

Création d'un système binational de prévision des crues et de cartographie en temps réel des plaines inondables pour une mise en œuvre opérationnelle

Étude internationale du lac Champlain et de la rivière Richelieu

RAPPORT À LA COMMISSION MIXTE INTERNATIONALE

Déposé par le

Jesse Feyen, Ph.D.

Dominic Roussel, ing., M.Sc.

William Saunders

Vincent Fortin, Ph. D.

Groupe de Travail Technique sur l'hydrologie, l'hydraulique
et la Cartographie (GTT-HHC)

Juin 2022

Version anglaise rédigée par :

Jesse Feyen, Ph.D.
Dominic Roussel, ing., M.Sc.
William Saunders
Vincent Fortin, Ph. D.

Traduction par



Revue par
Dominic Roussel, Ph. D.

REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent remercier le Groupe de travail technique sur les mesures de gestion et d'atténuation des inondations (MGAI) pour son aide précieuse dans l'élaboration de ce rapport. Nous remercions Syed Moin, Bill Werick et Ted Yuzik de leurs contributions.

COMMISSION INTERNATIONALE D'ÉTUDE DU LAC CHAMPLAIN-RICHELEU

Coprésident, Canada

Jean-François Cantin

Coprésidente, États-Unis

Deborah H. Lee

Membres, Canada

Michel Jean

Daniel Leblanc

Madeleine Papineau

Richard Turcotte

Membres, États-Unis

Eric Day

Ann Ruzow Holland

Pete LaFlamme

Kristine Stepenuck

Cogestionnaire de l'étude, Canada

Serge Villeneuve

Cogestionnaire de l'étude, États-Unis

Mae Kate Campbell

Le présent rapport a été produit par le Groupe de travail technique sur l'hydrologie, l'hydraulique et la cartographie (HHC) du Groupe d'étude international du lac Champlain et de la rivière Richelieu.

GROUPES DE TRAVAIL TECHNIQUES

HHC, Canada

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

HHC, États-Unis

Jesse Feyen
Bill Saunders
Chris Gazoorian
Tim Calappi
Blaine Hastings



RÉSUMÉ

Le présent rapport décrit le système de prévision des crues (SPC) recommandé pour le bassin du lac Champlain et de la rivière Richelieu (bassin LCRR) en fonction des services de prévision, des besoins des usagers et des produits existants, des systèmes d'alerte, ainsi que des nouveaux outils et modèles fournis par le Groupe d'étude international du lac Champlain et de la rivière Richelieu. Le présent rapport porte sur l'objectif 5.6 du plan d'étude.

OBJECTIF DE L'ÉTUDE

Il n'existe pas un système unique et binational de prévision officielle des crues pour l'ensemble du bassin LCRR. Ce sont plutôt un organisme national du côté américain, soit la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), et un organisme provincial du côté canadien, soit le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements climatiques (MELCC), qui sont responsables d'émettre des prévisions officielles pour leurs territoires respectifs et de produire des prévisions binationales cohérentes pour le bassin LCRR à hauteur de la frontière internationale. Cela continuera d'être le cas avec le système de prévision des crues recommandé. Les diverses composantes de ce système, à savoir les modèles employés, seront déployées au sein d'Environnement et Changement climatique Canada (ECCC), de la NOAA et du MELCC, les deux derniers organismes étant responsables d'émettre les prévisions de crue officielles (ECCC travaille en partenariat avec le MELCC à la modélisation hydrologique). À la faveur d'une analyse des modèles existants de prévision des crues, le Groupe d'étude a conclu à l'existence de nombreuses lacunes dans la capacité des actuels systèmes de modélisation utilisés des deux côtés de la frontière, lacunes qui entachent l'exactitude des prévisions mises à la disposition des prévisionnistes gouvernementaux.

APPROCHE

Selon une évaluation des besoins des usagers, les produits de prévision souhaités devraient non seulement reprendre les données et les graphiques actuels, mais également comprendre des cartes de zones inondables à court terme assorties de probabilités d'occurrence ou de dépassement, ainsi que des graphiques probabilistes à long terme du niveau et du débit d'eau permettant d'évaluer le risque de crue. Le SPC recommandé reprendrait donc les systèmes de prévision existants, ainsi que des modèles nouveaux ou améliorés à la faveur de l'étude du bassin LCRR en mesure de saisir les processus pertinents aux prévisions pour le bassin LCRR, comme l'accumulation de neige et la fonte des neiges, les apports dans le lac Champlain, l'écoulement dans la rivière Richelieu, et les effets du vent et des vagues. Ces modèles et l'utilisation des prévisions d'ensemble permettront également d'évaluer l'incertitude et de cartographier la prévision des crues. Si les systèmes de prévision recommandés dans l'étude sont adoptés pour être utilisés par les organismes officiels de prévision des gouvernements, les modèles et systèmes améliorés devront être transférés à ces organismes qui devront les accepter et les mettre en œuvre.

L'analyse des écarts entre ce qui est en place et le système recommandé a permis de constater que les améliorations qui devaient être apportées à la modélisation sont prêtes, mais qu'il reste encore du travail à faire consistant à établir les liens nécessaires et à obtenir des données d'entrant qui soient utiles avant de passer à la mise en œuvre. Ce processus est en bonne voie et il n'existe aucun obstacle technique majeur. Certaines recherches sont encore nécessaires pour parvenir à une méthodologie d'intégration appropriée dans le cas des prévisions multiples, mais d'ici-là, les prévisionnistes seront en mesure de faire cette intégration manuellement. Bien qu'il n'existe pas d'obstacles techniques majeurs, il convient de souligner que les divers organismes concernés (NOAA, ECCC et MELCC) évoluent dans des contextes institutionnels différents et qu'ils ne seront pas en mesure de tous avancer au même rythme sur la voie de la mise en œuvre de toutes les recommandations. Comme des services de prévision coordonnés sont déjà fournis, il n'est pas nécessaire, à ce niveau-ci, de recommander une date butoir commune pour la réalisation des mises à niveau de la modélisation et des prévisions. Cependant, les organismes de prévision respectifs devraient opérationnaliser les mises à niveau recommandées de la modélisation dès que possible.

Le modèle de gouvernance actuel consiste à faire correspondre les conditions prévues pour la rivière Richelieu des deux côtés de la frontière internationale, ce qui conviendra également pour le système recommandé. Rien, sur le plan technique, ne justifie d'adopter des structures plus formelles, car aucune limite n'a été

attribuée à la structure actuelle. Les divers organismes (ECCC, MELCC et NOAA) n'ont qu'à maintenir leur collaboration actuelle et à se transmettre mutuellement les données nécessaires pour maintenir l'actualité des prévisions relatives à l'écoulement de l'eau du lac Champlain vers la rivière Richelieu. Si une mesure d'atténuation structurelle est appliquée (comme l'excavation selective du haut-fond avec construction d'un seuil submergé (aussi appelé réversoir) et aménagement d'une modeste dérivation par le u canal de Chambly), le SPC devra être accompagné de commentaires sur les règles de gestion nécessaires et tenir compte de l'effet de toute mesure d'atténuation sur les niveaux d'eau. Les prévisions devront par ailleurs être facilement accessibles au gestionnaire de la dérivation.

RÉSULTAT

L'étude du bassin LCRR de la CMI a permis de mettre au point des outils améliorés qui sont maintenant disponibles pour mener à terme le déploiement du système de prévision des crues recommandé. Il reste encore du travail à faire pour faire passer ces outils de prévision améliorés au niveau opérationnel, mais ce travail pourra être réalisé par les divers organismes sans que de grands projets de développement soient nécessaires. La figure 1 présente une illustration simplifiée du SPC recommandé.

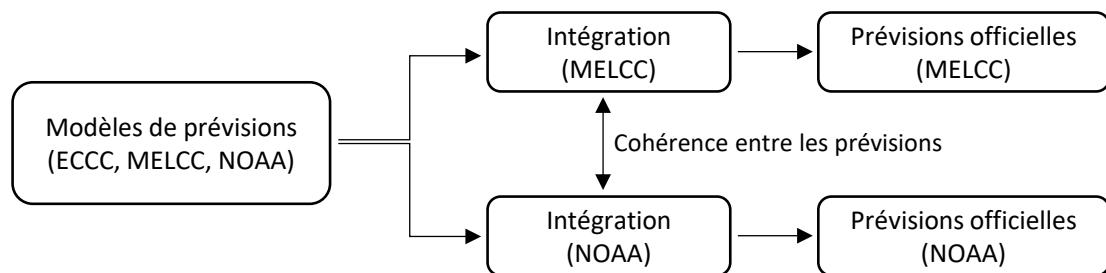


Figure 1. Vue simplifiée du SPC recommandé.

LA COMMISSION MIXTE INTERNATIONALE

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



RESTEZ CONNECTÉS ET MOBILISÉS

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

Envoyez un courriel à lcrr@ijc.org

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

Suivez l'Étude sur les médias sociaux

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

 www.facebook.com/commissionmixteinternationale/

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



TABLE DES MATIÈRES

Remerciements	i
Résumé	iv
Restez connectés et mobilisés	viii
1 INTRODUCTION AU RAPPORT	1
2 CADRE INSTITUTIONNEL ET EXIGENCES	4
2.1 PRÉVISION DES CRUES AUX ÉTATS-UNIS	4
2.2 PRÉVISION DES CRUES AU QUÉBEC (CANADA)	4
2.3 COLLABORATION BINATIONALE EN MATIÈRE DE PRÉVISION DES CRUES DANS LE BASSIN LCRR	6
3 PRÉVISION DES CRUES ET EXIGENCES RELATIVES AU SYSTÈME DE CARTOGRAPHIE DANS LE CAS DU RÉSEAU DU LAC CHAMPLAIN ET DE LA RIVIÈRE RICHELIEU	7
3.1 BESOINS DES INTERVENANTS D'URGENCE EN CAS D'INONDATION	7
3.2 APERÇU DU SPC RECOMMANDÉ	8
3.3 PRÉVISION MÉTÉOROLOGIQUE NUMÉRIQUE	9
3.4 MODÉLISATION HYDROLOGIQUE	10
3.5 MODÉLISATION HYDRODYNAMIQUE	11
3.6 ASSIMILATION ET POST-TRAITEMENT DES DONNÉES	12
3.7 ANALYSE DE L'INCERTITUDE	14
3.8 OUTILS DE CARTOGRAPHIE	15
3.9 DIFFUSION DES PRODUITS	16

4 AMÉLIORATIONS DISPONIBLES, ANALYSE DES ÉCARTS ET FEUILLES DE ROUTE 18

4.1	SERVICES COURANTS	18
4.2	OUTILS ET MODÈLES DISPONIBLES	18
4.2.1	Prévisions numériques du temps à ECCC	18
4.2.2	Prévisions météorologiques numériques à la NOAA	20
4.2.3	Modèle hydrologique HYDROTEL du MELCC	20
4.2.4	Modèle hydrologique d'ECCC : Système national de prévision de surface et de rivières (SNPSR)	20
4.2.5	Modèle hydrologique distribué en usage aux États-Unis : WRF-Hydro	21
4.2.6	Composante du niveau d'eau d'ECCC : Modèle de bilan hydrologique (MBH)	23
4.2.7	Composante du niveau d'eau d'ECCC : H2D2	23
4.2.8	Modèle hydrodynamique du lac Champlain aux États-Unis : FVCOM	23
4.2.9	Modèle des vagues du lac Champlain aux États-Unis : WAVEWATCH III	24
4.2.10	Modèle de l'ETS	24
4.2.11	Outils de cartographie Info-Crue et communication de l'information au MELCC	25
4.2.12	Outils de cartographie et diffusion de l'information à la NOAA	26
4.3	ANALYSE DES ÉCARTS ET MESURES NÉCESSAIRES	28
4.3.1	Obstacles de nature technique	28
4.3.2	Obstacles de nature institutionnelle	28

5 GOUVERNANCE DU SYSTÈME DE PRÉVISION DES CRUES DANS LE BASSIN LCRR 34

5.1	GOUVERNANCE NATIONALE DES PRÉVISIONS POUR LE LAC CHAMPLAIN ET LA RIVIÈRE RICHELIEU	35
5.2	CONSIDÉRATIONS ET OPTIONS EN MATIÈRE DE GOUVERNANCE INTERNATIONALE	35
5.2.1	Option 1 : Modèle de gouvernance axée sur la communication informelle de la prévision des crues	35
5.2.2	Option 2 : Modèle de gouvernance coordonnée en matière de prévision des crues	35
5.2.3	Option 3 : Modèle de gouvernance conjointe en matière prévision des crues	36
5.3	LA PRÉVISION DES CRUES À L'APPUI DES STRUCTURES DE RÉGULARISATION DU DÉBIT	36

6 CONSTATATIONS ET RECOMMANDATIONS 38

- ANNEXE A - Évaluation des besoins des intervenants d'urgence en cas d'inondation**
- ANNEXE B - Configuration des modèles de prévision météorologique et indicateurs de performance à ECCC**
- ANNEXE C - Configuration du modèle de prévisions météorologiques de la NOAA**
- ANNEXE D - Détails techniques du modèle SNPSR**
- ANNEXE E - Équations détaillées et fonctionnement du modèle de bilan hydrologique**
- ANNEXE F - Services de prévision et indicateurs de performance au Canada**
- ANNEXE G - Services de prévision et indicateurs de performance aux États-Unis**

Liste des Figures

Figure 1. Vue simplifiée du SPC recommandé.	v
Figure 2. Contexte institutionnel américain.	5
Figure 3. Contexte institutionnel canadien.	5
Figure 4. Système binational de prévision des crues recommandé.	8
Figure 5. Intégration des données et des résultats du modèle pour produire des prévisions officielles.	13
Figure 6. Exemple d'incertitude des prévisions pour la probabilité de niveau de la rivière à 10 jours (anglais seulement).	15
Figure 7. Outils et modèles possibles à inclure dans le système de prévision des crues recommandé pour le bassin LCRR	19
Figure 8. Mise en œuvre de la version globale d'HYDROTEL dans le sud du Québec.	20
Figure 9. Configuration du modèle hydrographique national (Office of Water Prediction de la NOAA; consulté pour la version anglaise le 20 octobre 2019).	22
Figure 10. Comparaison des différents modèles de surcote due au vent	25
Figure 11. Exemple de produit Info-Crue pour la rivière Jacques-Cartier (Québec) (anglais seulement).	26
Figure 12. Carte statique des inondations de l'AHPS du NWS pour la rivière Winooski à Waterbury (Vermont) (anglais seulement).	27

Annexe A

Figure A-1. Exercice virtuel sur les inondations avec des intervenants d'urgence au Québec (les valeurs « S » indiquaient à l'usager le bon numéro de carte.).

Annexe B

Figure B-1. Préavis de ruissellement de surface extrême publié le 11 avril pour la semaine du 18 au 25 avril 2019.

Figure B-2. Erreur quadratique moyenne (EQM) des prévisions de température au niveau 850 hPa pour la période d'octobre 2018 à septembre 2019, pour l'Amérique du Nord, exprimée en fonction de l'horizon de prévision.

Rouge : Système global de prévision déterministe (SPDG) du Canada; Magenta : Global Forecast System (GFS) des É.-U.

Figure B-3. Erreur quadratique moyenne (EQM) des prévisions de vitesse du vent au niveau 850 hPa pour la période d'octobre 2018 à septembre 2019, pour l'Amérique du Nord, exprimée en fonction de l'horizon de prévision.

Rouge : Système global de prévision déterministe (SPDG), Magenta : Global Forecast System (GFS) des É.-U.

Figure B-4 . Indice de menace (IM) des prévisions de précipitations pour la période de mars 2019 à mai 2019 pour l'Amérique du Nord, exprimé en fonction de l'horizon de prévision. Rouge : Système régional de prévision déterministe (SRPD) en vigueur au Canada; bleu : Système global de prévision déterministe (SGPD) en vigueur au Canada.

Figure B-5 . Indice Brier (IB) établi pour des prévisions de précipitations de 15 mm/24 h ayant porté sur la période d'avril 2019 à juin 2019, à l'échelle planétaire, et exprimées en fonction de l'horizon de prévision.

Rouge : Performance du système de prévision SPENA mis en œuvre en juillet 2019; bleu : Performance de l'ancienne version du système SPENA

Annexe D

Figure D-1 . Schéma du Système national de prévision de surface et de rivières (SNPSR) dans sa version déterministe (opérationnelle) et dans sa version d'ensemble (expérimentale). La composante de prévision hydrodynamique d'ensemble (pointillés) est en cours d'élaboration.

Figure D-2. Prévisions de débit du SNPSR en date du 1er octobre 2019 à 00 h UTC pour le 7 octobre 2019 à 00 h UTC.

Figure D-3. Exemple de prévision de débit du SNPSR en date des 1er et 7 octobre 2019 à 00 h UTC pour deux affluents du bassin LCRR.

Figure D-4. Exemple de prévision des débits du SNPSR à 24 heures, pour à Saint-Jean-sur-Richelieu, à l'automne 2019.

Annexe F

Figure F-1. Emplacements dans le bassin LCRR pour lesquels le MELCC produit des prévisions.

Figure F-2. Prévisions des débits et des niveaux du MELCC pour le cours supérieur de la rivière Richelieu.

Figure F-3. Plateforme Vigilance du MSP accessible au public.

Figure F-4. Prévisions d'épisodes de crue (5 événements) en 2019.

Annexe G

Figure G-1. Points de prévision du NERFC (en noir) et bassins hydrologiques.

Figure G-2. Points de prévision actuels (jaunes) du bassin LCRR et leurs aires de drainage respectives.

Figure G-3. Indication de prévision du modèle hydrologique du NERFC pour Rouses Point (en haut) et pour Saint-Jean-sur-Richelieu (en bas).

Figure G-4. Prévisions typiques de l'IVP comparativement au graphique des observations pour des prévisions à 72 heures à l'un des emplacements riverains du NERFC.

Figure G-5. Graphique des prévisions et des observations pour les prévisions sur 72 heures au lac Champlain à Rouses Point (ROUN6).

Figure G-6. Statistiques simples de la performance dans le cas du lac Champlain à Rouses Point (ROUN6), ventilées par horizon de prévision.

Figure G-7. Carte sites de prévisions jaugées AHPS du NERFC pour la région du lac Champlain.

Figure G-8. Précipitations observées sur 24 heures par le NERFC.

Figure G-9. Précipitations prévues dans les 72 heures du NERFC.

