'éléments est important. Cependant, un maillage avec un trop grand nombre d'éléments peut se traduire en temps de calcul excessifs. L'un des objectifs de la modélisation est d'optimiser le maillage en fonction de la précision recherchée et du temps de calcul sur les ordinateurs disponibles.

Discretisation

Les données du modèle de terrain sont rendues accessibles au modèle de calcul hydrodynamique par la méthode des éléments finis. Les éléments utilisés sont des triangles à six nœuds (interpolation P1-isoP2) qui entrent tous dans le calcul des vitesses moyennes. Ces nœuds portent les informations sur la frottement et la topographie. La topographie et le niveau d'eau sont portés par les trois nœuds sommets, et une interpolation linéaire permet de connaître ces variables sur tout l'élément.

Maillage de la rivière Richelieu

Un premier maillage a été produit sur l'ensemble de la rivière, de Sorel à l'amont du seuil de Saint-Jean-sur-Richelieu. Il est rapidement apparu qu'il serait très ardu d'obtenir une solution convergée sur le barrage de Chambly. Dans le passé, on a pu modéliser des structures hydrauliques telles que le barrage de Chambly avec H2D2, au prix d'un effort important et de nombreuses heures de travail. Par conséquent, étant donné le temps limité dont nous disposons pour ce projet, nous avons décidé de scinder le tronçon en deux. Un premier tronçon allant de

Sorel au bassin de Chambly et un autre allant du barrage de Chambly à l'amont du seuil. Une section d'environ 1 km entre le barrage de Chambly et le bassin de Chambly (ligne rouge de la Figure 4) n'a pas été modélisée parce que de toute évidence la bathymétrie existante ne permettait pas de fournir une bonne représentation hydrodynamique de ce secteur, si ce n'est pour faire passer le débit en direction du bassin de Chambly.



Figure 4 : Tronçon non-modélisé (ligne rouge).

4.1 Maillage amont (de Saint-Jean-sur-Richelieu au barrage de Chambly)

Le maillage utilisé couvre la rivière Richelieu depuis l'amont du seuil de Saint-Jean-sur-Richelieu jusqu'au barrage de Chambly. Le maillage comporte un nombre total de 79 181 nœuds et de 38 539 éléments. La taille des éléments va de quelques mètres près de certaines zones nécessitant un grand nombre de détails à 150 m dans les plaines susceptibles d'être inondées et où les besoins de détails sont moins importants. Mais de façon générale on a employé une taille de maille de 25 m. Le maillage du modèle du lac Champlain allant de Saint-Jean-sur-Richelieu à

la station des rapides Fryers, a été réutilisé. Le maillage a été produit pour couvrir la gamme de niveaux d'eau très élevés susceptibles de se produire.

Une attention particulière a été portée à certaines caractéristiques physiques et structurales de la rivière Richelieu. Les figures des pages 12 et 13 montrent le détail autour de certains ouvrages de génie.