Figure G-10. Flood Outlook Product du NERFC (exemple).

Figure G-11. Indication de crue éclair dans l'heure du NERFC.

Figure G-12. Analyse hydrométéorologique graphique du NERFC.

Figure G-13. Cartes journalières des chutes et des accumulations de neige du NERFC.

Figure G-14. Graphique des probabilités de dépassement hebdomadaire du NERFC.

Figure G-15. Graphique du NERFC des probabilités hebdomadaires de dépassement des niveaux.

Figure G-16. Graphique quotidien des probabilités de niveau des cours d'eau à 10 jours (NERFC).

Figure G-17. Sommaire des prévisions quotidiennes pour la rivière et le lac émanant du WFO de Burlington.

Figure G-18. Avertissement de débordement du lac Champlain émis par le WFO de Burlington.

Figure G-19. Avertissement de crue (suivi de l'avertissement initial d'inondation) du WFO de Burlington.

Figure G-20. Site AHPS pour Rouse's Point.

Liste des Tableaux

Tableau 1. Analyse des écarts par rapport aux exigences du SPC. 30

Annexe B

Tableau B-1. Configuration des systèmes opérationnels de prévisions météorologiques, fluviales et de surface en fonction du modèle GEM pour le bassin LCRR.

Annexe F

Tableau F-1. Données prévisionnelles pour l'emplacement 030401_000, à Carignan (2019-2020).

Tableau F-2. Données prévisionnelles pour l'emplacement 030401_000, à Carignan (5 événements les plus importants en 2019).

Annexe G

Tableau G-1. Erreur moyenne mensuelle et erreur absolue moyenne pour les prévisions du bassin du lac Champlain (avril 2019).

Tableau G-2. Erreur moyenne et erreur absolue moyenne pour les prévisions du lac Champlain qui comprennent un dépassement du seuil d'inondation (avril 2019).

Tableau G-3 - Taux de probabilités de détection et rapports de fausses alarmes dans la région du Nord-Est en avril 2019.

Tableau G-4. Comparaison des statistiques d'Essex Junction (Vermont) et de Rouses Point (New York) (du 8/1/2011 au 31/10/2019).

Tableau G-5 . Statistiques simples de la performance dans le cas du lac Champlain à Rouses Point (ROUN6), ventilées par horizon de prévision.

Liste des acronymes

CMI	Commission mixte internationale
COG	Centre des opérations gouvernementales (au sein du MSP)
ECCC	Environnement et Changement climatique Canada
EEN	Équivalent en eau de la neige
GTT-HHC	Groupe de travail technique sur l'hydrologie, l'hydraulique et la cartographie
GTT-MGAI	Groupe de travail technique sur les mesures de gestion et d'atténuation des inondations
INRS-ETE	Institut Nationale de la Recherche Scientifique – Centre Eau, Terre et Environnement
LCRR	Lac Champlain et rivière Richelieu
MELCC	Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements climatiques
MSP	Ministère de la Sécurité Publique
MSP-DR	Directions régionales du MSP
NERFC	Northeast River Forecast Center (fait partie de la NOAA)
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NWS	National Weather Service (fait partie de la NOAA)
OAR	Office of Oceanic and Atmospheric Research (fait partie de la NOAA)
ORSC	Organisation régionale de la sécurité civile
OSCQ	Organisation de la Sécurité Civile du Québec
OWP	Office of Water Prediction (fait partie de la NOAA)
RFC	River Forecast Centers
SAPH	Advanced Hydrologic Prediction System
SNPESR	Système national de prévision des eaux de surface et des rivières (ECCC)
SPC	Système de prévision des crues
WFO	Weather Forecast Offices (Bureaux des prévisions météorologiques) (fait partie de la NOAA)

1 INTRODUCTION AU RAPPORT

Le présent rapport énonce une série de recommandations qui concernent la prévision binationale des crues dans le bassin versant du lac Champlain et de la rivière Richelieu (bassin LCRR) en fonction des besoins prévisionnels et des exigences opérationnelles¹.

Les prévisions opérationnelles des crues sont effectuées par des organismes officiellement désignés aux États-Unis et au Canada à partir de diverses sources de données, notamment d'observations et d'une vaste gamme de modèles de prévisions environnementales spécialisés (comme les modèles météorologiques, hydrologiques, hydrauliques et autres modèles semblables). Ces prévisions quotidiennes, de nature anthropogène, sont élaborées par des prévisionnistes spécialisés hautement qualifiés qui s'appuient sur des technologies de l'information robustes et éprouvées permettant d'obtenir différents produits et services et de répondre aux besoins des usagers, tant dans des situations d'urgence qu'au quotidien. Les prévisions sont fournies par des organismes gouvernementaux officiels qui ont été mandatés pour fournir ces services publics aux contribuables qui les financent. Il s'en suit que les prévisions américaines sont fournies du côté américain de la frontière, tandis que les prévisions canadiennes couvrent le côté canadien.

L'expression « système de prévision des crues » (SPC) est assez générale et elle recouvre tout un éventail de technologies et d'activités intervenant dans l'établissement des prévisions. On pourrait dire, pour simplifier, qu'un SPC fournit régulièrement des prévisions qui décrivent les conditions de crue (plus précisément le niveau d'eau et la profondeur et l'étendue des inondations qui en résultent). Cela peut aller de simples

prévisions des niveaux d'eau à court terme en des endroits précis à des produits plus complexes, comme une carte de la profondeur d'eau avec probabilité d'occurrence (par exemple, 75 % de chance de non-dépassement). Il est ensuite possible de corrélérer ces prévisions avec les impacts des inondations, comme le nombre de bâtiments inondés, les installations essentielles touchées, les pertes prévues et tout autre problème semblable. Toutefois, comme la détermination de ces impacts dépasse généralement la portée des prévisions elles-mêmes, elles sont exclues de l'analyse présentée ici. Pour fournir ces produits, un SPC doit continuellement effectuer des simulations de divers modèles (principalement hydrologiques et hydrodynamiques) afin de convertir les prévisions et les conditions météorologiques du bassin versant en indications de prévision de crue. Les prévisionnistes de crues évaluent les résultats et s'appuient sur le SPC pour produire une prévision officielle pouvant ensuite être diffusée aux usagers.

Les prévisionnistes s'appuient habituellement sur des indications provenant de multiples sources pour produire leurs prévisions². L'expression « indication de prévision » renvoie généralement à toute information produite par ordinateur aidant à la préparation d'une prévision, comme les modèles de prévisions numériques. Il n'est pas rare que les prévisionnistes aient accès à une multitude de modèles, certains conçus pour répondre à des besoins

¹ L'adjectif « opérationnel » employé dans le présent rapport définit tout outil, modèle ou service régulièrement utilisé à l'appui des prévisions officielles dans le cadre d'un système robuste et normalement automatisé. Par exemple, un modèle opérationnel sera automatiquement exécuté quotidiennement pour fournir une prévision.

² L'expression « indication » ou « indication de prévision » employée au fil du présent rapport renvoie à un extrait du modèle employé. Un prévisionniste peut ensuite sélectionner manuellement ou automatiquement une seule indication ou en combiner plusieurs (en faisant, par exemple, un calcul de moyenne) en vue de parvenir à une prévision officielle.

opérationnels différents et d'autres étant en cours d'élaboration pour des opérations futures. Pour un système binational comme celui-ci, il arrive souvent que les territoires couverts par les systèmes de modélisation utilisés par les organismes de prévisions des deux côtés de la frontière se chevauchent afin de représenter l'ensemble du réseau (c.-à-d., dans le cas qui nous intéresse, le bassin du lac Champlain et de la rivière Richelieu). En règle générale, rien n'interdit que ces diverses simulations modélisées soient produites par des organismes différents pour le même bassin hydrographique. Par exemple, un organisme pourra produire des prévisions météorologiques qu'il transmettra à un autre afin que celui-ci s'en serve comme intrant dans un modèle de débit et d'écoulement hydrographique. Plusieurs organismes peuvent prévoir la même variable, comme le niveau ou le débit d'eau. En fait, des recherches scientifiques récentes indiquent que les prévisionnistes s'appuient sur de multiples sources d'indication de prévisions pour parvenir à de meilleurs résultats que ce qu'ils obtiendraient à partir d'une seule source. Les prévisionnistes opérationnels sont formés et expérimentés dans l'utilisation de modèles et données multiples pour produire leurs prévisions, et ils s'appuient sur des systèmes de prévision et sur leur expérience pour synthétiser les intrants afin de parvenir à leurs résultats.

Si rien n'empêche des organismes différents de produire de multiples sources d'indication de prévisions, il est important que les prévisions officielles soient produites par des experts hautement qualifiés de l'organisme de prévision officiel, cela pour éviter toute confusion parmi les usagers, le grand public et les intervenants d'urgence. Quand il produit ainsi des prévisions officielles, l'organisme en question est investi de la responsabilité de mettre à disposition un ensemble de produits, comme des avertissements officiels, et d'en expliquer les détails (et les limites) aux usagers qui n'ont pas la compétence scientifique nécessaire pour le faire eux-mêmes. Cela permet d'éviter les situations où différentes prévisions donnent lieu à des messages contradictoires.

Le caractère transfrontalier du bassin LCRR ajoute un autre aspect important dont il convient de tenir compte, soit qu'il n'existe pas de prévision officielle binationale unique pour l'ensemble du bassin hydrographique. Ce sont plutôt des organismes des deux pays, soit la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) du côté américain et le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements climatiques (MELCC) du côté canadien qui sont responsables d'émettre les prévisions de crues officielles pour leurs territoires respectifs. L'eau ne respecte pas les limites administratives et les usagers pourraient être exposés à des messages contradictoires si, par exemple, les prévisions officielles de la NOAA (en amont) annonçaient des conditions propices à des inondations près de la frontière, tandis que les prévisions officielles du MELCC (en aval) n'indiquereraient rien de tel. Il est donc important que les deux prévisions officielles soient cohérentes. Heureusement, cette situation ne s'est jamais produite grâce aux procédures opérationnelles que suivent les prévisionnistes du MELCC et de la NOAA.

De plus, même si les prévisions officielles sont cohérentes, les produits de prévision des crues doivent être facilement compréhensibles et utilisables par les usagers, qu'il s'agisse des gestionnaires des urgences, des premiers intervenants, des médias ou du grand public. Il est donc important de tenir compte des besoins des usagers en matière de produits de prévision et de les comparer à ce qui est techniquement faisable dans le cadre des opérations. Cela garantira la pertinence du SPC.

Le présent rapport porte sur l'objectif 5.6 du Groupe d'étude sur le bassin LCRR de la Commission mixte internationale (CMI). La réalisation de cet objectif exige la recommandation d'un système binational de prévision des crues à la fine pointe de la technologie et une explication des diverses étapes nécessaires à sa mise en œuvre, au vu des SPC existants. À cette fin, le rapport commence par énumérer les exigences d'un tel système.

Puis, pour ce qui est du cadre institutionnel de prévision des crues au Canada et aux États-Unis, le rapport recense les lacunes techniques et les étapes nécessaires en vue de les combler. La gouvernance du système fait également l'objet de discussions assorties d'un tableau général présentant la façon dont les nouveaux produits de prévision pourraient être utilisés afin d'améliorer les interventions en cas d'inondation.



2 CADRE INSTITUTIONNEL ET EXIGENCES

Une description des exigences et des contextes institutionnels au Canada et aux États-Unis s'impose pour comprendre le processus de production et de diffusion des prévisions officielles de crues ainsi que des améliorations recommandées pour le SPC des deux pays dont il sera question dans les sections suivantes. Il est essentiel de tenir compte de ce contexte pour assurer le succès de toute amélioration des prévisions opérationnelles de crues, car il s'agit de systèmes nationaux et provinciaux vastes et complexes assortis de contraintes et d'exigences opérationnelles. Malgré les différences entre les SPC qui existent de chaque côté de la frontière, chaque approche a fait ses preuves et fournit des composantes essentielles au travail de prévision, sans compter que les organismes concernés collaborent étroitement. De plus amples détails sont donnés ci-après.

2.1 PRÉVISION DES CRUES AUX ÉTATS-UNIS

Aux États-Unis, la prévision des crues relève d'un mandat fédéral et repose sur un processus national d'examen et d'approbation structuré et officiel. La NOAA a le pouvoir d'élaborer et de diffuser des prévisions relatives à la météorologie et au régime hydrologique, y compris à propos des crues. La NOAA s'acquitte de ce mandat grâce à la collaboration qui existe entre ses laboratoires de recherche-développement (R-D), ses centres nationaux, ainsi que ses bureaux régionaux et locaux. Les services de prévisions météorologiques, notamment pour ce qui est de la diffusion des produits et de la communication avec les médias et les gestionnaires des urgences, sont assurés par le National Weather Service (NWS) de la NOAA. Ce dernier travaille souvent avec des partenaires comme l'Office of Oceanic and Atmospheric Research (OAR) (Bureau de la recherche océanique et atmosphérique) de la NOAA, d'autres organismes fédéraux et le milieu universitaire, cela pour élaborer et tester des sources améliorées d'indications météorologiques, hydrologiques

et de prévision des crues, ainsi que pour promouvoir les produits, les messages et la sensibilisation du public. Les gestionnaires des mesures d'urgence locaux à l'échelon des comtés ou des municipalités sont responsables des activités d'intervention d'urgence en fonction des prévisions émises et de protéger les populations locales.

La figure 2 illustre le processus de prévision des crues aux États-Unis. Le NWS produit des prévisions pour les cours d'eau (séries chronologiques du débit et/ou de niveau) par l'entremise de ses River Forecast Centers (RFC) régionaux. On dénombre 12 RFC aux États-Unis contigus et un 13e en Alaska. Le Northeast River Forecast Center (NERFC) produit des prévisions pour plus de 200 cours d'eau de la Nouvelle-Angleterre et de l'est de l'État de New York. Les prévisions du NERFC sont transmises aux huit bureaux des prévisions météorologiques (WFO) de la région. Les WFO sont chargés de publier les prévisions et de fournir des services d'assistance aux décideurs immédiatement avant et pendant une inondation sous la forme de veilles, d'avertissements et de séances d'information sur l'état de la situation, par courriel ou par d'autres moyens de communication.

2.2 PRÉVISION DES CRUES AU QUÉBEC (CANADA)

Au Canada, les prévisions météorologiques relèvent du gouvernement fédéral, tandis que la prévision des crues relève des provinces. La figure 3 présente le processus de prévision des crues au Canada. À l'échelon fédéral, ECCC produit des prévisions météorologiques pour l'ensemble du pays. Au sein du gouvernement du Québec, c'est le MELCC qui est responsable de la production des prévisions, tandis que le ministère de la Sécurité publique (MSP) est chargé du soutien aux intervenants d'urgence dans les villes et les municipalités. La diffusion se fait par l'entremise des sites Web du MELCC et du MSP. L'équipe de prévision du MELCC est

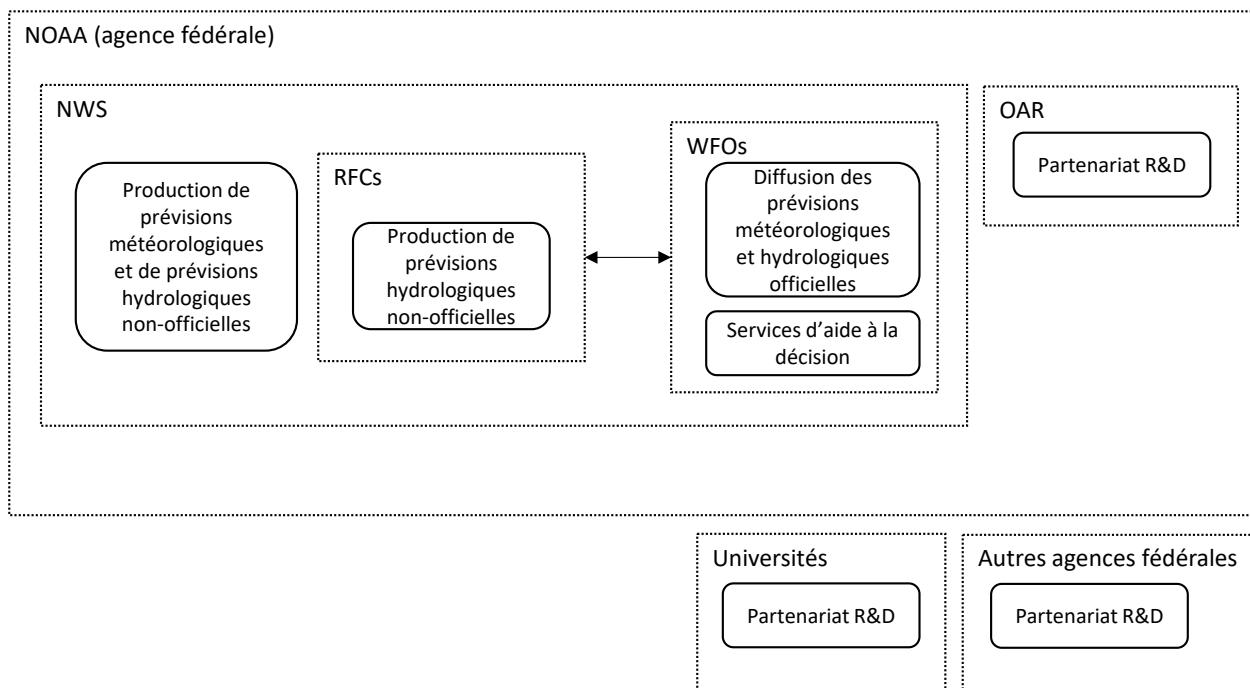


Figure 2. Contexte institutionnel américain.

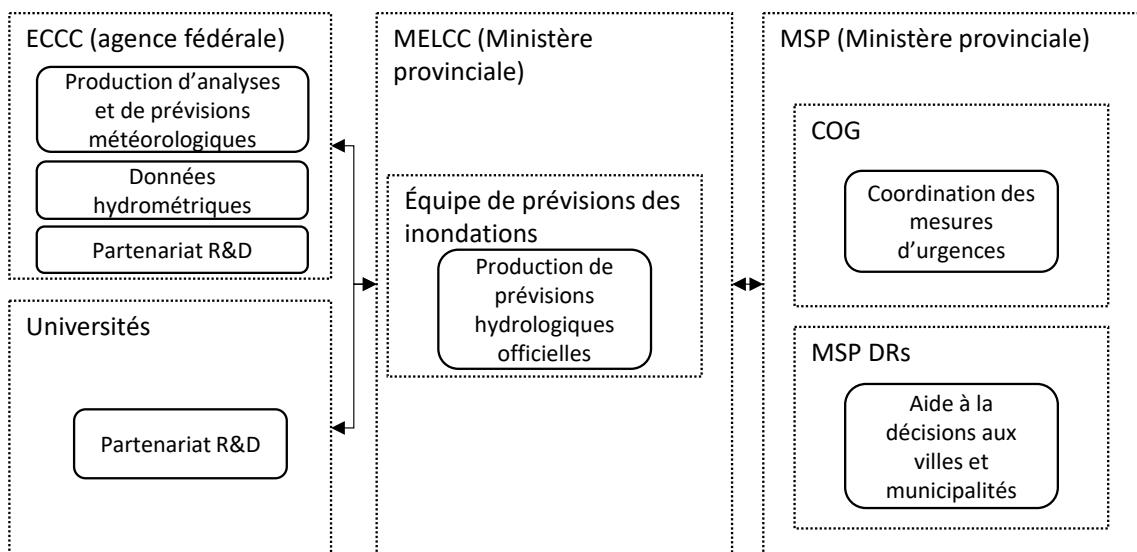


Figure 3. Contexte institutionnel canadien.

entièrement autonome et applique ses propres processus de prévision. ECCC, de son côté, produit des prévisions hydrologiques opérationnelles à l'appui de mandats fédéraux autres que la prévision des crues.

Il convient de mentionner que le MELCC dispose d'une équipe centrale responsable de tous les aspects de la prévision des crues pour l'ensemble du territoire. Cette équipe de prévisionnistes émet des prévisions et élabore, tient à jour et met en œuvre les diverses composantes des modèles qui alimentent le SPC. Elle maintient également la collaboration avec ECCC et le milieu universitaire pour les projets de R-D portant spécifiquement sur les prévisions. D'autres projets universitaires peuvent être coordonnés par le MSP et porter sur la question plus vaste des inondations. Avant, pendant et après des inondations, le MELCC fournit une expertise continue et un soutien décisionnel au MSP.

Le MSP a un bureau des opérations centralisé, le Centre des opérations gouvernementales (COG), qui assure notamment la coordination des interventions d'urgence en cas d'inondation. Le MSP répartit ensuite ses activités de soutien aux villes et aux municipalités par l'entremise de divers bureaux régionaux appelés directions régionales (DR-MSP).

De prime abord, ce système peut sembler déroutant, mais il fonctionne très bien depuis plus de 10 ans. Il est important de souligner par ailleurs que, durant les activités quotidiennes d'établissement des prévisions, les données et informations sont produite automatiquement et des procédures opérationnelles s'appliquent alors. Les partenariats en matière de R-D prennent place en dehors de ces procédures.

2.3 COLLABORATION BINATIONALE EN MATIÈRE DE PRÉVISION DES CRUES DANS LE BASSIN LCRR

Le MELCC a commencé à produire des prévisions pour la rivière Richelieu en 2012, à la suite de la crue majeure de 2011. Pour ce faire, le MELCC a utilisé les prévisions des niveaux d'eau à Rouses Point du NERFC comme condition limite pour ses propres prévisions, ce qui revient à dire que les prévisions américaines et canadiennes sont directement liées. Depuis, les prévisionnistes du MELCC et du NERFC collaborent en période d'inondations pour assurer la cohérence des prévisions de crues des deux côtés de la frontière. La prévision actuelle disponible pour le bassin LCRR est le produit de cette collaboration binationale. Il n'est actuellement pas vraiment possible que les prévisions des deux côtés de la frontière divergent, puisque le MELCC amorce ses prévisions en se fondant sur celles du NERFC coordonnées à Rouses Point. Bien que cela ne se soit pas produit depuis plus de 10 ans, s'il arrivait que les prévisionnistes du MELCC trouvent à redire à propos des prévisions du NERFC, ils communiqueront directement avec les prévisionnistes américains responsables des prévisions pour exprimer leurs préoccupations et régler ensemble le problème. Le lecteur trouvera plus de détails à ce sujet à l'ANNEXE F - Services de prévision et mesures appliquées au Canada.

3 PRÉVISION DES CRUES ET EXIGENCES RELATIVES AU SYSTÈME DE CARTOGRAPHIE DANS LE CAS DU RÉSEAU DU LAC CHAMPLAIN ET DE LA RIVIÈRE RICHELIEU

Après la crue historique de 2011, un vaste mouvement d'appui en faveur d'un système de prévision des crues dans le bassin LCRR s'est installé. En 2011, le NERFC avait pourtant produit des prévisions exactes, mais certains modèles manquaient pour tenir compte de phénomènes importants. Le modèle hydraulique simple et unidimensionnel utilisé pour prédire le niveau du lac Champlain est fondé sur les apports hydrologiques observés et projetés. Cependant, il ne permet pas de tenir compte des effets causés par le vent, soit des inondations riveraines dues aux ondes de tempête et aux seiches. Il n'existe pas non plus de modèle vent-vagues permettant de prévoir la hauteur des vagues et leurs impacts sur les berges. La CMI a piloté l'effort qui a permis de combler cette lacune et a produit un rapport intitulé : « Progress Towards An Operational Real-time Flood Forecasting And Flood Inundation Mapping System for the Lake Champlain And Richelieu River Preparatory Works And Static Flood Inundation Maps ». (CMI, 2015). Le rapport décrit clairement la fonctionnalité et les exigences particulières du système proposé.

En 2016, dans un ordre de renvoi, les gouvernements ont demandé à la CMI d'examiner des façons de mieux atténuer les inondations dans le bassin LCRR et a mis sur pied le Groupe d'étude international du lac Champlain et de la rivière Richelieu. Le Groupe d'étude s'est vu confier sept objectifs clés dont le quatrième qui s'énonce ainsi :

- Développer et faire des recommandations concernant la mise en place et l'exploitation, selon les besoins, d'un système opérationnel de prévision des crues et de cartographie des plaines inondables en temps réel pour le bassin versant du LCRR.

Le présent rapport traite de cet objectif et s'appuie sur les exigences énoncées dans le rapport de 2015 de la CMI.

3.1 BESOINS DES INTERVENANTS D'URGENCE EN CAS D'INONDATION

Des intervenants d'urgence des deux côtés de la frontière ont été invités à préciser leurs besoins en produits et services pour alimenter le système de prévision des crues et cartographier les zones inondables. La consultation des intervenants d'urgence pendant la pandémie de COVID-19 n'a pas été sans présenter ses défis, mais elle a permis d'obtenir des retours utiles. Comme on peut s'y attendre, les besoins exprimés sont différents du côté américain et du côté canadien. Du côté américain, le bassin LCRR comprend le lac Champlain (un milieu lacustre), et, du côté canadien il comporte la rivière Richelieu (un milieu fluvial) qui représente la majeure partie du réseau côté canadien (à l'exception de la baie Missisquoi). En raison des conditions hydrauliques, le temps de réponse du réseau en cas de montée des eaux est plus lent aux États-Unis (milieu lacustre) qu'au Canada (milieu fluvial). Des activités comme la retenue des eaux de crue et la gestion des plaines inondables ont été entreprises des deux côtés de la frontière, les inondations le long des rives du lac devenant de moins en moins un problème avec le temps. Tous ces facteurs ont influé sur le niveau d'intérêt des intervenants d'urgence et sur leurs rétroactions au sujet de leur besoins. Les détails du processus d'évaluation des besoins se trouvent à l'ANNEXE A - Évaluation des besoins des intervenants d'urgence en cas d'inondation.

3.2 APERÇU DU SPC RECOMMANDÉ

À partir de l'information dérivée de l'évaluation des besoins des intervenants d'urgence, un cadre de SPC recommandé a été élaboré. La figure 4 présente un aperçu du système binational de prévision des crues recommandé dont les divers éléments sont décrits dans les sections suivantes.

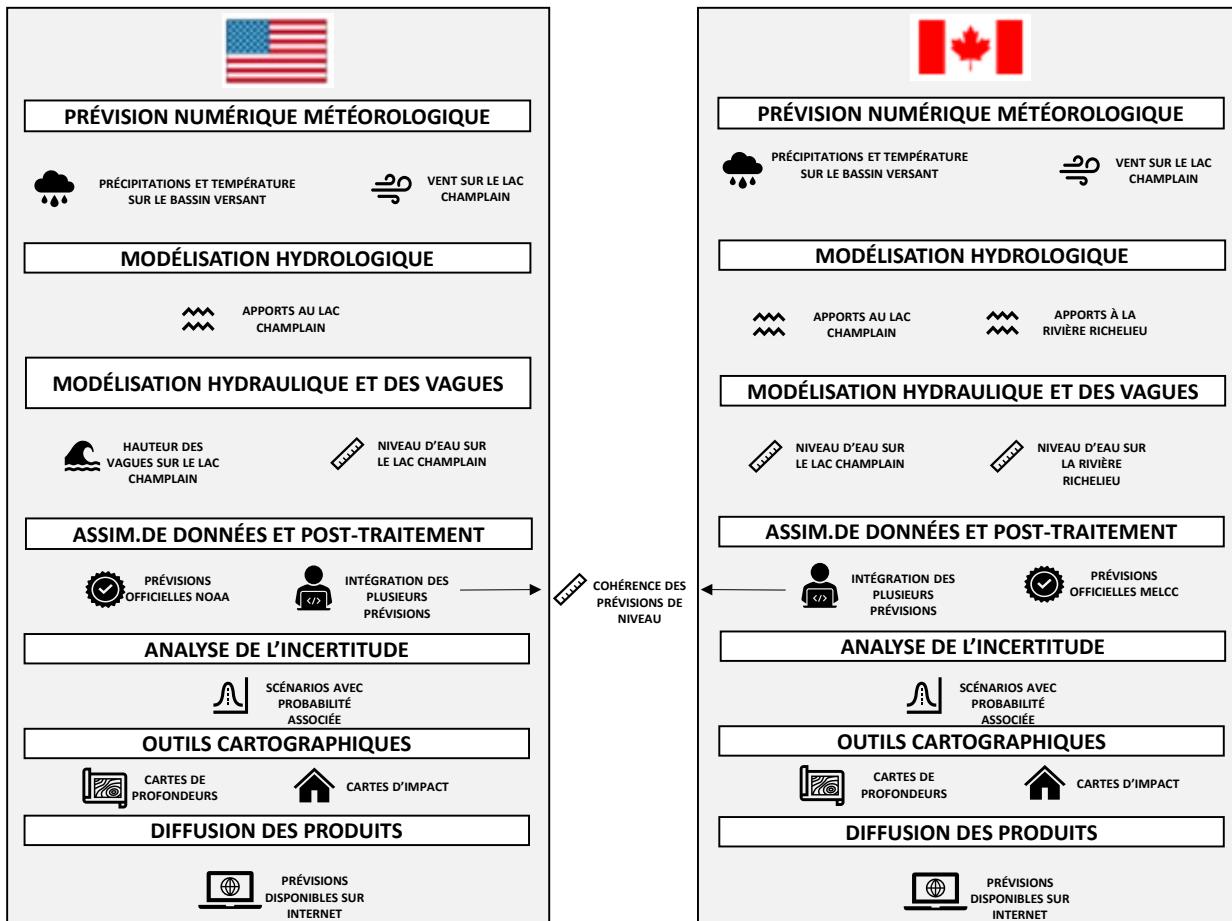


Figure 4. Système binational de prévision des crues recommandé.

Un aspect important du système recommandé est qu'il est « binational » en ce sens que ses processus assurent la cohérence des prévisions entre le côté américain (en amont) et le côté canadien (en aval). Les deux pays ont la responsabilité de publier les prévisions sur leurs territoires respectifs seulement. Cependant, il est important d'assurer la cohérence des prévisions officielles des deux pays le long de la frontière, notamment pour ce qui est du scénario principal de la prévision, puisque les prévisions sont souvent assorties des fourchettes d'incertitude. Cela réduit au minimum le risque de messages contradictoires pouvant prendre la forme 1) de deux prévisions différentes à la frontière (p. ex., à Rouses Point) et 2) des prévisions visant un emplacement en aval qui seraient incompatibles avec des prévisions concernant un emplacement en amont (p. ex., pour ce qui est du niveau de la rivière Richelieu). Une fois qu'un ensemble cohérent de prévisions pour le réseau LCRR a été élaboré, les produits et services qui en découlent sont également compatibles les uns avec les autres (p. ex., cartes de zones inondables et évaluations des dommages).

Les prévisionnistes du MELCC et de la NOAA doivent assurer la cohérence binationale et publier des prévisions officielles limitées à leur champ de responsabilité respectif.

Cela ne revient pas à dire que les différents organismes ne sont pas en mesure de produire des indications modèles pour l'ensemble du bassin LCRR. Toutefois, ces indications sont partagées entre les organismes, et il ne s'agit pas de prévisions officielles. Il incombe aux organismes responsables (NOAA et MELCC) de produire leurs prévisions officielles respectives en utilisant au mieux ces multiples sources d'indications.

3.3 PRÉVISION MÉTÉOROLOGIQUE NUMÉRIQUE

La prévision météorologique numérique est la première étape de la prévision des crues. Les modèles atmosphériques simulent les divers paramètres des processus météorologiques et intègrent de multiples sources d'observation (précipitations, température, pression, etc.) pour produire des prévisions météorologiques.

Les principales variables normalement nécessaires à la production d'une prévision des crues sont les précipitations et la température. Toutefois, dans le cas du réseau LCRR, les prévisions du vent sont aussi exigées pour tenir compte de deux effets aérologiques sur le lac Champlain. Le premier est la dénivellation ou surcote due au vent (ou encore l'onde de tempête), phénomène selon lequel le vent provoque un déplacement de la masse d'eau dont il augmente le niveau d'un côté pour le diminuer de l'autre. Étant donné que le lac Champlain est de forme allongée dans l'axe nord-sud et que son principal exutoire se trouve au nord, un vent plus ou moins aligné dans l'axe principal du lac a une incidence non seulement sur le niveau d'eau, mais aussi sur le débit sortant du lac (vers la rivière Richelieu). Le deuxième effet

du vent est celui des vagues qu'il crée et qui augmentent le niveau de l'eau sur les berges, causant ainsi des dommages riverains importants.

Les prévisions météorologiques numériques peuvent être déterministes, ce qui signifie que les variables prévues font partie d'un seul scénario produit par les conditions initiales de la simulation. En général, une prévision déterministe convient mieux aux prévisions à court terme (quelques jours).

Les prévisions numériques du temps peuvent être déterministes, ce qui signifie que les variables prévues font partie d'un seul scénario produit par les conditions initiales de la simulation. En général, une prévision déterministe convient mieux aux prévisions à court terme (quelques jours).

Les prévisions météorologiques peuvent aussi être probabilistes, ce qui signifie qu'un ensemble de scénarios (appelés membres) est produit à partir d'un ensemble de conditions initiales probables, de configurations de modélisation ou de différents modèles. Les prévisions météorologiques d'ensemble sont préférables pour un système de prévision à la fine pointe de la technologie, car elles permettent d'évaluer l'incertitude des prévisions. Elles sont également préférables pour produire des prévisions de crue à long terme, car l'incertitude des prévisions météorologiques augmente rapidement avec le temps, ce qui rend les prévisions déterministes moins fiables.

Les recommandations concernant le SPC comprennent l'utilisation de prévisions déterministes pour les prévisions à court terme (quelques jours) et de prévisions d'ensemble pour les prévisions à long terme. Les variables requises sont les précipitations, les températures et le vent.

Toutefois, les indications des modèles de prévision d'ensemble ne sont pas encore opérationnellement disponibles pour toutes les variables qui influent sur les prévisions des niveaux d'eau et des crues dans le bassin LCRR. La présente étude part des approches déterministes existantes en vue d'améliorer la qualité des indications transmises aux prévisionnistes experts.

3.4 MODÉLISATION HYDROLOGIQUE

Les modèles hydrologiques simulent les processus du cycle de l'eau dans un bassin versant pour calculer les débits sortants. L'exécution d'un modèle hydrologique alimenté par des prévisions météorologiques est l'outil principal et le plus simple pour produire une prévision des crues dans un bassin. En plus des intrants de précipitations et de températures, l'exécution d'un modèle hydrologique exige également que l'on connaisse l'état initial du bassin versant³. Cet état initial décrit les conditions présentes du bassin, comme les caractéristiques de la neige au sol, l'humidité du sol et l'écoulement de l'eau dans le réseau hydrographique.

Il existe différents types de modèles hydrologiques qui peuvent différemment décrire les processus du cycle de l'eau, ce qui occasionne une certaine différence dans le nombre de variables d'état, mais on distingue plus principalement deux grandes catégories : les modèles globaux et les modèles distribués. Les modèles hydrologiques globaux décrivent globalement le bassin versant, ils précisent l'état du bassin versant (comme l'accumulation de neige, l'humidité du sol, la température et les précipitations) en tant que valeurs globales, et calculent le débit sortant seulement. Les modèles distribués quant à eux fractionnent le bassin versant en unités plus petites (comme dans un maillage), chacune étant assortie de son propre état et de ses propres intrants. Les variables de débit et d'état sont ensuite calculées dans chaque sous-unité et additionnées

en divers points du réseau. Bien que cette approche plus détaillée puisse sembler être un avantage pour un SPC, il est possible d'utiliser les modèles globaux regroupés en cascade pour produire des résultats semblables. Chaque organisme de prévisions choisit le modèle hydrologique qui convient le mieux à ses capacités, à son expertise et à ses objectifs.

Le plan de travail de l'étude ne fixe pas d'approches ou d'exigences particulières de modélisation hydrologique pour le bassin LCRR, sauf la prise en compte des processus d'accumulation et de fonte de la neige, qui sont déjà inclus dans les modèles hydrologiques utilisés au Canada et aux États-Unis.

Comme pour les prévisions météorologiques, il est également possible de produire des prévisions d'ensemble par modèle hydrologique, souvent en exécutant des simulations avec plusieurs membres de la prévision d'ensemble météorologique. Par conséquent, les prévisions hydrologiques déterministes produites par un seul intrant de prévisions météorologiques conviennent mieux à des périodes plus courtes, tandis que les prévisions hydrologiques d'ensemble sont plus utiles pour des périodes plus longues.