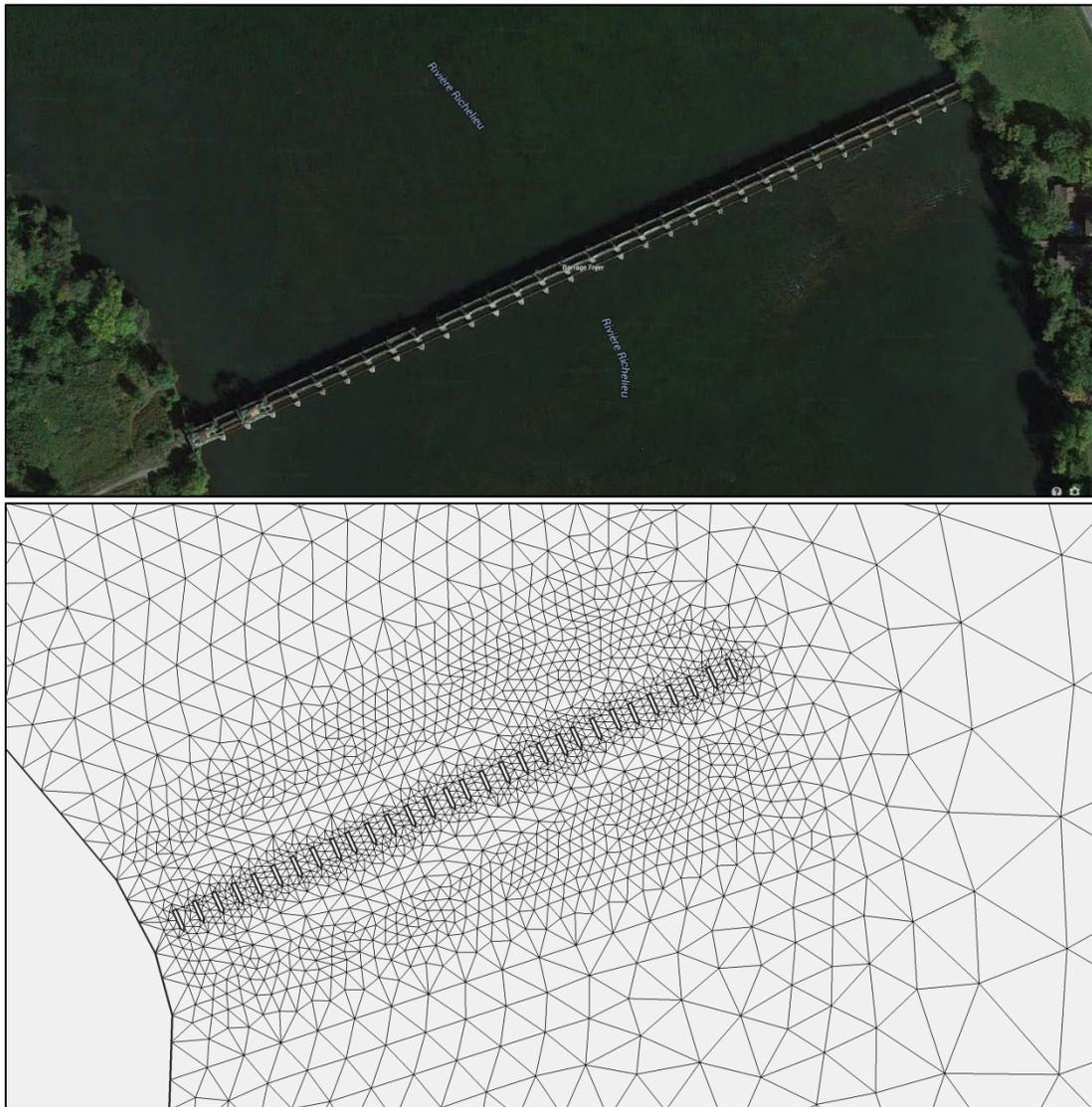


Figure 5 : Barrage Fryer et maillage correspondant

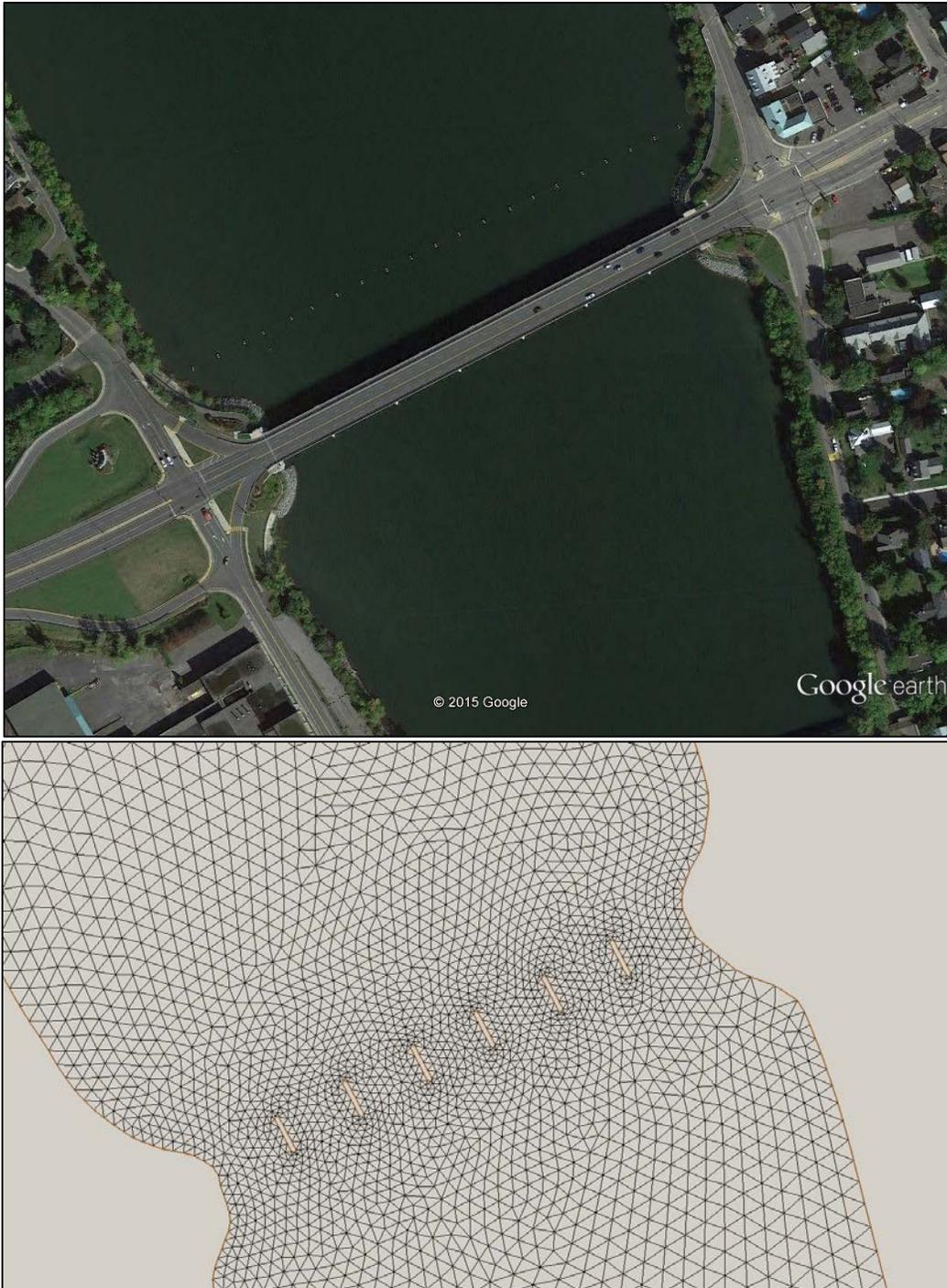


Figure 6 : Pont Yule sur la route 112.

Étalonnage

La campagne de mesure menée par Environnement Canada le 25 octobre 2011 a servi à étalonner le modèle. Au cours des relevés, le débit était stable et voisin de $590 \text{ m}^3/\text{s}$ ($\pm 5 \text{ m}^3/\text{s}$). Comme la portion amont du maillage provenait du modèle du lac Champlain, on a conservé

l'étalonnage déjà effectué pour le lac et on a réutilisé les coefficients de frottement correspondant à la partie commune, soit de la station des rapides Fryers à Saint-Jean-sur-Richelieu.

On a effectué l'étalonnage à l'état stable en imposant un débit de $590 \text{ m}^3/\text{s}$ à la limite amont du modèle, soit Saint-Jean-sur-Richelieu. On a également ajusté les coefficients de frottement de Manning pour que les niveaux simulés représentent les niveaux mesurés. Les transects bathymétriques (Archive 1966) sont les seuls qui représentent le fond de la rivière entre les rapides Fryers et le barrage de Chambly. Les transects bathymétriques, datant quand même d'avant 1966, sont assez espacés. Ils représentent assez bien la pente générale du terrain mais ne captent pas nécessairement tous les petits seuils de ce tronçon. On a utilisé les coefficients de Manning pour pallier cette lacune afin que les niveaux simulés soient comparables aux niveaux mesurés. C'est pour cette raison qu'on a employé des coefficients de Manning atteignant 0,056 par endroits. La Figure 7 montre les coefficients de frottement étalonnés sur ce tronçon.