Pour le CPS du bassin LCRR, la modélisation hydrologique doit inclure l'accumulation de neige et la modélisation de la fonte des neiges. Pour les simulations de modèles, il y a lieu de recourir à un scénario météorologique déterministe pour les prévisions à court terme (à terme de quelques jours) et à des prévisions météorologiques d'ensemble à plus long terme.

Toutefois, les recherches récentes en modélisation hydrologique tendent à indiquer qu'une combinaison de

³ Le terme « variables d'état » ou « état » désigne un ensemble de valeurs modélisées servant à décrire les conditions d'un bassin hydrographique modélisé, à un moment donné, comme la présence de neige au sol, l'humidité du sol, le débit d'eau actuel dans le réseau hydrographique, etc.

prévisions obtenues à partir de différents modèles produit de meilleurs résultats (Seiller et al., 2017). Cette technique peut constituer un autre moyen de produire des prévisions hydrologiques d'ensemble (combinaison de modèles hydrologiques différents et/ou utilisation de prévisions météorologiques d'ensemble). Les conséquences sur le SPC du bassin LCRR sont traitées dans la section Assimilation et post-traitement des données ci-dessous.

3.5 MODÉLISATION HYDRODYNAMIQUE

La modélisation hydrodynamique est l'outil le plus souvent utilisé pour produire des données sur la dynamique hydrique d'un lac ou d'un grand plan d'eau afin de parvenir à une prévision des crues qui soit satisfaisante. En effet, les débits d'eau simulés par un modèle hydrologique sont insuffisants pour déterminer la circulation de l'eau et la variabilité du niveau d'un lac.

Pour prédire la variabilité des niveaux d'eau, des courants, des températures et des paramètres connexes dans un plan d'eau, on recourt donc aux modèles hydrodynamiques dont il existe différents types, tous présentant leurs degrés de complexité, leurs avantages et leurs limitations. Ils sont dits unidimensionnels, bidimensionnels ou tridimensionnels.

Certaines combinaisons simples de modèles, comme les courbes niveau-débit et les modèles de bilan hydrologique, peuvent suffire à convertir les apports (débits entrants) dans le Lac Champlain provenant de modèles hydrologiques en niveau d'eau du lac, puis en prévisions de débit de la rivière Richelieu. Ces modèles peuvent avoir comme avantages : la simplicité, la facilité d'exécution et l'ajustement sur une base opérationnelle. Cependant, ces modèles peuvent ne pas tenir compte de processus plus complexes tels que les effets du vent et des vagues, et ils nécessitent donc un post-traitement plus poussé.

Les modèles hydrodynamiques bi- et tridimensionnels les plus complexes sont alimentés par les débits entrants et

ils permettent de simuler les impacts du vent sur des plans d'eau comme des lacs quand ils sont alimentés par les prévisions du vent. De plus, s'ils sont calibrés en régime transitoire (c.-à-d. selon des conditions limites variables dans le temps), ils peuvent également être utilisés en tant que modèles de bilan hydrologique.

Pour le bassin LCRR, ce sont des modèles unidimensionnels simples qui sont utilisés depuis toujours pour produire les prévisions. Leur nature simple permet aux prévisionnistes d'intervenir sur les modèles dont ils peuvent ajuster les intrants ou la calibration en temps réel en vue d'améliorer les résultats. Toutefois, ces modèles ne permettent pas de tenir compte des effets du vent sur le niveau du lac ou de la contribution des vagues aux dégâts causés par les crues. Les prévisionnistes sont conscients des limites de ces modèles dans les opérations quotidiennes.

Comme nous le verrons à la prochaine section, des modèles tridimensionnels plus complexes sont maintenant disponibles à la suite de l'étude du bassin LCRR. Ceux-ci présentent l'avantage d'intégrer les processus manquants (effets du vent et des vagues) pour le lac Champlain, ce qui ne revient cependant pas à dire que les approches de modélisation plus simples actuellement utilisées doivent être abandonnées pour le SPC recommandé, mais simplement qu'il y a lieu de les utiliser concomitamment avec les modèles plus récents et plus complexes. Cela permettra une évaluation opérationnelle en temps réel des avantages et des inconvénients des approches de modélisation, ainsi que des façons pour les prévisionnistes opérationnels d'intervenir dans les modèles et de consulter leurs résultats dans le système de prévision.

Il convient d'intégrer à la modélisation hydrodynamique utilisée pour les prévisions toutes les mesures d'atténuation ou tous les changements opérationnels potentiels. Par exemple, s'il y a lieu d'installer un ouvrage de régularisation ou une dérivation dans le réseau LCRR, tout modèle hydrodynamique mis en œuvre doit alors permettre de simuler les effets de ces modifications, que ce soit par des changements apportés aux conditions

limites du modèle, par la modification du domaine de modélisation ou par l'inclusion de règles de gestion de la structure de contrôle. Le type d'ouvrage de régularisation ou de dérivation peut avoir des répercussions importantes sur les prévisions à court et à long terme.

Pour le CPS du bassin LCRR, il est recommandé de recourir à une combinaison de modèles hydrodynamiques, certains simples et d'autres plus complexes. Pour les prévisions à court terme, il faut tenir compte des effets du vent et des vagues sur le niveau du lac Champlain. Pour les prévisions à long terme, l'effet du vent et des vagues pourront être inclus, pour peu que leur performance soit démontrée.

Il faut prendre en compte les mesures d'atténuation de nature structurelle dans les prévisions résultant de la modélisation hydrodynamique. Les effets des modifications en temps réel apportées au réseau du bassin LCRR (p. ex., application des règles de gestion, modification des conditions limites) doivent être simulés au niveau du CPS, car l'application des mesures d'atténuation peut avoir une incidence sur les niveaux d'eau.

Comme dans le cas de la modélisation hydrologique, la production de prévisions d'ensemble au moyen de modèles hydrodynamiques comportant de multiples scénarios d'entrée contribue à établir des fourchettes d'incertitude dans les prévisions du modèle hydrodynamique, en particulier pour des périodes relativement longues (quelques semaines). À mesure que les ressources informatiques deviennent plus aisément disponibles et que les vitesses de traitement augmentent, il faut envisager d'inclure dans le SPC opérationnel du bassin LCRR la modélisation hydrodynamique d'ensemble (en utilisant différentes configurations du modèle ou différents intrants). Il est important de tenir

compte du fait que les incertitudes à long terme sur des variables comme le vent peuvent rendre difficile l'inclusion de ce processus dans les prévisions à long terme des niveaux d'eau, même probabilistes.

3.6 ASSIMILATION ET POST-TRAITEMENT DES DONNÉES

L'assimilation des données est le processus par lequel les variables d'état interne d'un modèle sont ajustées afin de les amener à mieux correspondre à des observations comme des mesures de niveau ou de débit. Le post-traitement s'entend de toute modification apportée à un extrant d'un modèle pour parvenir à des fins semblables ou pour étayer des produits ou des visualisations. La grande différence entre les deux tient à ce que l'assimilation des données exige l'exécution de simulations du modèle, contrairement au post-traitement.

Le CPS du bassin LCRR exige que les prévisionnistes de la NOAA et du MELCC assurent la cohérence entre les prévisions officielles en recourant à l'assimilation des données, au traitement a priori et à l'intégration des indications de prévision. De nouvelles méthodes seront élaborées à mesure que de nouveaux modèles seront utilisés dans les opérations.

Les prévisionnistes combinent généralement les deux méthodes pour produire une prévision officielle publiée. En outre, ils peuvent intégrer les résultats de multiples modèles dans les systèmes de prévisions opérationnelles.

Il convient de noter que cet aspect du SPC pourrait s'appliquer à toute la chaîne de prévision (modélisation des conditions météorologiques, hydrologiques ou hydrodynamiques, ou des vagues). De nombreuses techniques d'assimilation et de post-traitement des données existent et dépendent du modèle sélectionné. Ces méthodes peuvent parfois se chevaucher; par exemple, l'assimilation des données peut être utilisée pour intégrer les indications de prévision. La figure 5 donne des exemples d'ajustements pouvant être apportés.

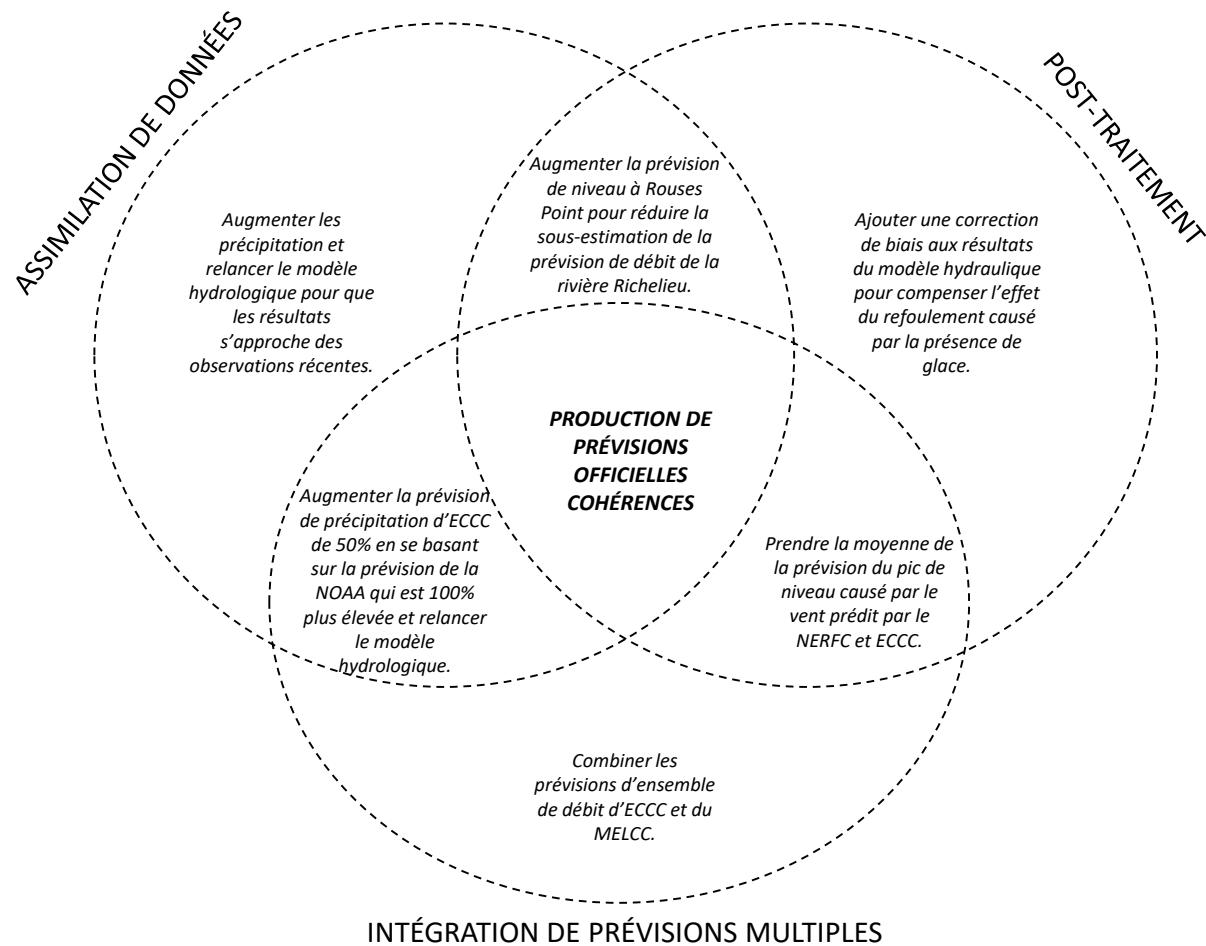


Figure 5. Intégration des données et des résultats du modèle pour produire des prévisions officielles.

Dans le cas du bassin LCRR, ces méthodes existent déjà. Toutefois, d'autres outils et modèles ajoutent de la complexité et exigent une attention plus grande de la part des prévisionnistes à qui incombe la responsabilité ultime de produire des prévisions optimales.

3.7 ANALYSE DE L'INCERTITUDE

L'incertitude est typique des prévisions météorologiques et des crues. En matière de modélisation hydrologique, par exemple, les principales sources d'incertitude sont : 1) les conditions initiales; 2) la structure et la résolution de la modélisation, et 3) le caractère incertain des prévisions météorologiques.

L'incertitude relative à l'état initial est liée au fait qu'il est impossible de connaître exactement l'état d'un bassin versant à un moment « T », c.-à-d. le débit de chaque affluent ou tronçon de rivière, la teneur en eau du sol dans chaque couche souterraine, l'équivalent en eau de la neige (EEN) dans chaque partie du territoire. etc.

Dans le cas du réseau LCRR, caractérisé par un grand bassin et un système qui réagit lentement, l'incertitude relative à l'état initial peut avoir des répercussions à long terme. Par exemple, l'incertitude relative à l'EEN avant la fonte printanière peut se traduire par une incertitude des prévisions d'apports d'eau dans les semaines suivantes..

La structure et la résolution des modèles représentent l'incertitude liée au choix, à la mise en œuvre et à la calibration des modèles mathématiques utilisés pour représenter le processus du cycle hydrologique. Par exemple, il existe plus d'une façon de modéliser l'accumulation ou la fonte de la neige. Habituellement, les modèles mathématiques les plus complexes exigent un plus grand nombre d'intrants, mais ils permettent de prendre en compte des processus plus complexes. Les modèles plus simples, eux, ne simulent pas ces processus plus complexes, mais ils exigent un moins grand nombre d'intrants. Le choix du ou des modèles se ramène toujours à un équilibre délicat entre la complexité et la simplicité appliquées à la tâche de modélisation. De plus, l'utilisation de multiples modèles simples et le calcul de la moyenne de leur production peuvent donner lieu à de meilleurs résultats dans certaines conditions, car leurs points forts sur le plan de la modélisation tendent à se compléter. Par conséquent, les modèles plus complexes ne représentent pas forcément le meilleur choix.

L'incertitude en matière de prévision météorologique découle directement de la perte de précision des prévisions ayant des horizons lointains. Si l'on peut raisonnablement prévoir les accumulations de précipitations du lendemain, on ne peut pas en dire autant des accumulations de précipitations cinq jours plus tard. C'est la principale raison pour laquelle les prévisions météorologiques d'ensemble produisent des résultats plus utiles pour les prévisions à long terme. Au lieu de produire un seul scénario (jugé le plus probable), il est préférable de produire plusieurs scénarios donnant une idée de l'incertitude et d'exprimer la prévision en termes de probabilités.

Dans le cas du CPS du bassin LCRR, il faudrait disposer d'une évaluation de l'incertitude en ce qui concerne les prévisions de niveau et de débit d'eau (à court et à long terme). Cette incertitude pourrait être exprimée sous forme de limites supérieures et inférieures (associées à leurs probabilités) autour d'un scénario central (médiane ou mode).

Il existe de multiples outils et méthodes pour estimer l'incertitude, à partir de modèles empiriques fondés sur des erreurs historiques concernant les prévisions d'ensemble. En général, ces outils et méthodes sont utilisés pour associer une probabilité avec une limite supérieure et une limite inférieure à la prévision principale, souvent la médiane (probabilité de dépassement de 50 %). L'approche, actuellement en vigueur à la NOAA, qui est illustrée sur les pages Web du Advanced Hydrologic Prediction Service (AHPS), permet de démontrer l'incertitude à l'aide du Hydrologic Ensemble Forecast System (HEFS) par l'affichage d'une prévision de probabilité médiane qui est accompagnée de scénarios allant des moins probables (probabilités de 5 à 95 %) aux plus probables (probabilités de 25 à 75 %) en passant par les scénarios probables (probabilités de 10 à 90 %). Un exemple de cette approche est présenté à la figure 6 pour une prévision du HEFS réalisée pour Essex Junction (Vermont).

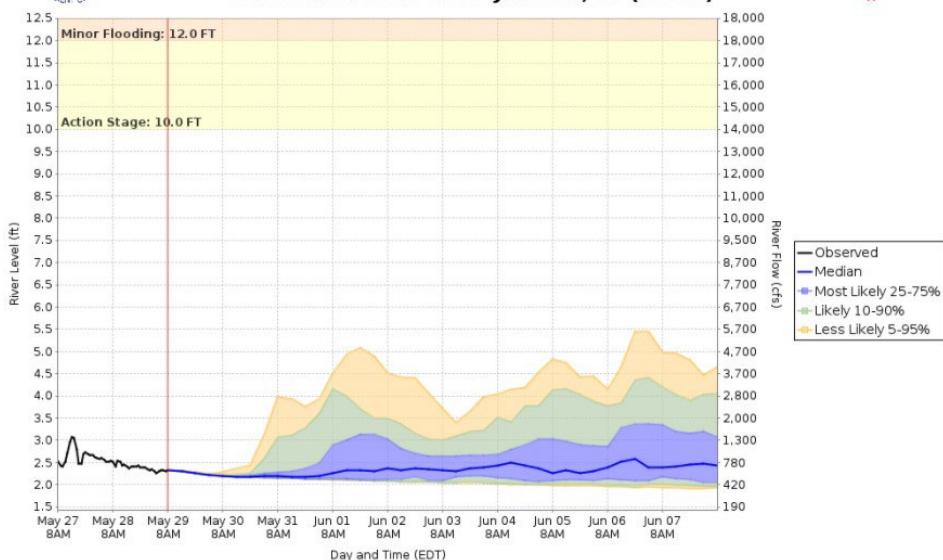
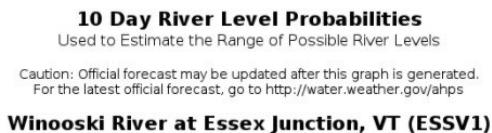


Figure 6. Exemple d'incertitude des prévisions pour la probabilité de niveau de la rivière à 10 jours (anglais seulement).

Lorsqu'on envisage la modélisation hydrodynamique pour produire des prévisions de niveaux d'eau, il faut tenir compte d'autres sources d'incertitude. Bien sûr, l'incertitude associée aux prévisions hydrologiques influe sur le résultat, mais l'incertitude de la structure du modèle et l'incertitude des autres intrants utilisés (comme les prévisions du vent) le font également.

3.8 OUTILS DE CARTOGRAPHIE

Pour les usagers du milieu de la gestion des urgences et pour le public, les prévisions de débit et de niveau d'eau des rivières et des lacs peuvent certes être utiles, mais elles peuvent aussi compliquer la visualisation des répercussions sur le terrain (par exemple, il peut être difficile de mettre en perspective un débit de 950 m³/s). Pour contourner cette difficulté, il est possible d'associer différents débits ou niveaux d'eau à des impacts connus (par exemple, le niveau d'inondation recouvrant certains points caractéristiques, comme les rues principales). Toutefois, ce genre d'association est particulière à chaque emplacement, car elle dépend de la configuration du terrain et des conditions locales.

Il est possible de traduire les prévisions de débit des modèles hydrologiques en niveaux d'eau à l'aide d'un modèle hydraulique (c.-à-d., un modèle simple de propriétés des fluides) ou hydrodynamique (c.-à-d., un modèle plus complexe de mouvement des fluides). Une prévision du niveau d'eau peut être associée à des courbes de terrain, ce qui est plus utile, mais peut être difficile à visualiser. On peut aussi aller un peu plus loin pour traduire les prévisions de niveau d'eau sur une carte montrant la zone qui serait submergée (c.-à-d. inondée) pour une prévision donnée. On peut alors facilement visualiser l'impact d'un débit ou d'un niveau d'eau donné pour un lieu d'intérêt précis et une inondation de durée précise.

Ces outils de cartographie peuvent être utilisés non seulement pour traduire les prévisions de niveau d'eau en une zone inondable, mais aussi pour illustrer sur une carte la hauteur des eaux lors d'une inondation. De plus, il est possible d'utiliser des outils cartographiques pour évaluer les prévisions d'impact d'une inondation en fonction de divers indicateurs tels que la valeur des dégâts occasionnés aux maisons et aux autres bâtiments ou le nombre de routes coupées et de résidences isolées. Ces outils peuvent être tout aussi utiles pour la planification urbaine que pour la prévision des crues. Bien que les cartes d'impact des inondations ne fassent généralement pas partie des prévisions elles-mêmes, elles peuvent s'avérer extrêmement utiles pour les gestionnaires des urgences, les premiers intervenants et les décideurs. Des exemples de cartes d'impact des inondations ont été produits par le Groupe d'étude pour plusieurs municipalités et ont été présentés lors d'un atelier sur les besoins des usagers en février 2021.

Pour le SPC du bassin LCRR, la prévision des crues et leur degré d'incertitude devraient être disponibles sous forme de carte pour faciliter la compréhension et la visualisation des impacts des inondations. Ces cartes devraient indiquer la profondeur d'eau et être associées à une probabilité de dépassement (incertitude).

Pour le SPC du bassin LCRR, la prévision des crues et leur degré d'incertitude devraient être disponibles sous forme de carte pour faciliter la compréhension et la visualisation des impacts des inondations. Ces cartes devraient indiquer la profondeur d'eau et être associées à une probabilité de dépassement (incertitude).

3.9 DIFFUSION DES PRODUITS

Le SPC comprend la diffusion des produits en plus de renseignements sur les emplacements, comme les débits et les niveaux d'eau maximaux prévus. Les produits de prévision, comme les graphiques, les cartes ou les indicateurs de risque, doivent en effet être mis à la disposition des usagers finaux et, selon la situation, ces produits peuvent être adaptés à ces derniers. Par exemple, en cas d'inondation les intervenants ont souvent besoin de produits de prévision plus détaillés que le public. De plus, toujours en cas d'inondation, les prévisionnistes peuvent fournir plus de contexte sur les produits à ces intervenants, par l'entremise de services d'aide à la décision.

La rapidité est un aspect important de la diffusion. Les produits de prévision deviennent rapidement obsolètes à mesure que le temps passe et que des mises à jour sont régulièrement effectuées. Il est impératif que les produits de prévision soient disponibles dès que les prévisions officielles sont produites. La diffusion en ligne s'impose donc comme une solution évidente de livraison des produits.

Les produits de prévision officiels pour le bassin LCRR, comme les cartes et les graphiques, doivent être mis à la disposition des utilisateurs finaux en ligne dans un délai raisonnable après leur production par les prévisionnistes.

Les prévisions à court terme (de deux à cinq jours) devraient être détaillées sous forme de graphiques et de cartes et inclure une certaine évaluation de l'incertitude. Des prévisions à long terme sont également nécessaires, mais elles devraient être probabilistes. Leur niveau de détail doit être cohérent avec la capacité de prévoir.

Le choix du produit est également important. Dans le cas du bassin LCRR, les prévisions à court terme (quelques jours) s'imposent parce que l'effet du vent peut rapidement augmenter ou diminuer les niveaux d'eau. Même s'il est plus difficile de prévoir le vent à des horizons plus lointains, la réaction généralement lente du niveau moyen du lac permet d'émettre des prévisions valables à long terme qui tiennent compte de l'incertitude. Au-delà de cinq jours, il devient normal que les prévisions soient probabilistes, car l'incertitude peut devenir trop importante pour qu'une prévision déterministe demeure fiable.



4 AMÉLIORATIONS DISPONIBLES, ANALYSE DES ÉCARTS ET FEUILLES DE ROUTE

4.1 SERVICES COURANTS

L'étude sur le bassin LCRR a effectivement permis d'élaborer des outils et des modèles destinés à améliorer les capacités de prévision et de cartographie, mais des services de prévision existaient auparavant au Canada et aux États-Unis. Les systèmes existants sont bien connus des prévisionnistes qui en comprennent les forces et les faiblesses ainsi que la qualité prévisionnelle (c. à d. l'exactitude à différents pas de temps).

Les services actuellement en vigueur au Canada sont décrits à l'ANNEXE F - Services de prévision et indicateurs de performance au Canada. Les services actuels aux États-Unis sont décrits à l'ANNEXE G - Services de prévision et indicateurs de performance aux États-Unis. À mesure que de nouveaux outils et modèles deviendront disponibles, leur intégration dans les services permettra de faire progresser la mise en œuvre du SPC recommandé.

4.2 OUTILS ET MODÈLES DISPONIBLES

Les exigences conceptuelles du SPC pour le bassin LCRR peuvent être comparées à l'ensemble actuel de modèles et d'outils disponibles. Certains outils étaient déjà utilisés avant la présente étude. D'autres ont été identifiées comme des objectifs à financer et à réaliser pendant la durée de l'étude. Enfin, d'autres modèles et/ou outils ont été élaborés au cours de l'étude grâce à des initiatives de financement en dehors de l'étude. La figure 7 présente les divers outils pour la province de Québec et pour les États-Unis qui peuvent faire partie du SPC recommandé. Pour les modèles météorologiques, hydrologiques et hydrodynamiques, la zone modélisée est également présentée. Le terme « en exploitation » signifie que le modèle produit des résultats au quotidien. L'élaboration d'un modèle peut être arrivée à terme, mais sans être

intégrée à une infrastructure de prévision pour produire des résultats au quotidien.

Les sous-sections suivantes donnent un aperçu de ces divers outils et modèles ainsi que des références à des détails plus techniques éventuellement disponibles.

4.2.1 Prévisions numériques du temps à ECCC

ECCC émet des prévisions météorologiques pour l'ensemble de l'Amérique du Nord selon des horizons prévisionnels variant d'une heure à un mois, grâce à deux modèles environnementaux globaux (GEM) multiéchelles, soit le système global de prévision déterministe (SGPD) et le système régional de prévision déterministe (SRPD). De façon plus générale, le modèle GEM est très souple : le domaine, la résolution horizontale et l'horizon prévisionnel peuvent être configurés en fonction des besoins des usagers et des ressources informatiques disponibles. Le GEM peut également être couplé à des modèles hydrologiques et océaniques. À ce titre, il existe deux configurations d'ensemble du SGPD et du SRPD qui produisent des prévisions probabilistes des variables météorologiques, soit le Système global de prévision d'ensemble (SGPE) et le Système régional de prévision d'ensemble (SRPE). On trouvera plus de détails techniques à l'ANNEXE B — Configuration du modèle de prévisions météorologiques et indicateurs de performance à ECCC.

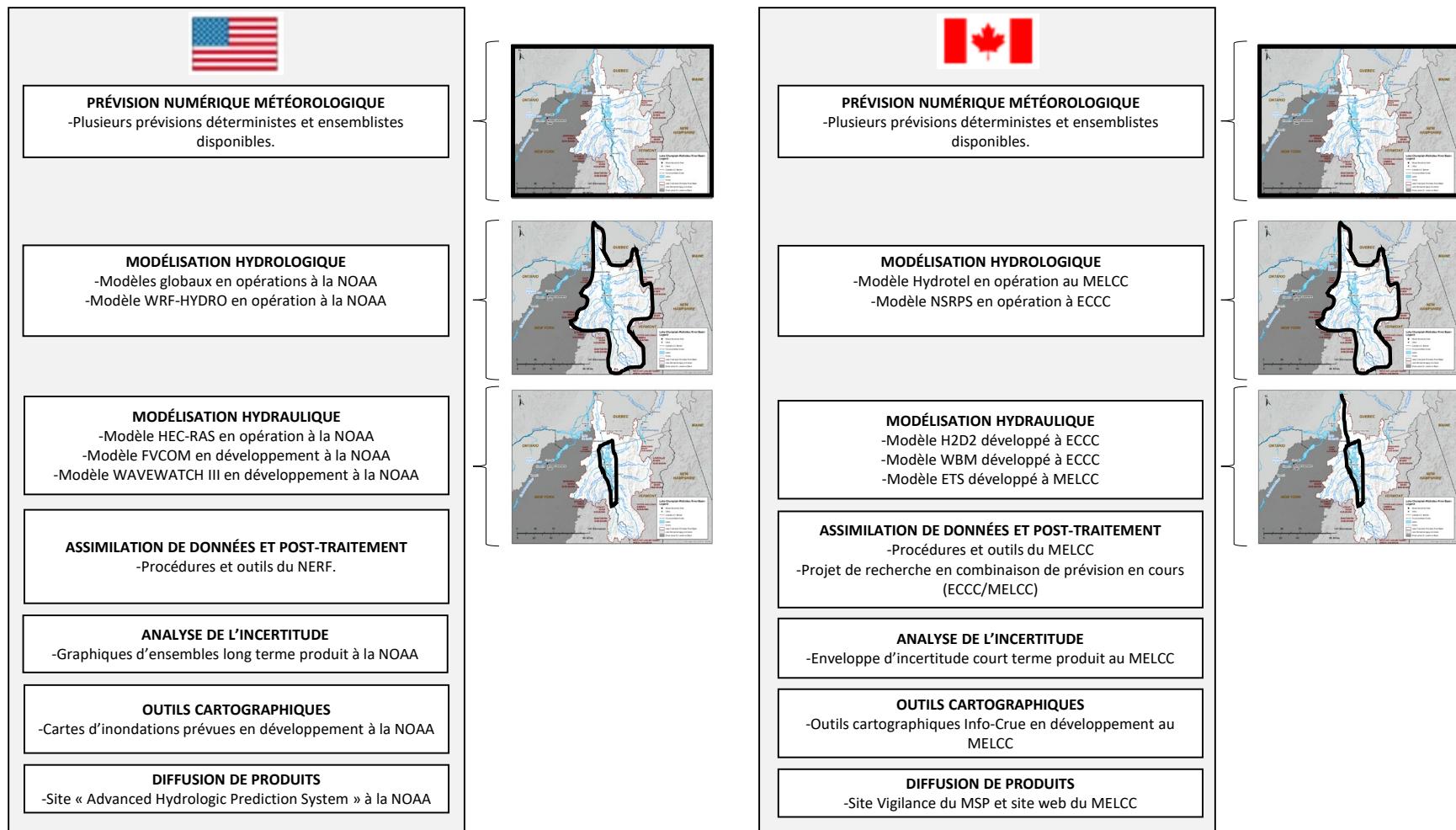


Figure 7. Outils et modèles possibles à inclure dans le système de prévision des crues recommandé pour le bassin LCRR

4.2.2 Prévisions météorologiques numériques à la NOAA

Le Weather Prediction Center (WPC) de la NOAA émet des prévisions pour l'Amérique du Nord quatre fois par jour, qui sont interprétées et complétées localement pour les régions visées par les Weather Forecast Offices (bureaux de prévisions météorologiques). Ces prévisions sont fondées sur de multiples modèles atmosphériques, y compris le Global Forecast System (GFS), le North American Mesoscale (NAM) forecast system, le Modèle global du Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT), le High-Resolution Rapid Refresh (HRRR) model, et le National Blend of Models (NBM), entre autres. Chacun des modèles atmosphériques pris en compte par le WPC pour l'élaboration de ses prévisions est disponible à différentes résolutions spatiales et à différents horizons temporels. On trouvera plus de détails techniques à l'ANNEXE C — Configuration du modèle de prévision météorologique de la NOAA.

4.2.3 Modèle hydrologique HYDROTEL du MELCC

HYDROTEL est le principal modèle hydrologique utilisé par l'équipe de prévisions du MELCC. Il s'agit d'un modèle semi-distribué élaboré par l'INRS-ETE qui est déployé à chaque emplacement produisant des prévisions au Québec. Les prévisionnistes émettent des prévisions en milieu jaugé (dotés de stations hydrométriques) en assimilant manuellement les débits dans HYDROTEL et en sélectionnant les indications de prévisions numériques du temps, comme un scénario combinant SRPD et SGPD ou un scénario combinant NAM et GFS. Ils utilisent également les indications d'ensemble pour évaluer la variabilité potentielle des prévisions.

Outre qu'HYDROTEL est déployé à chaque emplacement jaugé, un déploiement en milieu non-jaugé sur l'ensemble du domaine du sud du Québec est également possible, comme le montre la figure 8.

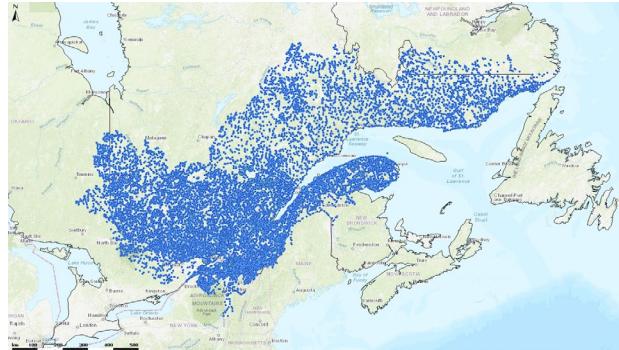


Figure 8. Mise en œuvre de la version globale d'HYDROTEL dans le sud du Québec.

Ce déploiement vise à obtenir des valeurs de débit dans chaque bassin versant selon une certaine superficie (d'au plus 25 km²). À l'aide d'une méthode d'interpolation (Lachance-Cloutier et al., 2017), les extrants de cette plateforme globale sont combinés aux prévisions officielles en milieu jaugé afin d'obtenir des prévisions de débit pour l'ensemble du sud du Québec.

Pour le moment, cette méthode ne comprend pas les prévisions du domaine du NERFC et elle n'est donc pas utilisée pour produire des prévisions de niveaux à Rouses Point. À la place, le MELCC convertit directement les prévisions du NERFC pour ce dernier emplacement en débit sortant du lac Champlain (vers la rivière Richelieu) et ajoute les apports d'eau le long du cours de la rivière pour parvenir à une prévision complète.

4.2.4 Modèle hydrologique d'ECCC : Système national de prévision de surface et de rivières (SNPSR)

Le Système national de prévision de surface et de rivières (SNPSR), qui est un système expérimental, a été mis en service à ECCC en mars 2019. Ce système de prévision déterministe s'appuie sur le modèle hydrologique global environnemental (GEM) multiéchelle (Gaborit et al., 2017) pour fournir des prévisions de l'état de la surface terrestre et des cours d'eau. Les prévisions déterministes produites deux fois par jour (à 00 h UTC et à 12 h UTC) sont disponibles pour des horizons prévisionnels allant jusqu'à six jours. Les variables de surface et de faible profondeur sont simulées pour une résolution de 2,5 km, tandis que les composantes hydrologiques sont résolues

à 1 km dans six grands bassins canadiens, y compris dans le bassin LCRR. À l'heure actuelle, le système est contraint par les prévisions atmosphériques du SGPE et du SRPE. À partir de l'analyse régionale déterministe des précipitations (CaPa; Fortin et al., 2018) et du Système canadien d'assimilation de données de surface avec observations satellitaires (SCanADS-Sat; Carrera et al., 2015), le SNPSR intègre les observations de précipitations, d'humidité du sol, d'humidité en surface et de température. CaPA (Fortin et al., 2018) est responsable de l'estimation des précipitations ayant atteint le sol depuis la publication de la dernière prévision, en fonction des données in situ, des données satellitaires et du radar au sol, ainsi que des prévisions SRPD à court terme. Le système SCanADS assure l'estimation de l'humidité du sol, de la température du sol et de la couverture de neige à partir de données in situ et satellitaires. Les observations intégrées par les systèmes CaPA et SCanADS servent ensuite à produire des analyses et des prévisions des variables de surface par le biais du Système de prévision déterministe à haute résolution de la surface terrestre de la surface terrestre (SPDHRST). Enfin, la composante du système de prévision hydrologique déterministe (DHPS) assimile les débits observés aux stations hydrométriques, estime le stockage d'eau dans les cours d'eau et les aquifères peu profonds (pendant le cycle d'assimilation) et applique le modèle d'écoulement et de prévision de débits (pendant le cycle de prévision). Le SNPSR fournit des prévisions pour tous les affluents du bassin LCRR, mais il n'est pas couplé aux modèles atmosphériques et océaniques. Par conséquent, même s'il intègre le modèle de bilan hydrologique pour estimer le niveau du lac Champlain à Saint-Jean-sur-Richelieu, il ne tient pas compte des effets du vent ni des précipitations et de l'évaporation directes sur le lac.

Depuis le printemps 2020, une version expérimentale du SNPSR produit des prévisions hydrologiques d'ensemble en couplant les adaptations d'ensemble des composantes météorologiques, de surface et hydrologiques, soit les systèmes de prévision SGPE et SRPE, et HRELPS et EHPS (la lettre « E » signifiant ensemble remplace la lettre « D » qui désignait les

valeurs déterministes). Plus précisément, EHPS fournit actuellement des prévisions d'ensemble quotidiennes (20 membres + 1 contrôle) à 00 h UTC avec un horizon de prévision de 16 jours et des prévisions de débit hebdomadaires jusqu'à 32 jours⁷. Le débit des affluents, les précipitations, l'évaporation et les vents de l'ensemble du SNPSR sont utilisés comme intrants dans le modèle hydraulique H2D2 afin de produire un modèle de prévision hydrodynamique du bassin LCRR. De plus amples détails se trouvent à l'ANNEXE D - Détails techniques du modèle SNPSR.