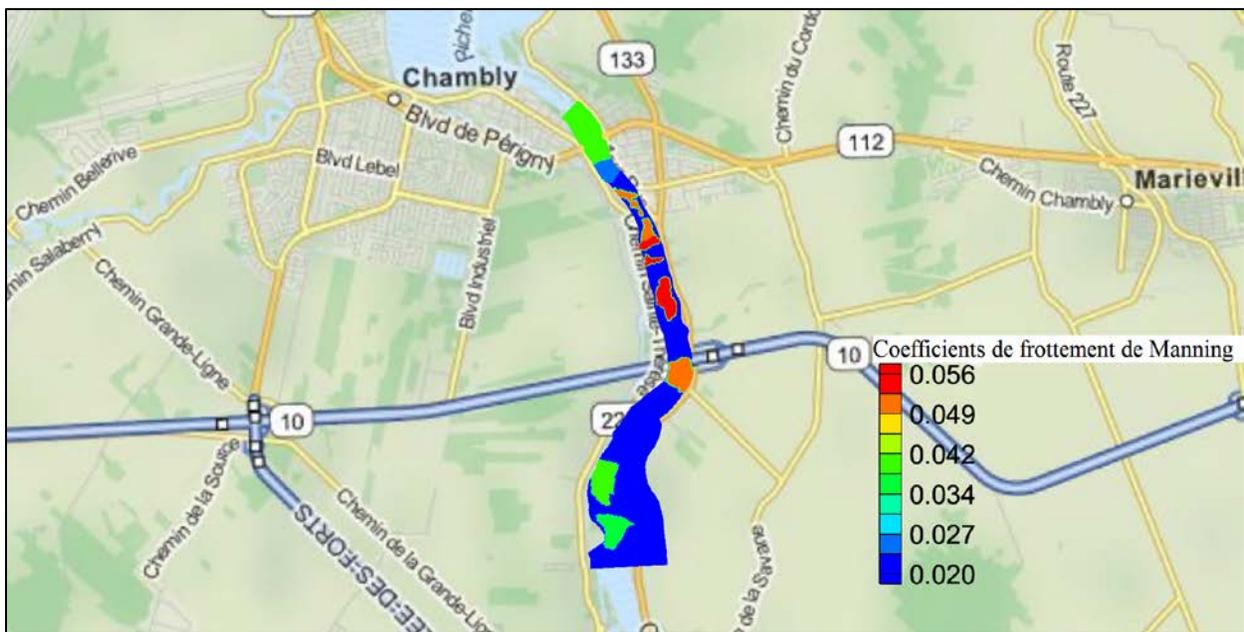


Figure 7 : Coefficients de frottement étalonnés des rapides Fryers au barrage de Chambly

Les résultats de l'étalonnage sont présentés dans le Tableau 3 et à la Figure 8.

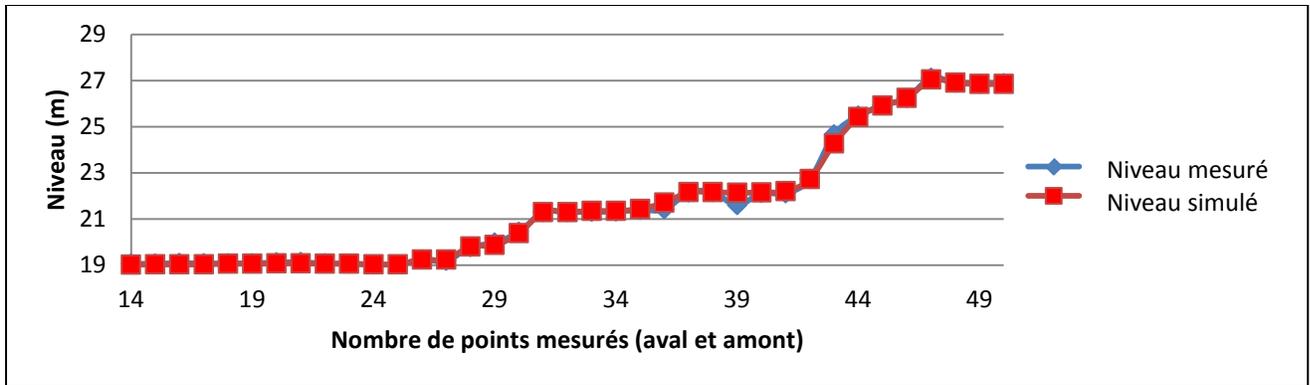


Figure 8 : Profil des niveaux mesurés et simulés pour le 25 octobre 2011

Tableau 3 : Étalonnage pour le 25 octobre 2011

Numéro du point	Niveau mesuré (m) NAVD88	Niveau Simulé (m) NAVD88	Écart (m)
14	19,066	19,031	-0,035
15	19,063	19,033	-0,030
16	19,094	19,035	-0,059
17	19,075	19,036	-0,039
18	19,081	19,064	-0,017
19	19,082	19,063	-0,019
20	19,117	19,077	-0,040
21	19,13	19,081	-0,049
22	19,074	19,067	-0,007
23	19,066	19,067	0,001
24	19,021	19,044	0,023
25	19,023	19,044	0,021
26	19,24	19,246	0,006
27	19,191	19,246	0,055
28	19,782	19,814	0,032
29	19,977	19,873	-0,104
30	20,443	20,389	-0,054
31	21,299	21,302	0,003
32	21,301	21,302	0,001
33	21,314	21,352	0,038
34	21,328	21,352	0,024
35	21,397	21,438	0,041
36	21,42	21,707	0,287
37	22,152	22,160	0,008
38	22,162	22,160	-0,002
39	21,603	22,140	0,537
40	22,125	22,153	0,028
41	22,109	22,206	0,097
42	22,736	22,728	-0,008
43	24,658	24,278	-0,380
44	25,478	25,414	-0,064
45	25,919	25,910	-0,009
46	26,244	26,241	-0,003
47	27,106	27,037	-0,069
48	26,9	26,905	0,005
49	26,854	26,855	0,001
50	26,872	26,855	-0,017

Scénarios de référence

Pour cette étude, le groupe de travail a établi 11 scénarios ou événements de référence. La référence de chacun des scénarios est la station limnimétrique de Rouses point dans l'État de New York. Le scénario 1 correspond au seuil d'inondation reconnu pour le lac. Le scénario 7 correspond au maximum (mesure aux 15 minutes) de la crue de 2011 soit le 6 mai 2011. L'intervalle entre les scénarios a été choisi pour être significatif compte tenu du modèle de terrain. Comme on le voit dans le rapport sur le modèle du lac Champlain (Environnement Canada, 2015), les résultats du modèle de la rivière Richelieu montrent les débits associés aux 11 scénarios. Le Tableau 4 montre, pour chacun des 11 scénarios, les niveaux d'eau à Rouses Point dans les deux référentiels, en unités impériales et métriques, ainsi que le débit sortant du lac arrivant dans la rivière Richelieu selon le modèle du lac Champlain. Pour des raisons de simplification et pour faciliter l'interprétation des résultats, on n'a appliqué aucun débit supplémentaire le long de la rivière Richelieu.

Tableau 4 : Niveaux d'eau et débits définissant les scénarios

Scénario	H_NGVD29 (pi)	H_NAVD88 (pi)	H_NGVD29 (m)	H_NAVD88 (m)	Débit (m ³ /s)
1	100,000	99,570	30,480	30,349	937,488
2	101,000	100,570	30,785	30,654	1105,720
3	101,500	101,070	30,937	30,806	1194,500
4	102,000	101,570	31,090	30,959	1293,590
5	102,500	102,070	31,242	31,111	1392,830
6	103,000	102,570	31,394	31,263	1492,360
7	103,200	102,770	31,455	31,324	1538,960
8	103,500	103,070	31,547	31,416	1611,680
9	104,000	103,570	31,699	31,568	1709,950
10	105,000	104,570	32,004	31,873	1958,360
11	106,000	105,570	32,309	32,178	2204,440

Pour simuler les 11 événements de référence, on doit imposer une limite de niveau d'eau au barrage de Chambly. Pour ce faire on a établi une relation niveau-débit à cet endroit.

La relation théorique est donnée par l'équation suivante :

$$Q = cLH^{(3/2)}\sqrt{(2g)}$$

Où

- Q débit en m³/s
- c coefficient ayant une valeur entre 0,32 à 0,5
Un déversoir bien conçu a un coefficient voisin de 0.5

- L longueur du seuil
- g gravité (9,8065 m/s²)
- H profondeur au-dessus du seuil

On s'est servi des résultats de la campagne du 25 octobre 2011 où des niveaux d'eau mesurés près du barrage étaient de 19,029, 19,066 et 19,063 et le débit aux rapides de Fryers était de 590 m³/s.

Le sommet du seuil est à la cote 17,9832 m et la longueur du seuil (L) est de 245 m, ce qui donne un coefficient *c* de 0,48. Le Tableau 5 montre la relation ainsi obtenue pour le barrage de Chambly. À noter que dans le secteur du barrage de Chambly, le CGVD28 et le NAVD88 n'ont que quelques millimètres d'écart, de sorte que la relation est la même dans les deux cas.

Tableau 5 : Relation niveau-débit au barrage de Chambly

H (m)	Niveau (m)	Q (m ³ /s)	H (m)	Niveau (m)	Q (m ³ /s)	H (m)	Niveau (m)	Q (m ³ /s)
0	17,9832	0	0,9	18,8832	471,904	1,65	19,6332	1171,429
0,05	18,0332	6,17938	0,95	18,9332	511,7706	1,7	19,6832	1225,077
0,1	18,0832	17,47793	1	18,9832	552,7006	1,75	19,7332	1279,52
0,15	18,1332	32,109	1,04	19,0232	586,1921	1,8	19,7832	1334,746
0,2	18,1832	49,43504	1,05	19,0332	594,667	1,85	19,8332	1390,745
0,25	18,2332	69,08757	1,06	19,0432	603,1825	1,9	19,8832	1447,506
0,3	18,2832	90,81797	1,07	19,0532	611,7382	1,95	19,9332	1505,018
0,35	18,3332	114,4437	1,1	19,0832	637,645	2	19,9832	1563,273
0,4	18,3832	139,8234	1,15	19,1332	681,6111	2,01	19,9932	1575,013
0,45	18,4332	166,8433	1,2	19,1832	726,5438	2,02	20,0032	1586,781
0,5	18,4832	195,4092	1,25	19,2332	772,4225	2,05	20,0332	1622,261
0,55	18,5332	225,4415	1,3	19,2832	819,2283	2,1	20,0832	1681,972
0,6	18,5832	256,872	1,35	19,3332	866,9431	2,15	20,1332	1742,399
0,65	18,6332	289,6409	1,4	19,3832	915,5498	2,2	20,1832	1803,532
0,7	18,6832	323,6957	1,45	19,4332	965,0325	2,25	20,2332	1865,364
0,75	18,7332	358,9896	1,5	19,4832	1015,376	2,3	20,2832	1927,887
0,8	18,7832	395,4803	1,55	19,5332	1066,565	2,35	20,3332	1991,094
0,85	18,8332	433,13	1,6	19,5832	1118,587	2,4	20,3832	2054,976

À partir de ces données, nous avons établi une relation inverse pour déterminer les niveaux d'eau à imposer à la limite aval du modèle en fonction du débit des différents scénarios à modéliser (voir Figure 9).