4.2.5 Modèle hydrologique distribué en usage aux États-Unis : WRF-Hydro

L'amélioration de la prévision des crues dans le bassin LCRR dépendra de l'amélioration de l'exactitude des prévisions concernant les niveaux du lac Champlain et de la rivière Richelieu. À l'heure actuelle, des prévisions hydrologiques des niveaux de la rivière sont faites pour certains bassins hydrographiques aux points de prévision où sont coimplantées les jaugeages de l'USGS et pour lesquels des courbes niveau-débit ont été établies. Toutefois, plus de 30 % des apports (provenant de secteurs non jaugés) autour du lac Champlain ne sont pas pris en compte. En raison de la couverture limitée et du nombre relativement faible de points de prévision visés par ces modèles hydrologiques globaux, le NWS a mis en œuvre un nouveau modèle hydrologique distribué à haute résolution. Le National Water Model (NWM) permet de couvrir nettement plus de points de prévision en représentant la plupart des bassins versants américains à une résolution spatiale de 1 km pour le modèle de surface et de 250 m pour le réseau hydrographique.

Le NWM fournit des indications de prévisions de plusieurs façons, comme le montre la figure 9 (Office of Water Prediction du NWS-NOAA, 2019). Le modèle exécute des analyses horaires non appariées (simulation des conditions du moment) pour assurer la mise à jour des conditions régnantes. Les prévisions déterministes à court terme couvrant une période de 18 heures sont exécutées toutes les heures, tandis que les prévisions déterministes à moyen terme, qui vont jusqu'à 10 jours, sont produites quatre fois par jour. Est également produite, une prévision à longue échéance (30 jours) fondée sur des ensembles quotidiens, quatre des 16 membres de tous les ensembles étant traités aux six heures.



Figure 9. Configuration du modèle hydrographique national (Office of Water Prediction de la NOAA; consulté pour la version anglaise le 20 octobre 2019).

Le NWM est déjà opérationnel au sein du NWS, mais il n'a pas été calibré pour toutes les zones. Ce projet se trouve donc à améliorer le NWM dans le bassin du lac Champlain parce qu'il en assure la calibration au vu des observations locales afin de fournir des prévisions exactes des apports dans le lac, et d'améliorer les prévisions pour tous les cours d'eau du bassin. Un modèle de réseau de grande qualité (c.-à-d. un ensemble de données spatiales comprenant le réseau de cours d'eau et de réservoirs, la géométrie et la rugosité du chenal, ainsi que la topographie) a été élaboré pour le bassin, ce qui a permis d'améliorer le modèle d'écoulement hydrographique et d'intégrer des données topographiques récentes. Ce modèle de réseau a été calibré par rapport aux données historiques et a été intégré à la version 2.1 du NWM en 2021.

4.2.6 Composante du niveau d'eau d'ECCC : Modèle de bilan hydrologique (MBH)

Le Modèle de bilan hydrologique d'ECCC fait office de solution de recharge simple (par rapport au modèle hydraulique H2D2 décrit ci-dessous) pour la conversion en débit entrant dans la rivière Richelieu des apports d'eau et du niveau actuel du lac Champlain. Dans un contexte opérationnel où les prévisionnistes surveillent et corrigent quotidiennement les biais, ce genre d'outil se prête à une utilisation rapide à partir de multiples indications (c.-à-d. les apports d'eau). De plus, toute modification nécessaire en lien avec les décisions de gestion relatives à un ouvrage de régularisation peut être rapidement ajustée. Le MBH ne tient pas compte de l'effet du vent, mais il peut être couplé au modèle de l'ETS (décrit plus bas dans le présent rapport) pour fournir des prévisions de débit dans la rivière Richelieu.

Ce modèle est fondé sur la conservation de l'équation de masse. Les équations détaillées sont données à l'ANNEXE E - Équations détaillées et fonctionnement du modèle du bilan hydrologique.

4.2.7 Composante du niveau d'eau d'ECCC : H2D2

L'équipe chargée de l'étude a utilisé le modèle hydrodynamique élaboré en 2015 dans le cadre de la démonstration d'une trousse de prévisions opérationnelles par le Groupe de travail technique international sur le lac Champlain et la rivière Richelieu (Boudreau et al., 2015a, 2015b). Le groupe de travail a produit des cartes de zones inondables en fonction de divers scénarios de débit et de niveau d'eau, de Rouses Point (pris en tant que point sur le lac Champlain) jusqu'au barrage de l'île Fryer, en aval. La limite aval du secteur à l'étude a été dictée par la qualité des données bathymétriques. Après amélioration des données bathymétriques pour le secteur nord du barrage de l'île Fryer, le modèle a été étendu jusqu'à sa limite aval, à Sorel.

L'hydrodynamique du système était représentée par un modèle hydraulique bidimensionnel, H2D2, mis au point

par l'INRS-ÉTÉ en collaboration avec ECCC. Le modèle permet de résoudre les équations bidimensionnelles de Navier-Stokes (équations de Barré de Saint-Venant). Comme tous les modèles bidimensionnels, H2D2 utilise des informations intégrées de profondeur et ne permet que des variations dans les axes x et y d'un repère orthonormé. De plus amples renseignements sur le modèle se trouvent dans le rapport autonome H2D2 de l'étude du bassin LCRR de la CMI.

4.2.8 Modèle hydrodynamique du lac Champlain aux États-Unis : FVCOM

Il s'est avéré difficile, dans les prévisions de niveau d'eau du lac Champlain, de tenir compte des effets du vent. Cela s'explique par le fait que le modèle de prévision actuel de la NOAA pour le lac est un modèle hydraulique unidimensionnel HEC-RAS relativement simple. Cette version du modèle HEC-RAS est conçue pour calculer le débit des cours d'eau et des canaux en fonction des sections transversales et des apports hydrologiques, mais il ne peut pas tenir compte des effets du vent sur les niveaux d'eau. La procédure de calcul de base sur la version du modèle HEC-RAS appliquée au lac Champlain consiste à établir le débit en régime transitoire, ce qui donne un profil unidimensionnel de la surface de l'eau dans tout son domaine. Cependant, le niveau d'eau du lac Champlain qui détermine celui de la rivière Richelieu et les conditions de crue, sont affectés non seulement par les apports hydrologiques, mais aussi par les vents et les vagues. Le vent qui balaie la surface du lac Champlain pousse l'eau vers les berges (ondes de tempête) et génère de grosses vagues. Il peut ainsi s'installer, entre les deux extrémités du lac, des différences de niveau de plusieurs pieds sous l'effet de forts vents, les vagues pouvant alors atteindre cinq pieds. Les seiches aussi sont le résultat de vents canalisés dans l'axe nord-sud du lac, ce qui provoque d'importantes ondes qui oscillent ensuite d'un bout à l'autre du lac. Si ces conditions se produisent alors que le niveau du lac est déjà élevé (en raison d'importants apports d'eau), les berges peuvent subir de graves dommages, et le niveau d'eau élevé risque de se propager en aval, le long de la rivière Richelieu. De plus, l'englacement du lac en hiver

peut avoir une incidence sur les berges et les conditions de crue. La glace modifie l'effet du vent qui balaie le lac, et les glaces de rive peuvent offrir une protection contre les vagues.

Afin d'améliorer la prévision des crues du lac Champlain, la NOAA a élaboré un nouveau modèle d'indication des prévisions pour le lac. Premièrement, un modèle tridimensionnel de circulation hydrodynamique a été mis au point. Ce modèle, qui est une application du Finite Volume Community Ocean Model (FVCOM), produira des prévisions tridimensionnelles des niveaux, des courants et des températures du lac. Des prévisions à cinq jours seront émises quatre fois par jour pour le lac, selon une résolution spatiale de plusieurs centaines de mètres. En utilisant comme intrants, les apports des rivières et les prévisions météorologiques, ce modèle prédira les changements de conditions lacustres causés non seulement par les apports des tributaires, mais aussi par le vent, la pression atmosphérique et la température de l'air.

4.2.9 Modèle des vagues du lac Champlain aux États-Unis : WAVEWATCH III

En marge du développement du FVCOM, le système de modélisation des vagues utilisé pour les Grands Lacs a été élargi pour inclure le lac Champlain afin de prévoir les conditions des vagues dues au vent, car elles peuvent avoir une incidence importante sur les inondations. Ce système, qui est une mise en œuvre du modèle WAVEWATCH III®, sera exécuté toutes les heures pour fournir des prévisions à cinq jours de la hauteur remarquable des vagues et de leur orientation principale. Le modèle des vagues utilise la même grille que celle du modèle FVCOM du lac Champlain, il est régi par les mêmes forçages météorologiques que le modèle hydrodynamique et il est alimenté par les prévisions des

niveaux d'eau du FVCOM qui auront un effet sur l'état de la houle. Les prévisionnistes s'appuient sur ces prévisions concernant les vagues pour se prononcer à propos de leur impact sur les berges du lac, ce qui s'entend des dommages et des inondations supplémentaires qui pourraient être causés par la surcote due aux vagues.

4.2.10 Modèle de l'ETS

Le Modèle de l'ETS est un modèle de post-traitement spécialement conçu pour prévoir l'augmentation du niveau d'eau à Rouses Point sous l'effet du vent, phénomène qui peut influer sur les prévisions. Il a été élaboré par l'École de Technologie Supérieure (ETS) dans le cadre de l'étude sur le bassin LCRR afin de fournir un outil simple de prévision de la surcote due au vent à Rouses Point. Le modèle est alimenté par la vitesse et par la direction du vent sur le lac, ainsi que par les rafales et par la différence de pression atmosphérique entre les deux extrémités du lac. Ce modèle pourrait être utilisé pour tenir compte de l'effet du vent quand les prévisions de la NOAA n'en tiennent pas compte ou que d'autres prévisions de niveau sont utilisées, comme celles du modèle du bilan hydrologique.

Trois modèles de surcote due au vent ont été testés (désignés : A, A modifié et B) comme le montre la figure 10, et c'est, en fin de compte, le modèle B qui a été choisi et qui est devenu le Modèle de l'ETS. Les intrants du modèle A sont la vitesse et la direction du vent en un seul point du lac. Le modèle A modifié ajoute une constante de correction du biais produit par la variation du niveau statique entre la pointe nord et la pointe sud du lac. Enfin, le modèle B retenu par l'ETS, exploite les mêmes données que le modèle A, mais pour plus d'un emplacement et tient compte des rafales de vent.

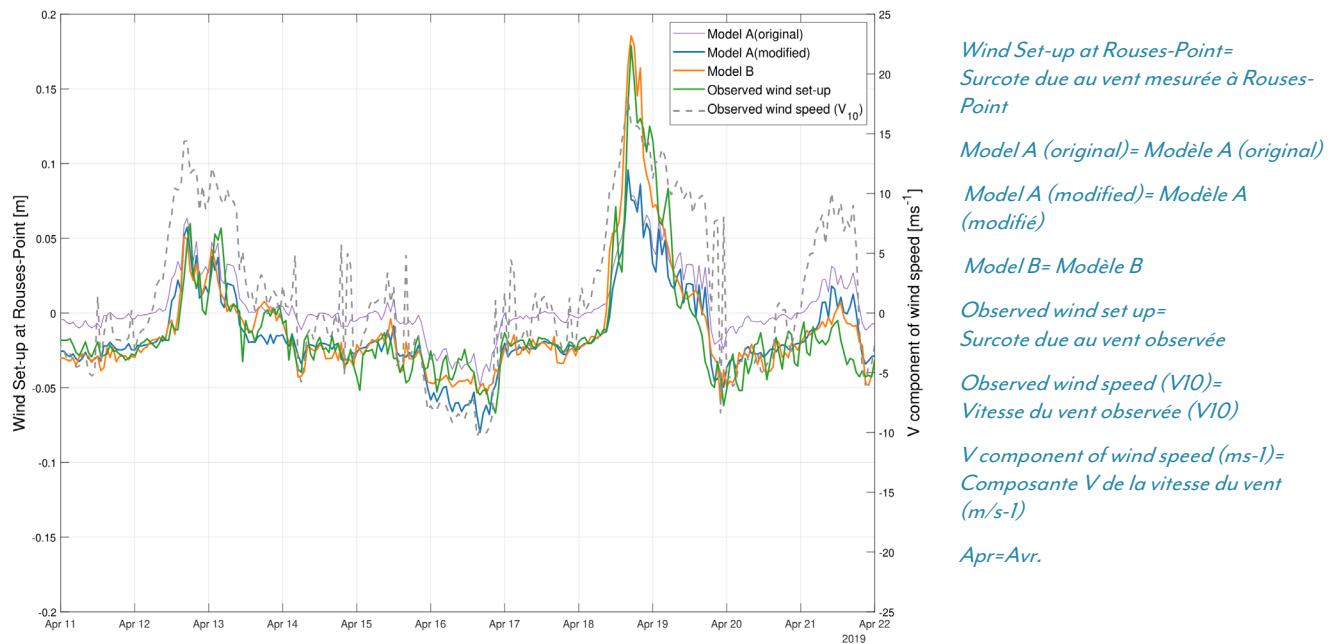


Figure 10. Comparaison des différents modèles de surcote due au vent⁴

4.2.11 Outils de cartographie Info-Crue et communication de l'information au MELCC

L’élaboration d’un outil de cartographie et de diffusion de l’information exige une collaboration poussée avec les organismes ou les ministères qui ont compétence en matière de diffusion de l’information relative aux répercussions des inondations et à la sécurité publique (soit le MSP au Québec). Le projet Info-Crue⁵ vise à améliorer et à consolider les connaissances sur l’évolution des zones inondables et à rendre l’information cartographique disponible afin de faciliter la prise de décisions. Dans le cadre du projet Info-Crue, et en collaboration avec le MSP, le MELCC produira des prévisions cartographiques des inondations, c.-à-d. des cartes de l’étendue prévue des inondations dans les jours qui suivent. La conception d’un tel produit n’est pas

encore arrivée à terme, mais l’Université du Québec à Rimouski mène actuellement des consultations dans le cadre d’un projet de recherche.

Au printemps 2021, le produit Info-Crue a été mis à l’essai sur la plateforme Vigilance du MSP dont l’accès a été limité au personnel du ministère. Info-Crue a émis une prévision du maximum atteint pour le premier et le second jour de l’horizon de prévisionnel. Deux scénarios ont été rendus disponibles : un scénario de niveau médian et un scénario de niveau élevé pour lequel une probabilité de 75 % de non-dépassement a été établie. Une carte a été créée pour chaque journée faisant l’objet d’une prévision pour illustrer la profondeur de la crue au débit maximal durant cette journée. La figure 11 donne un exemple de prévision actuellement produite par Info-Crue.

⁴ Amélioration du modèle de surcote due au vent pour la prévision des inondations autour du lac Champlain, 2020 - Loiselle et al., en attente de publication.

⁵ <https://www.cephq.gouv.qc.ca/zones-inond/info-crue/index.htm>

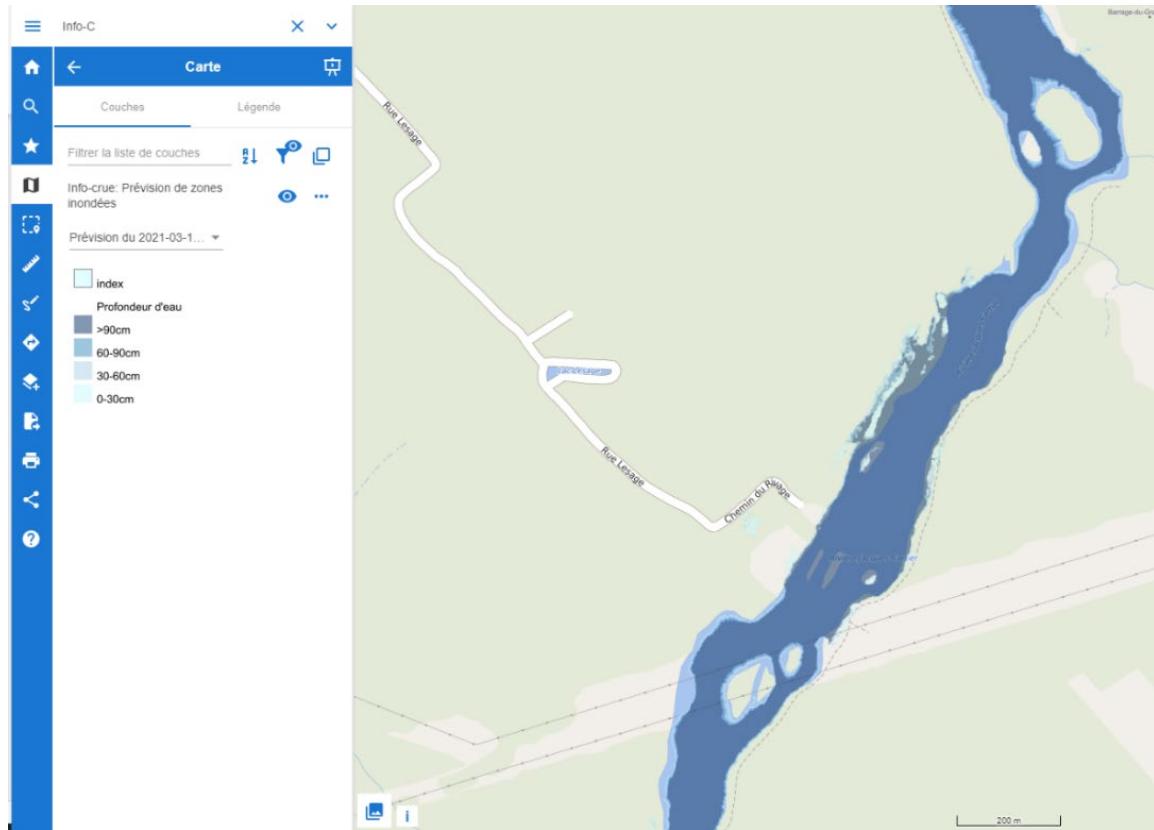


Figure 11. Exemple de produit Info-Crue pour la rivière Jacques-Cartier (Québec) (anglais seulement).