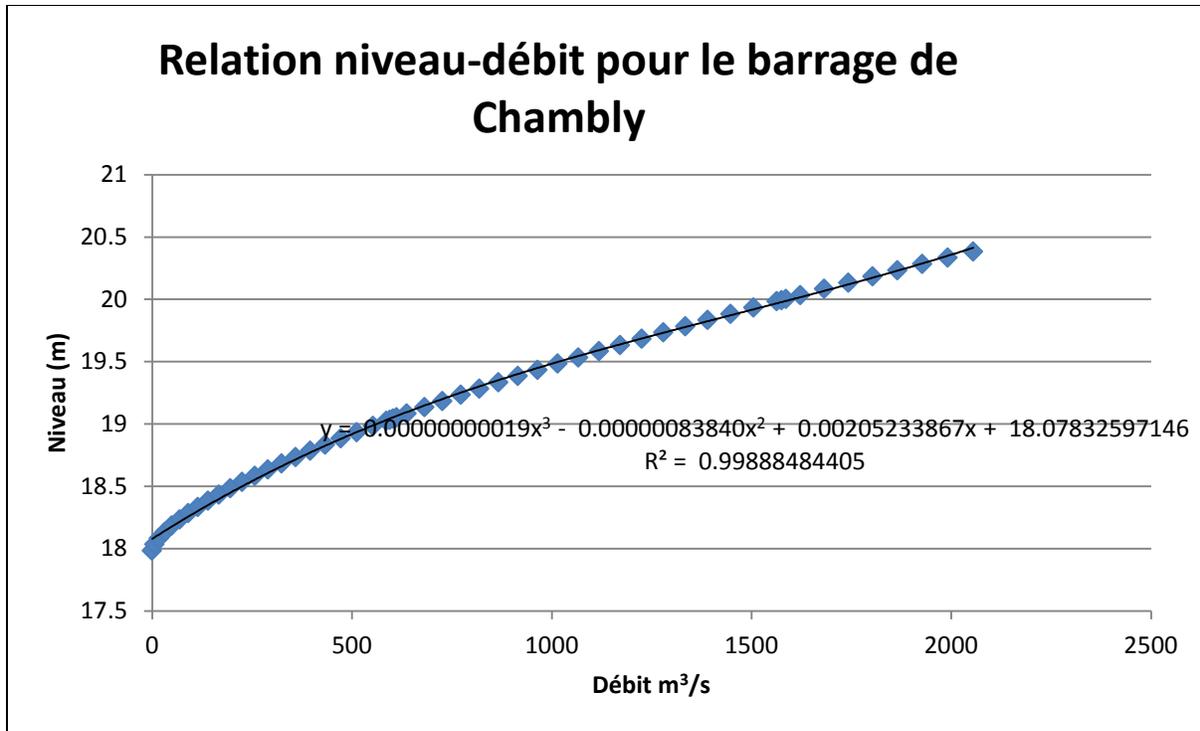


Figure 9 : Relation niveau-débit pour le barrage de Chambly

Tableau 6 : Débit sortant à la limite amont et niveaux utilisés à la limite aval du modèle pour les 11 scénarios.

Scénario	Q (m3/s)	Niveau (m)
1	937,488	19,42
2	1105,720	19,58
3	1194,500	19,66
4	1293,590	19,74
5	1392,830	19,82
6	1492,360	19,91
7	1538,960	19,94
8	1611,680	20,00
9	1709,950	20,09
10	1958,360	20,31
11	2204,440	20,56

Les simulations correspondant aux 11 événements de référence ont été effectuées et les résultats distribués aux membres du groupe de travail sous forme de shapefile.

4.2 Maillage aval (bassin de Chambly à Sorel)

Le maillage utilisé couvre la rivière Richelieu depuis le bassin de Chambly jusqu'à Sorel. Il comporte 222 240 nœuds et 107 822 éléments. La taille des éléments va de quelques mètres, près de certaines zones nécessitant un grand nombre de détails comme le barrage Saint-Ours, à 100 m au centre du bassin de Chambly où le nombre de détails requis est moindre. Mais de façon générale on a utilisé une taille de maille de 20 à 25 m. La Figure 10 (Barrage de Saint-Ours et maillage correspondant) montre le détail du maillage pour le barrage Saint-Ours.



Figure 10 : Barrage de Saint-Ours et maillage correspondant

Étalonnage

Plusieurs jeux de données étaient disponibles pour étalonner le tronçon Chambly-Sorel. Malgré tous nos efforts, les niveaux simulés étaient toujours plus hauts que les niveaux mesurés, quel que soit le jeu de données d'étalonnage utilisé. Même avec un coefficient de Manning extrêmement bas de 0,014, les niveaux simulés étaient encore significativement trop hauts.

La bathymétrie pour ce tronçon provient SHC et offre une bonne couverture. Nous avons aussi eu accès à des mesures de courantomètre ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) qu'EC avait effectuées en octobre 2011. Connaissant le niveau d'eau et à partir de ces mesures, nous avons pu extraire des transects bathymétriques et les comparer avec les données provenant du SHC. Les transects bathymétriques extraits des données ADCP semblaient significativement plus profonds que les données du SHC.

À la suite de cela, les techniciens d'EC sont allés faire des relevés bathymétriques les jeudi 23 et vendredi 24 juillet 2015. Ils ont fait un trajet longitudinal de 10 km en remontant la rivière à partir de Sorel tout en effectuant également des transects transversaux tous les 500 m. Ils ont aussi fait un transect longitudinal de 5 km à partir du barrage de St-Ours vers l'aval en allant vers Sorel tout en faisant également des transects au 500 m.

Lorsque nous avons comparé tous les points mesurés par EC avec ceux du SHC, nous avons constaté un écart moyen d'environ 50 cm, les points mesurés par EC étant plus bas que ceux du SHC. Les différences ne sont pas constantes dans l'espace et peuvent être plus importantes par endroits. Les figures qui suivent montrent les écarts observés entre la bathymétrie du SHC et celle d'EC pour les transects longitudinaux et pour deux transects transversaux.

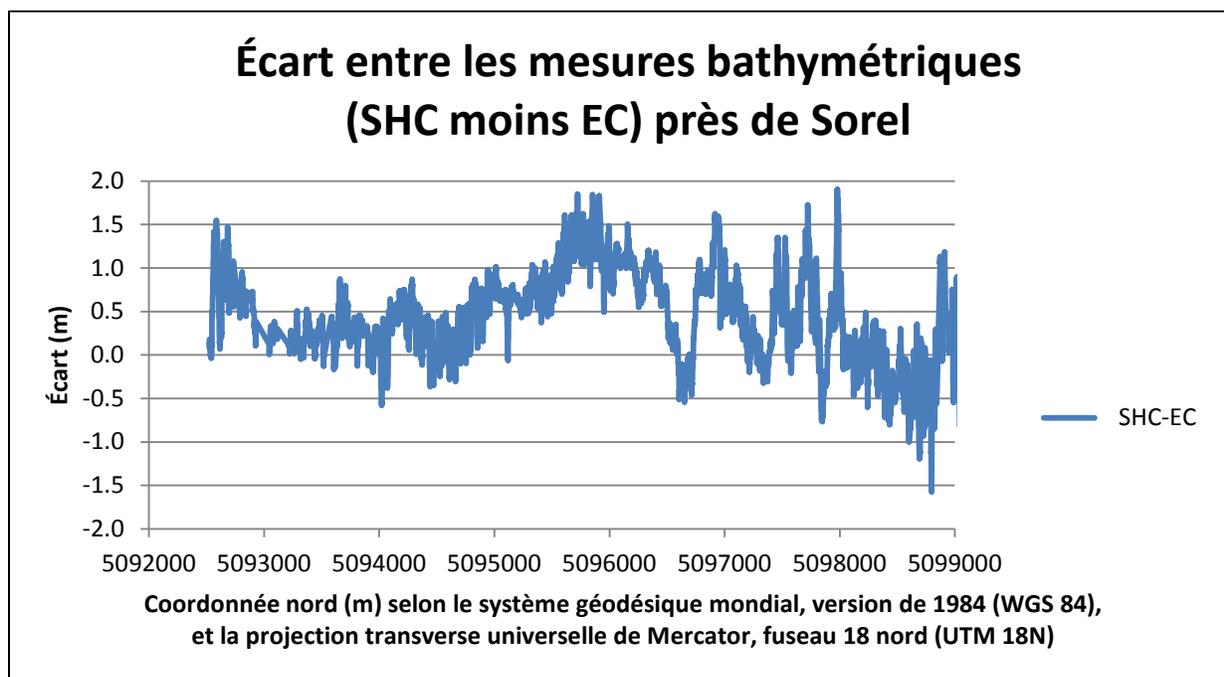


Figure 11 : Écart entre la bathymétrie du SHC et celle d'EC, transect longitudinal en amont à partir de Sorel

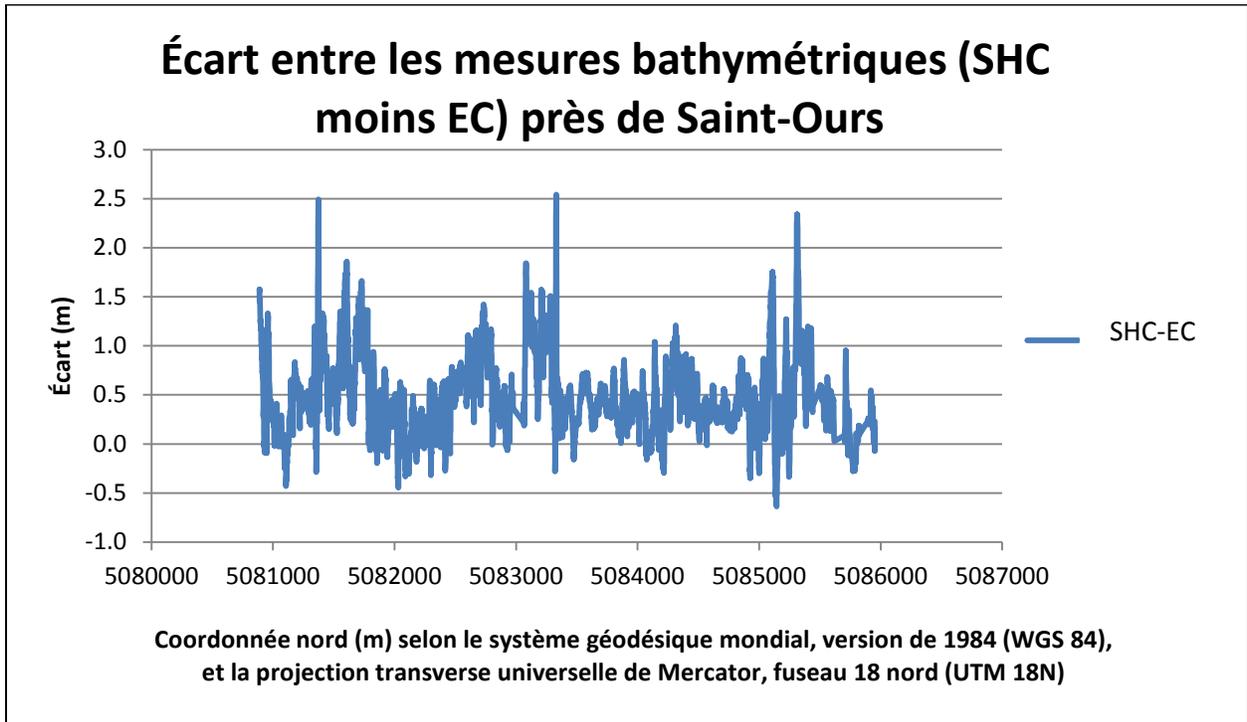


Figure 12 : Écart entre la bathymétrie du SHC et celle d'EC, transect longitudinal de St-Ours à Sorel, Québec