Le réseau LCRR ne sera pas couvert par le produit Info-Crue en 2021. Cependant, les résultats du travail de modélisation hydrodynamique obtenus à la faveur de cette étude par le GT-HHC sont fournis au MELCC, permettant le déploiement de l'outil Info-Crue sur la rivière Richelieu. Le MELCC combinera ensuite la modélisation d'autres affluents inclus dans le projet. Ce nouveau produit de cartographie des zones inondables sera déployé graduellement sur différentes rivières (y compris la rivière Richelieu) de la province de Québec et sera terminé d'ici 2023.

Il est important de noter que le projet Info-Crue permettra d'évaluer l'incertitude et qu'il sera probabiliste, ce qui veut dire que plus d'un scénario (actuellement deux) seront disponibles à des fins de cartographie, chacun étant associé à une probabilité.

Un projet de recherche se fait actuellement en liaison avec l'Université du Québec à Rimouski. Celui vise à mener une vaste consultation des organismes, des municipalités et des groupes de citoyens afin de déterminer la meilleure façon de présenter l'information.

4.2.12 Outils de cartographie et diffusion de l'information à la NOAA

En marge de l'amélioration des indications destinées aux modèles de prévision des crues, il est envisageable de mettre au point de nouveaux produits prévisionnels. Le NWS de la NOAA a la capacité d'héberger des cartes statiques de zones inondable sur les pages Web de l'AHPS (<https://water.weather.gov/ahps/inundation.php>). Le NWS a adopté un processus normalisé pour la création de cartes de zones inondables (Dewberry, 2011) que l'USGS a utilisées pour le lac Champlain, dans le cadre

de travaux déjà financés par la CMI (Flynn et Hayes, 2019). Au cours de cette étude, des limites statiques d'inondations ont été établies pour 11 niveaux d'inondation sur les rives du lac Champlain, dans les comtés de Franklin, de Chittenden, d'Addison, de Rutland et de Grand Isle (Vermont), et dans les comtés de Clinton, d'Essex et de Washington (New York). Les cartes de zones inondables qui en résultent peuvent être référencées à n'importe laquelle des quatre jauge actives de l'USGS sur le lac Champlain (jauge 04295000 de l'USGS à Rouses Point (NY), pour le lac Champlain et la rivière Richelieu; Jauge 04294500 de l'USGS de Burlington (VT), pour le lac Champlain; jauge 04279085 de l'USGS au nord de Whitehall (NY), pour le lac Champlain; et jauge 04294413 de Port Henry (NY), pour le lac Champlain. Les cartes des zones inondables sur les bords du lac Champlain ont également été ajoutées au Flood Inundation Mapper (FIM) de l'USGS en ligne ([FIM.WIM.USGS.GOV/fim/](#)). Le FIM permet aux usagers d'explorer l'ensemble des cartes de zones inondables qui montrent les secteurs où une inondation se produirait au vu de l'état du cours d'eau sélectionné. Le FIM de l'USGS aide les collectivités à visualiser les scénarios possibles d'inondations, à repérer les zones et les ressources qui pourraient être à risque, et à améliorer les efforts d'intervention locale en cas d'inondation. Il faudra effectuer d'autres travaux pour transférer ces cartes de zones inondables à l'AHPS de la NOAA, s'assurer qu'elles sont référencées par rapport au système de référence altimétrique approprié et les intégrer aux services Web du NWS.

La figure 12 montre un site de cartes de zones inondables de l'AHPS existant pour Waterbury (Vermont), d'après les travaux effectués en dehors de cette étude. Le site de l'AHPS affiche des cartes statiques des niveaux d'inondation pour un tronçon donné de la rivière Winooski (dans ce cas). L'usager peut choisir entre les niveaux d'inondation, les catégories de crue (c.-à-d. mineure, modérée ou majeure) et les niveaux actuels ou prévus de la rivière.

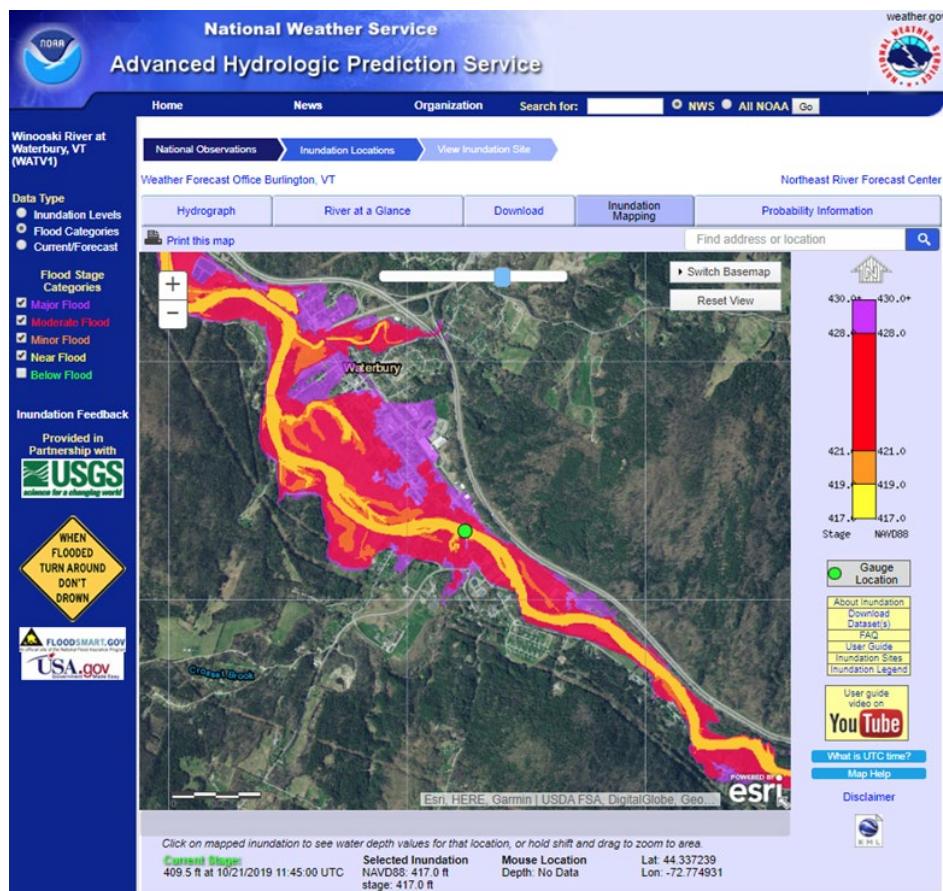


Figure 12. Carte statique des inondations de l'AHPS du NWS pour la rivière Winooski à Waterbury (Vermont) (anglais seulement).

L'Office of Water Prediction (OWP) du NWS a également élaboré une méthode de cartographie dynamique des inondations fondée sur le modèle NWM, à l'aide de la méthode HAND (pour Height Above Nearest Drainage⁶). Cette technique a été reprise pour tous les emplacements riverains où est appliqué le modèle NWM aux États-Unis continentaux et a permis de tirer parti des mises à niveau du NWM que cette étude a effectuées pour le bassin LCRR. La méthode HAND permet de cartographier l'étendue maximale prévue d'une inondation dans le bassin. Toutefois, le NWM n'intègre actuellement pas les prévisions de niveaux d'eau fournies par des modèles lacustres ou côtiers comme le modèle FVCOM du lac Champlain. Il faudra parvenir à coupler les modèles afin d'intégrer les prévisions hydrodynamiques des niveaux d'eau et des vagues dans l'approche de cartographie dynamique des inondations du NWS. D'ici-là, l'approche décrite précédemment — qui repose sur des cartes statiques de zones inondables en bordure du lac Champlain — sera en place aux différentes stations hydrométriques sur les rives du lac.

4.3 ANALYSE DES ÉCARTS ET MESURES NÉCESSAIRES

Compte tenu des exigences, des modèles existants, des modèles en cours de développement ainsi que des capacités et des services actuels présentés ci-dessus, il est possible d'analyser les écarts entre la situation actuelle et le SPC recommandé. Le tableau 1 présente cette analyse en indiquant les mesures prévues et nécessaires pour réaliser le SPC recommandé.

4.3.1 Obstacles de nature technique

Étant donné que la plupart des outils de modélisation permettant de répondre aux exigences du SPC recommandé existaient déjà ou ont été élaborés au cours de l'étude, rien d'important sur un plan technique ne s'oppose au parachèvement du modèle. Cependant,

l'opérationnalisation des modèles exige une planification et un travail technique poussés qui peuvent être aussi importants que l'élaboration des modèles elle-même et qui ne doivent pas être pris à la légère.

De plus, pour intégrer de nouveaux modèles aux opérations, il faut souvent en évaluer la performance par rapport à ce qui est déjà utilisé. Certains problèmes techniques n'apparaissent souvent que dans un contexte opérationnel quotidien.

Enfin, des recherches additionnelles pourraient s'imposer pour traiter de l'intégration d'indications de prévisions multiples. Une certaine collaboration entre ECCC/MELCC et le milieu universitaire est déjà en cours. Cependant, comme il s'agit d'un aspect relativement nouveau de la prévision opérationnelle des crues, il est important que la recherche continue de contribuer à des bases scientifiques solides.

4.3.2 Obstacles de nature institutionnelle

Bien qu'aucun obstacle technique majeur ne s'oppose à l'adoption de mesures visant à combler les écarts entre le SPC actuel et le SPC recommandé, les contraintes institutionnelles peuvent nécessiter des étapes supplémentaires.

Comme nous l'avons vu, étant donné que la prévision des crues relève d'un mandat fédéral aux États-Unis, la NOAA emploie un système national très structuré assorti d'un processus officiel d'examen et d'approbation. De l'autre côté de la frontière, l'équipe de prévision du MELCC est plus autonome au niveau de la province, mais, même si elle bénéficie de la collaboration d'ECCC, ses capacités de déploiement sont limitées, car elle doit s'occuper en même temps des opérations quotidiennes, de l'entretien des systèmes et des projets de R-D.

⁶ Que l'on pourrait traduire par hauteur au-dessus du point de drainage le plus proche.

À proprement parler, il est tout à fait envisageable de mettre en œuvre le SPC recommandé, mais il est difficile de savoir exactement quand il sera en place. En effet, les divers organismes (MELCC, ECCC et NOAA) doivent tous intégrer les diverses mesures requises dans leurs propres plans et projets, en fonction de leurs contraintes opérationnelles respectives. On s'attend à ce qu'il faille des années avant que toutes les étapes nécessaires à la transition de la modélisation et des mises à niveau des produits soient terminées. Cependant, certaines améliorations du projet sont déjà opérationnelles et la plupart sont disponibles par l'entremise de plateformes expérimentales. L'une des façons de coordonner l'amélioration de la capacité prévisionnelle du gouvernement fédéral à l'échelon national consiste à recourir à l'accord bilatéral entre la NOAA et ECCC. Cet accord bilatéral est un mécanisme en vertu duquel les organismes météorologiques fédéraux respectifs coordonnent les activités d'observation et de prévision transfrontières qui sont avantageuses pour les deux pays. Les recommandations relatives aux systèmes nationaux de modélisation et de prévision, y compris les produits et les services liés aux inondations, qui sont formulées par le Groupe d'étude LCRR, peuvent être fondés sur cette entente en ce qui a trait à la coordination et à l'amélioration conjointe des systèmes de prévision des crues pour le lac Champlain. Le recours à l'accord bilatéral entre les organismes mentionnés pourrait, par exemple, ouvrir la voie à l'adoption de systèmes d'envergure nationale permettant d'émettre des indications de modèles d'écoulement probabilistes binariaux, ou du moins interreliés.



Tableau 1. Analyse des écarts par rapport aux exigences du SPC.

EXIGENCE	ANALYSE DES ÉCARTS	ACTION NÉCESSAIRE
<p>Les prévisionnistes du MELCC et de la NOAA doivent assurer la cohérence des prévisions des deux côtés de la frontière et publier des prévisions officielles limitées à leur territoire respectif.</p>	Aucun écart	Aucun
<p>Utilisation de prévisions météorologiques déterministes pour les prévisions à court terme (quelques jours) et de prévisions d'ensemble pour les prévisions à long terme. Les variables requises sont : les précipitations, la température et le vent.</p>	Aucun écart	Aucun
<p>La modélisation hydrologique doit prendre en compte la modélisation de l'accumulation de neige et de la fonte des neiges. Les modèles peuvent être simulés à l'aide d'un scénario météorologique déterministe dans le cas des prévisions à court terme (quelques jours) en raison du peu de divergence entre les prévisionnistes météorologiques et les prévisions d'ensemble dans le cas des prévisions à long terme qui présentent une grande incertitude sur le plan des conditions météorologiques.</p>	<p>- La modélisation hydrologique au Canada faisant appel à des prévisions météorologiques d'ensemble à long terme est limitée.</p> <p>- Il existe des algorithmes d'accumulation/ablation de la neige pour les modèles globaux de bassins hydrographiques existants et pour le NWM (WRF-Hydro). Les algorithmes du modèle NWM continuent d'être ajustés afin d'améliorer les résultats. Les prévisions actuelles de l'ensemble HEFS sont disponibles quotidiennement. Les simulations à long terme WRF-Hydro (30 jours) sont exécutées avec 16 membres d'ensemble (4 par intervalle de 6 heures).</p>	<p>- Le MELCC devrait exécuter HYDROTEL à partir de prévisions météorologiques d'ensemble à long terme pour le domaine du bassin LCRR. Pour le moment, HYDROTEL ne tourne qu'à partir de prévisions météorologiques déterministes à court terme.</p> <p>- ECCC devrait continuer de chercher à faire passer le SPENA du niveau expérimental au niveau opérationnel en appliquant les prévisions météorologiques d'ensemble à long terme au domaine du bassin LCRR. Pour le moment, le SPENA ne produit pas de prévisions d'ensemble.</p> <p>- Le National Water Center de la NOAA devrait continuer de mettre à jour les algorithmes d'accumulation/ablation de la neige du modèle NWM (WRF-Hydro) afin d'améliorer les prévisions hydrologiques.</p>

EXIGENCE	ANALYSE DES ÉCARTS	ACTION NÉCESSAIRE
<p>Il est recommandé d'employer une combinaison de modèles hydrodynamiques simples et complexes. Pour les prévisions à court terme, il faut inclure les effets du vent et des vagues. Pour les prévisions à long terme, les effets du vent et des vagues peuvent être inclus en attendant les évaluations appropriées de la performance.</p> <p>La modélisation hydrodynamique devra prendre en compte les mesures d'atténuation de nature structurelle. Le SPC doit permettre la simulation des effets des modifications en temps réel apportées au réseau LCRR (p. ex., application des règles de gestion, modification des conditions limites).</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Aucun des modèles hydrodynamiques actuellement disponibles au Canada ne couvre la totalité du bassin LCRR. -Les modèles hydrodynamiques et éoliens/vagues sont exploités en mode expérimental (c.-à-d. autrement que sur du matériel opérationnel). -Les mesures d'atténuation ou la mise en œuvre de règles de gestion entraîneraient des changements aux débits projetés de la rivière Richelieu, qui seraient ensuite intégrés à la limite aval pour le modèle FVCOM. 	<ul style="list-style-type: none"> -Le MELCC devrait mettre le modèle de bilan hydrologique en exploitation et l'utiliser à partir des apports d'HYDROTEL et du SNPSR (Système national de prévision de surface et de rivières) selon des prévisions déterministes et des prévisions d'ensemble. En cas de mise en œuvre d'une structure de dérivation, il faudra pouvoir créer des scénarios et appliquer des règles de gestions. -ECCC devrait exécuter le modèle H2D2 en utilisant le forçage d'ensemble du SNPSR et les prévisions de vent d'ensemble, et devrait produire des indications de prévision au MELCC aux fins d'intégration. Si un dérivé est mis en œuvre, le modèle H2D2 devra comporter des règles de gestion. - Afin de les rendre opérationnels, la NOAA devra transférer les modèles FVCOM et WAVEWATCH III de leurs plateformes autonomes à distance actuelles à la plateforme opérationnelle (sur le super-ordinateur WCOSS du NCEP).
<p>Les prévisionnistes de la NOAA et du MELCC doivent assurer la cohérence entre les prévisions officielles en recourant à l'assimilation des données, au post-traitement et à l'intégration des prévisions d'orientation. De nouvelles méthodes devront être élaborées à mesure que de nouveaux modèles deviendront opérationnels.</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Seule l'intégration manuelle des prévisions d'orientation est actuellement possible pour produire des prévisions officielles dans le MELCC. -Le post-traitement de l'effet du vent doit également être effectué manuellement par le MELCC 	<ul style="list-style-type: none"> -Le MELCC et ECCC devraient poursuivre leur collaboration en matière de recherche afin d'élaborer une intégration plus officielle des indications de prévisions comprenant une évaluation de l'incertitude. -Le MELCC devrait mettre en œuvre le Modèle de l'ETS à son niveau. -La NOAA et le MELCC devraient poursuivre leur collaboration en matière de prévisions et assurer une transition harmonieuse vers l'adoption de nouveaux modèles.