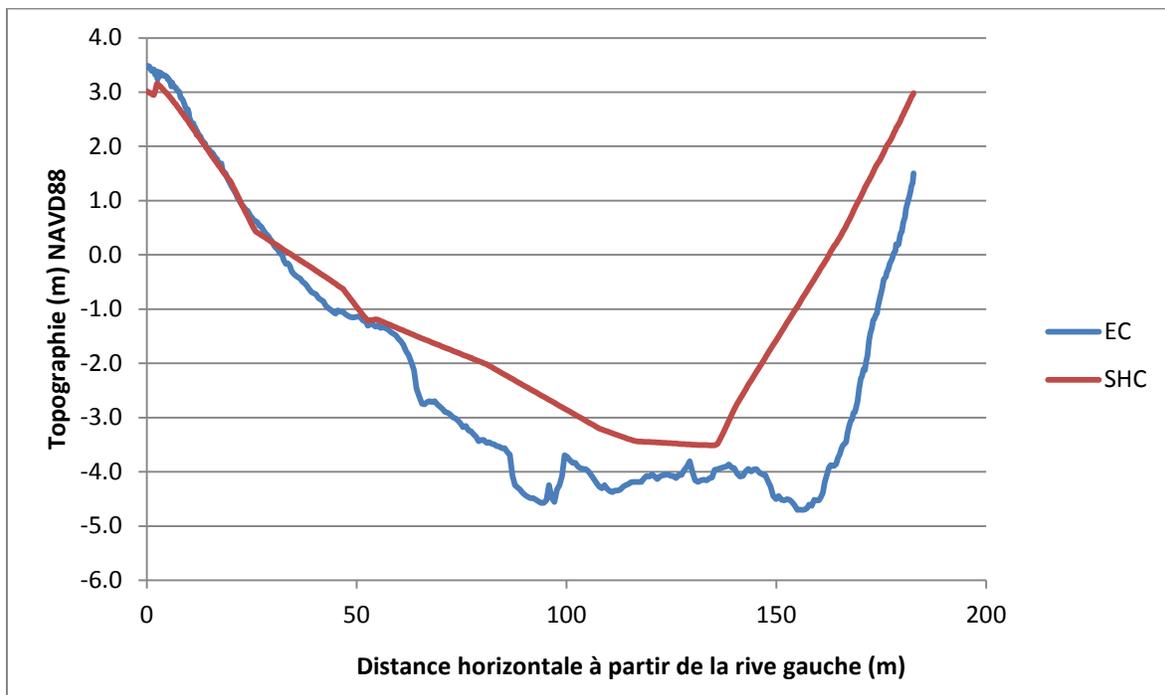


Figure 13 : Bathymétrie du SHC et celle d'EC, transect transversal A

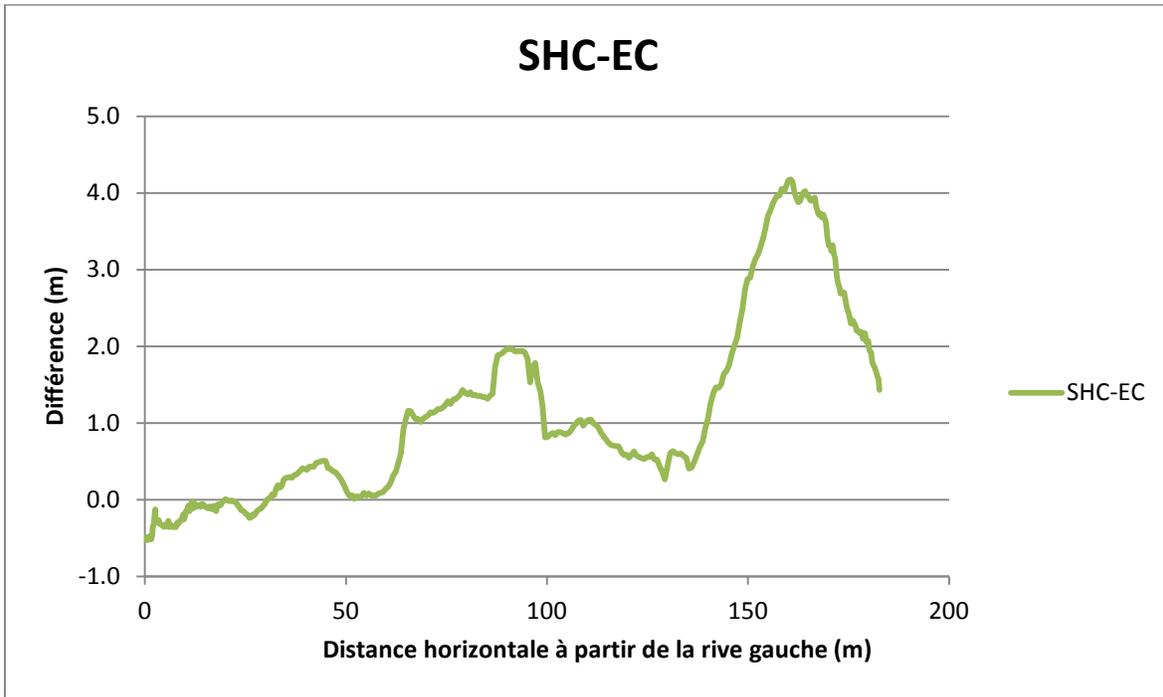


Figure 14 : Écart entre la bathymétrie du SHC et celle d'EC, transect transversal A

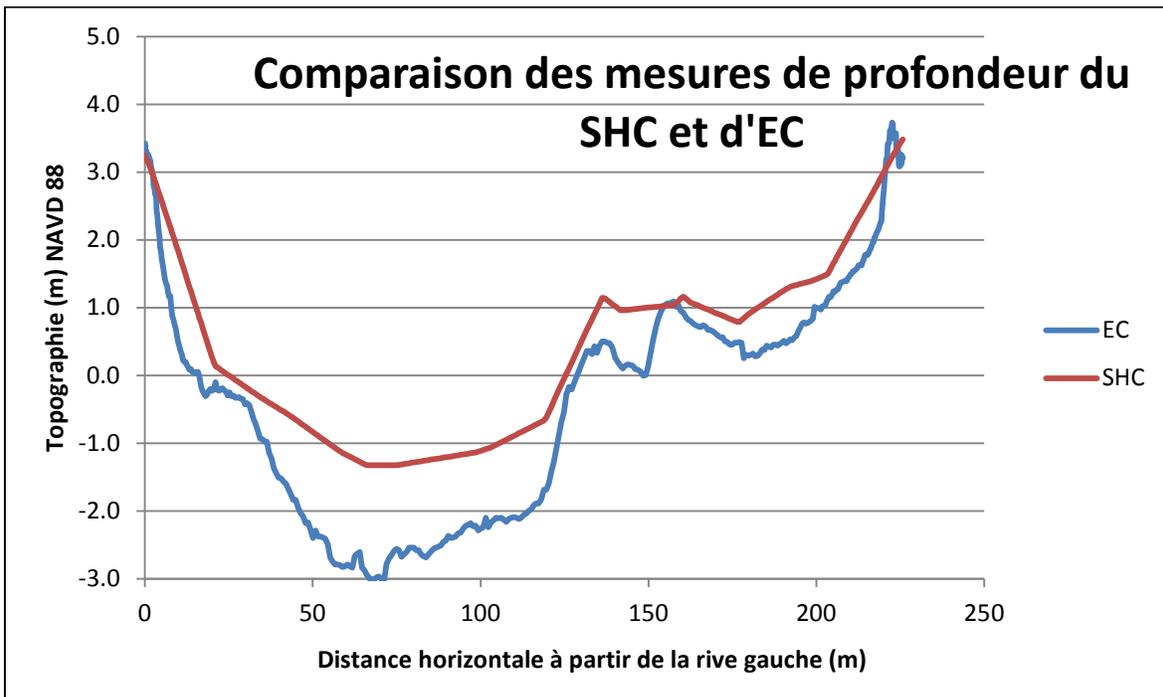


Figure 15 : Bathymétrie du SHC et celle d'EC, transect transversal B

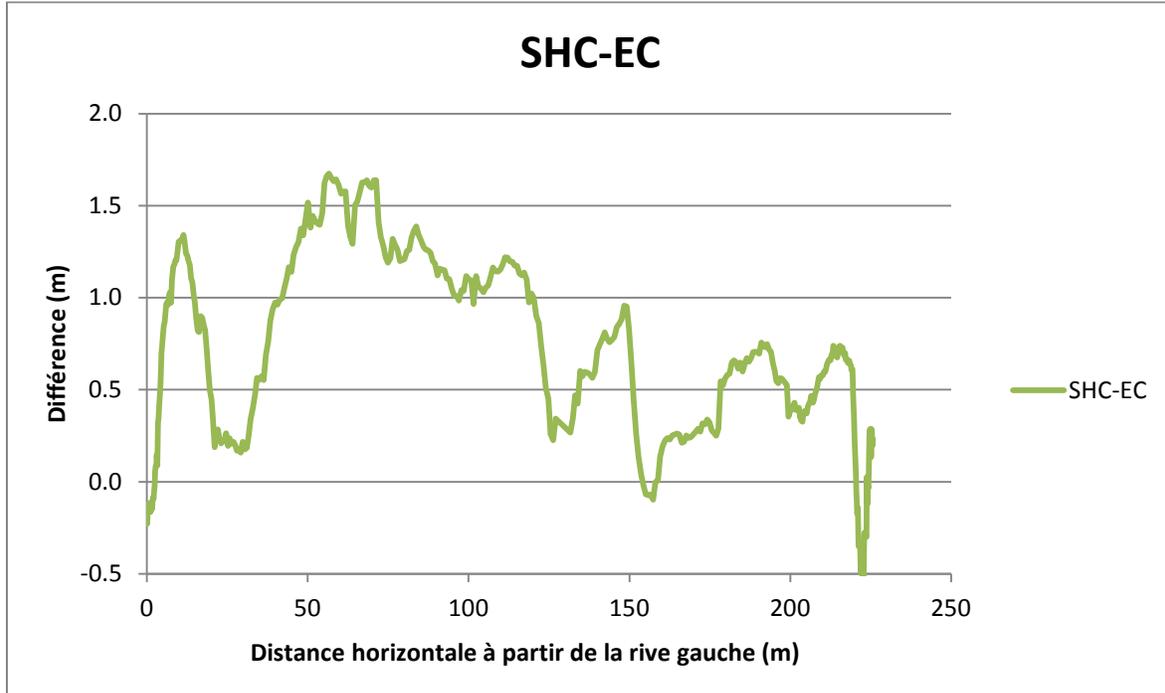


Figure 16 : Écart entre la bathymétrie du SHC et celle d'EC, transect transversal B

La correction des données bathymétriques à partir des nouvelles mesures aurait nécessité un travail énorme, et il aurait fallu les réinventer totalement. De plus l'information nécessaire à cette correction n'existe que pour environ 15 des quelque 70 km de ce tronçon de rivière.

Compte tenu des problèmes liés aux données bathymétriques, il est impossible de produire des simulations valables pour le tronçon Chambly-Sorel. Pour modéliser ce tronçon, on devra créer un nouveau jeu de données bathymétriques fiable.

Conclusion

Les objectifs de la tâche 2.3 ont été partiellement atteints. On a recueilli des données altimétriques et bathymétriques pour construire un MNE de la rivière Richelieu et de ses rives. Là où il existait de l'information sur les structures telles que les ponts et les barrages qui ont un effet sur l'hydrodynamique, on a compilé les données pertinentes et on les a incluses dans le maillage du modèle hydrodynamique. Une base de données de tous les apports d'eau nécessaires au fonctionnement du modèle hydrodynamique a été créée. Les limites et les points d'entrée du modèle ont été identifiés.

Il s'est avéré très ardu d'obtenir une solution convergée incluant le barrage de Chambly dans un modèle hydrodynamique de toute la rivière, de Saint-Jean-sur-Richelieu à Sorel. Pour exclure ce barrage qui était la source de problèmes de convergence, Environnement Canada a décidé de diviser cette partie en deux tronçons, l'un commençant en amont du seuil de Saint-Jean-sur-Richelieu vers l'aval jusqu'au barrage de Chambly, et l'autre allant du bassin de Chambly à Sorel.

Un maillage hydrodynamique a été créé et étalonné pour le tronçon Saint-Jean-sur-Richelieu-Chambly. Les 11 scénarios établis par le groupe de travail ont été simulés pour ce tronçon et les résultats communiqués aux membres du groupe de travail.

Un maillage hydrodynamique a également été créé pour le tronçon Chambly-Sorel mais les tentatives d'étalonnage des données ont révélé des problèmes majeurs liés aux mesures bathymétriques utilisées, et ces problèmes ont empêché la modélisation de ce tronçon. Les 11 scénarios ou événements de référence établis par le groupe de travail n'ont pas été simulés. Le travail n'a donc pas été complété pour ce tronçon et ne pourra pas l'être sans une nouvelle bathymétrie.

Lorsqu'on aura résolu les problèmes bathymétriques du tronçon Chambly-Sorel, et avant qu'on puisse envisager l'utilisation opérationnelle d'un modèle de la rivière Richelieu entre Saint-Jean-sur-Richelieu et Sorel, on devra effectuer un réétalonnage en prenant en compte les effets du vent et les conditions de débit élevé et faible dans un mode dynamique de simulation transitoire (dynamique, c'est-à-dire sans débit stable). Une évaluation du rendement doit être effectuée pour chacun des essais d'étalonnage ou de validation, à partir de la série temporelle de valeurs de simulation du modèle et des limnimètres disponibles pour les périodes d'étalonnage et de validation.

EC recommande de se doter d'une nouvelle bathymétrie afin de modéliser le tronçon Chambly-Sorel.

Références

Environnement Canada, 2015. Création d'un modèle hydrodynamique expérimental 2D du lac Champlain en utilisant les données bathymétriques existantes (tâche 1-2). Rapport pour le Groupe de travail technique international du lac Champlain et de la rivière Richelieu , 43 p.