EXIGENCE	ANALYSE DES ÉCARTS	ACTION NÉCESSAIRE
<p>L'évaluation de l'incertitude devrait accompagner les prévisions de niveau et de débit d'eau (à court et à long terme). Cette incertitude devrait être exprimée sous la forme d'une limite supérieure et d'une limite inférieure (associées à des probabilités dans chaque cas) autour d'un scénario central (soit la médiane, soit le mode).</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Les prévisions officielles du MELCC comprennent déjà l'élément incertitude, mais la méthode ne convient pas à l'intégration des prévisions d'ensemble et des indications. -La NOAA fournit actuellement des évaluations de l'incertitude (par le biais du HEFS) aux points de prévision avec modèles hydrologiques globaux et hydrauliques. Les évaluations futures de l'incertitude pour les points de prévision modélisés de façon hydrodynamique dépendront de la disponibilité des ressources matérielles (pour la réalisation de multiples essais de membres d'ensemble). 	<ul style="list-style-type: none"> -Le MELCC et ECCC devraient poursuivre la collaboration en matière de recherche afin de parvenir à une intégration plus officielle des indications de prévisions comprenant une évaluation de l'incertitude. -La NOAA devrait continuer de surveiller les progrès réalisés sur le plan de la disponibilité des ressources matérielles et de l'évolution des vitesses de traitement pouvant permettre de nombreuses simulations de modèles hydrodynamiques en vue de l'exécution éventuelle d'ensembles hydrodynamiques.
<p>La prévision des crues et l'incertitude qui s'y rattache devraient être présentées sous forme de cartes pour être facilement comprises et visualisées. Ces cartes devraient afficher les profondeurs d'eau et être associées à une probabilité de dépassement (incertitude). Les cartes d'impacts des inondations pourraient être utilisées à l'intérieur ou à l'extérieur du SPC, selon leur utilisation.</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Seules des cartes statiques de zones inondables établies pour 11 altitudes de surface d'eau ont été élaborées pour les parties canadiennes et américaines du bassin LCRR. -Aucune carte supplémentaire de prévision des crues n'est actuellement disponible au Canada. -Le National Water Center de la NOAA produit des cartes de zones inondables à partir du modèle NWM (WRF-Hydro), mais le NWC n'a pas encore produit de cartes à partir des prévisions d'élévation de la surface de l'eau établies par d'autres modèles externes (p. ex., FVCOM). -Aucune autre carte de prévision des crues n'est actuellement disponible aux États-Unis. 	<ul style="list-style-type: none"> -Le MELCC devrait déployer des outils de cartographie Info-Crue pour la rivière Richelieu. -La NOAA devrait produire des cartes de zones inondables en établissant un lien entre les niveaux prévus du lac et les cartes statiques d'inondations produites avant l'étude de la CMI. -La NOAA devrait poursuivre ses recherches sur l'utilisation du modèle de réseau du NWM ainsi que sur l'élévation de la surface de l'eau à partir de modèles externes (p. ex., FVCOM) pour ce qui est de l'application de la méthode HAND devant permettre de prévoir l'étendue des inondations.
<p>Les produits comme les cartes et les graphiques doivent être mis à la disposition des usagers finaux par l'entremise du Web, en même temps que les prévisions.</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Aucune prévision probabiliste à long terme n'est actuellement disponible au Canada -Pour Rouses Point (NY), aux États-Unis, seules les prévisions du HEFS sur 10 jours et les prévisions de 	<ul style="list-style-type: none"> -Le MELCC devrait fournir des prévisions probabilistes à long terme en intégrant les prévisions du SNPSR-H2D2, d'HYDROTEL-MBH et de la NOAA à long terme.

EXIGENCE	ANALYSE DES ÉCARTS	ACTION NÉCESSAIRE
<p>Les prévisions à court terme (2 à 5 jours) devraient être détaillées sous forme de graphiques et de cartes et comprendre des évaluations de l'incertitude (c.-à-d. énoncer la probabilité associée au scénario principal et présenter une fourchette de valeurs). Des prévisions à long terme sont nécessaires, mais elles doivent alors être probabilistes. Leur niveau de détail doit être cohérent avec la compétence en prévision.</p>	<p>probabilité de dépassement de 90 jours sont actuellement disponibles. Ces prévisions sont générées à l'aide du modèle HEC-RAS actuel du lac Champlain.</p> <p>-Aucune prévision probabiliste à long terme reposant sur des modèles hydrodynamiques n'est actuellement disponible pour le lac Champlain.</p>	<p>-La NOAA devrait continuer de surveiller les progrès réalisés sur le plan de la disponibilité des ressources matérielles et de l'évolution des vitesses de traitement pouvant permettre de nombreuses simulations de modèles hydrodynamiques en vue de l'exécution éventuelle d'ensembles hydrodynamiques.</p>
<p>Les prévisionnistes du MELCC et de la NOAA doivent assurer la cohérence des prévisions des deux côtés de la frontière et publier des prévisions officielles limitées à leur territoire respectif.</p>	<p>Aucun écart</p>	<p>Aucun</p>

5 GOUVERNANCE DU SYSTÈME DE PRÉVISION DES CRUES DANS LE BASSIN LCRR

La nature binationale du système de prévision ne nécessite pas de mécanisme de gouvernance spécial autre que la collaboration actuelle entre le MELCC et le NERFC. Les deux organismes émettent des prévisions pour différents emplacements et veillent à ce qu'elles soient cohérentes. Du côté canadien, le système de prévision des crues serait exploité au sein de différentes organisations (certains modèles fonctionnant au sein d'ECCC, d'autres au sein du MELCC), mais en fin de compte, les prévisionnistes du MELCC valideraient les prévisions officielles.

Aux États-Unis, le système de prévision des crues serait exploité par le NERFC et le National Center for Environmental Prediction (NCEP) du NWS. Les prévisions seraient conjointement émises par le NERFC et le WFO de Burlington (Vermont). Les modèles globaux concernant les bassins des affluents continueront d'être exécutés par le NERFC, à partir des données du modèle hydrographique national du NCEP. Les composantes de modélisation FVCOM et WAVEWATCH III du système de prévision des crues seront exécutées par le NCEP, et les données d'entrant pour les emplacements de prévision explicites (y compris Rouses Point, New York) seront fournies au système de prévision du NERFC. En fin de compte, ce sont les prévisionnistes du NERFC qui valideraient les prévisions officielles de Rouses Point.

Il serait possible d'activer une solution d'atténuation des inondations (comme une dérivation) en fonction des prévisions. Cependant, en cas d'ordres de gestion fondés sur des observations, les prévisions ne seraient pas nécessaires. Dans ce cas, le gestionnaire utiliserait les prévisions officielles comme guide pour planifier les opérations futures.

En ce qui concerne les prévisions, l'échange d'indications devrait se faire automatiquement chaque jour. Au Québec, le MELCC exigerait le transfert des données opérationnelles d'exécution du SNPSR et du H2D2 de

Maestro au SPH (Système de prévision hydrologique). Aux États-Unis, le transfert des données de forçage du modèle atmosphérique pour les simulations concernant les bassins hydrographiques des affluents se poursuivrait tel qu'il est actuellement mis en œuvre au NERFC. Le transfert des données de forçage des modèles atmosphériques (précipitations, températures, vent) pour les modèles FVCOM et WAVEWATCH III se ferait dans l'environnement de modélisation du super-ordinateur du NCEP.

Au Canada, les gestionnaires de la dérivation seraient tenus de participer aux téléconférences de l'OSCQ (organisme de sécurité provincial) et de l'ORSC (organisme de sécurité régional) avant et pendant des épisodes de crue, au même titre que les gestionnaires de barrages. Un échange quotidien direct serait également nécessaire entre les prévisionnistes du MELCC et les gestionnaires de la dérivation pour assurer une cohérence entre les prévisions et les décisions de gestion lors d'épisodes de crue. Du côté américain, il n'existe pas d'ouvrage régulateur sur le lac Champlain. La participation à la gestion des urgences durant des épisodes de crue demeurera telle qu'elle est actuellement définie par les organismes de gestion des urgences de l'État du Vermont et des comtés de Clinton, d'Essex et de Washington, dans l'État de New York.

Les prévisions de chaque pays sont produites par des institutions gouvernementales propres à chaque pays. Le contexte institutionnel de chaque gouvernement est décrit brièvement à la section 5.1. Les relations établies entre les deux pays en ce qui concerne les prévisions dépendent des mécanismes de gouvernance internationale. Trois options de gouvernance internationale sont présentées à la section 5.2 à l'attention du Groupe d'étude LCRR.

5.1 GOUVERNANCE NATIONALE DES PRÉVISIONS POUR LE LAC CHAMPLAIN ET LA RIVIÈRE RICHELIEU

Les prévisions des niveaux d'eau du lac Champlain sont établies par le NWS, qui fait partie de la NOAA. La cartographie des zones inondables autour du lac Champlain sera réalisée à partir de cartes déjà élaborées par l'USGS. Les modèles expérimentaux de prévision des niveaux d'eau mis au point par la NOAA, dont la démonstration a été faite dans le cadre de cette étude, devront être intégrés au système de prévision du NWS en plusieurs étapes devant aboutir d'ici 2024.

Au Canada, la prévision des crues est de compétence provinciale. Au Québec, c'est le MELCC qui est responsable de la production des prévisions. Le MELCC produit déjà des prévisions de niveau et de débit d'eau pour la rivière Richelieu. Le MELCC collaborera avec ECCC à la mise en œuvre des prévisions des crues afin d'apporter les améliorations recommandées dans le présent rapport.

5.2 CONSIDÉRATIONS ET OPTIONS EN MATIÈRE DE GOUVERNANCE INTERNATIONALE

Il existe tout un éventail d'options pour régir la prévision binational des crues qui est proposée ainsi que la diffusion des produits. Il peut s'agir d'ententes informelles prévoyant des interactions limitées ou d'un modèle de gouvernance très structuré et entièrement coordonné qui produit des prévisions communes. Ces types de modèles de gouvernance ont été appliqués à des systèmes semblables le long de la frontière canado-américaine, comme la gestion conjointe du débit des chutes Niagara. Le choix d'un modèle de gouvernance dépend en fin de compte des besoins et de la volonté des deux pays de collaborer à la gestion des niveaux d'eau du bassin LCRR à l'avenir.

Les options présentées s'articulent principalement autour d'ententes bilatérales conclues entre les organismes de prévision des crues. Le Comité d'étude LCRR explore également des modèles de gouvernance de plus grande portée pour le bassin, comme un conseil de la CMI ou, en attendant l'inclusion d'un mandat sur la qualité de l'eau, un conseil des bassins hydrographiques de la CMI. S'il un de ces modèles était mis en œuvre, cela permettrait d'ajouter une autre dimension à la diffusion des informations concernant la prévision des crues dans ce bassin binational.

5.2.1 Option 1 : Modèle de gouvernance axée sur la communication informelle de la prévision des crues

Il s'agit là de la forme de collaboration la moins exigeante, puisqu'on parle d'un dialogue limité portant sur la communication bilatérale de données et de connaissances. Il revient, cependant, aux organismes concernés de déterminer s'ils vont coordonner leurs actions et de quelle façon en vue de modifier leurs prévisions respectives. C'est ainsi que les choses se font actuellement, et il est principalement question de simplement partager les données (p. ex., les données et les prévisions sur les niveaux d'eau à Rouses Point), surtout en période de crue. Ce modèle fonctionne bien depuis une dizaine d'années grâce à une collaboration efficace entre prévisionnistes de chaque côté de la frontière. En raison des mandats de prévision opérationnelle prévus dans les lois de chaque côté de la frontière, cette option pourrait fort bien demeurer viable pendant encore longtemps, car il est dans l'intérêt de chaque région de continuer à prévoir les inondations.

5.2.2 Option 2 : Modèle de gouvernance coordonnée en matière de prévision des crues

La modalité suivante repose sur une coordination et un dialogue continu et, par conséquent, sur un engagement supérieur sur le plan organisationnel. Chaque pays maintient son propre système et ses propres produits de prévision, mais coordonne chaque prévision. Cette formule peut améliorer l'exactitude des

prévisions grâce au partage des données. Un tel modèle permet aussi aux deux pays de continuer à utiliser leurs systèmes de mesure et de respecter leurs exigences linguistiques. Ce même modèle est déjà utilisé efficacement dans le réseau des Grands Lacs et du Saint-Laurent pour la prévision et la déclaration des niveaux d'eau, et il pourrait être appliqué de la même façon dans le bassin LCRR. Il est géré par un comité de coordination binational qui se réunit deux fois par année. On en trouvera une description détaillée ici :

<http://www.greatlakescc.org/wp36/fr/accueil/a-propos-de-nous/>. Cependant, les prévisions de niveau de l'eau des Grands Lacs se font sur des échelles temporelles beaucoup plus longues (allant du mois à la saison) que les prévisions météorologiques et les prévisions des crues (mises à jour toutes les six heures). Rien ne nous dit vraiment que ce modèle fonctionnerait mieux que l'option 1 pour assurer la cohérence entre les prévisions, car aucune lacune importante n'a été décelée dans le modèle actuel. Toutefois, ce modèle complexifie la coordination. En fin de compte, il incombe toujours aux prévisionnistes de la NOAA et du MELCC de produire et d'émettre les prévisions officielles, telles que définies par la loi.

5.2.3 Option 3 : Modèle de gouvernance conjointe en matière prévision des crues

Ce modèle de gouvernance exige un important degré d'engagement et de coordination. Il s'agit d'une entente sur la prévision binationale des inondations. Les rapports seraient toujours produits séparément en raison des systèmes de mesure et des différences linguistiques. Cette option nécessiterait la mise en place d'une structure de gouvernance officielle. Celle-ci pourrait également être axée sur la production d'une prévision d'ensemble conjointe plutôt que sur une prévision unique sur laquelle tous s'accordent, ce qui serait moins exigeant. La mise en œuvre d'un tel modèle serait révolutionnaire pour le secteur de la frontière canado-américaine, mais elle comporte de nombreux défis. Premièrement, un tel modèle constitue un bouleversement par rapport au modèle actuel. Son déploiement nécessiterait des discussions poussées avec

les organismes de prévision qui disposent de systèmes provinciaux (pour les uns) ou nationaux (pour les autres) complexes en matière de prévisions, ainsi qu'avec les administrations responsables. Deuxièmement, comme une entente est nécessaire, il faudrait adopter des procédures officielles et donc prévoir des retards dans l'émission des prévisions. Enfin, comme pour l'option 2, rien ne dit que ce modèle fonctionnerait mieux que l'option 1.

Les décisions relatives à l'exploitation d'une dérivation modeste (alternative 3) dépendront des valeurs observées et non des prévisions. La prévision des crues pourrait certes permettre d'anticiper l'ouverture de la dérivation, mais une analyse plus poussée après la mise en œuvre éventuelle de cette alternative pourrait se justifier.

5.3 LA PRÉVISION DES CRUES À L'APPUI DES STRUCTURES DE RÉGULARISATION DU DÉBIT

Il n'existe actuellement pas de structures de régularisation du débit dans le lac Champlain ni dans la rivière Richelieu. Le Groupe d'étude LCRR a envisagé un large éventail de solutions de nature structurelle, dont certaines destinées à réguler entièrement l'écoulement de la rivière Richelieu (Groupe d'étude LCRR, 2021c). Ce type de structure nécessiterait des prévisions de débit au titre de la gestion du plan de régularisation. Toutefois, ces solutions à grande échelle ont été rejetées par le Groupe d'étude pour diverses raisons.

Il a aussi été envisagé de miser sur le canal de Chambly pour dériver une partie de l'écoulement lors des crues printanières. D'autres travaux ont aussi porté sur l'excavation selective du haut-fond de Saint-Jean-sur-Richelieu afin de réduire les niveaux d'eau extrêmes, comme ceux de 2011.

Deux solutions structurelles prometteuses font actuellement l'objet d'une exploration plus poussée par le Groupe d'étude du bassin LCRR :

Mesure 1⁷: Excavation sélective du haut-fond de la rivière Richelieu et installation d'un seuil submergé.

Alternative 3 : Excavation sélective du haut-fond, installation d'un seuil submergé et dérivation d'un volume modeste par le canal de Chambly.

Il s'avère que la mesure 2, axée sur une dérivation optimisée (débit d'environ 400 m³/s), serait peu rentable. Cette solution aurait nécessité la prévision des crues pour appuyer le plan opérationnel.

La mesure 1 n'exige pas de prévision des crues. La modeste dérivation proposée pour la mesure 3 ne serait que de 80 m³/s environ, et les vannes seraient automatiquement ouvertes une fois qu'un niveau d'eau préétabli serait atteint à la marina de Saint-Jean-sur-Richelieu. Cette mesure pourrait nécessiter un certain niveau de prévision des crues en attendant une analyse plus poussée.



⁷ Les mesures mentionnées ici n'apparaissent pas dans l'ordre de leur numérotation, car elles sont extraites de la liste complète des mesures d'atténuation envisageables du rapport sur les solutions de nature structurelle (MGAI/HHC, 2021).

6 CONSTATATIONS ET RECOMMANDATIONS

À la suite des sujets abordés précédemment dans le présent rapport, voici un résumé des principales constatations :

- La production de prévisions de crues officielles pour le réseau LCRR relève de la responsabilité des prévisionnistes de crues de la NOAA (États-Unis) et du MELCC (Canada).
- Les prévisionnistes du MELCC et de la NOAA assurent la cohérence binationale des prévisions officielles qu'ils publient dans les limites de leurs champs de responsabilités respectifs.
- La prévision des crues officielle de la NOAA et du MELCC est binationale parce que les deux organismes la produisent en collaboration pour s'assurer que leurs messages ne soient pas contradictoires.
- Aux États-Unis, la prévision des crues est un mandat fédéral de la NOAA qui utilise un système national structuré et formel.
- Au Canada, la prévision des crues est un mandat provincial. L'équipe de prévisionnistes du MELCC est entièrement autonome; elle applique ses processus de prévision et collabore avec ECCC qui produit des prévisions hydrologiques opérationnelles à l'appui des mandats fédéraux autres que la prévision des crues.
- Les modèles à utiliser pour améliorer la prévision des crues ont été élaborés au cours de l'étude sur le bassin LCRR, mais toutes les mises à niveau de la modélisation n'ont pas encore été opérationnalisées.
- Aucun obstacle technique majeur ne s'oppose à la mise en œuvre du SPC recommandé. Cependant, la mise en œuvre opérationnelle de nouveaux modèles, produits et services pourrait prendre plusieurs années, selon la capacité du système et les échéanciers prévus.
- Les organismes responsables de la prestation de la prévision des crues sont soumis à des exigences techniques particulières fondées sur les systèmes nationaux ou provinciaux. Ces protocoles et normes doivent donc être respectés lors de l'élaboration du système de prévision des crues et de cartographie des inondations pour le bassin LCRR.
- Rien, sur le plan technique, ne justifie la modification du modèle de gouvernance actuel qui est satisfaisant. Pas plus cette étude que 10 années d'exploitation du modèle en place n'indiquent qu'il est nécessaire d'en changer.
- Aucune exigence particulière n'est liée à une structure de contrôle, du moins pas tant qu'il sera décidé de créer une dérivation modeste.

Sur la base de ces constatations et du reste du rapport, il est possible de formuler les recommandations suivantes :

- 1 Le système de prévision des crues devrait comporter toute une chaîne prévisionnelle (en météorologie, hydrologie, hydrodynamique, assimilation des données et post-traitement) apte à permettre à chaque organisme de prévision, agissant seul ou en collaboration avec d'autres, de produire des prévisions d'ensemble déterministes et à long terme pour l'ensemble du bassin LCRR. Il conviendrait de déployer des efforts particuliers pour mener à bien les mesures nécessaires (voir le tableau 1 – Analyse des écarts par rapport aux exigences du SPC).
- 2 Les extrants des différentes composantes de la chaîne de prévision devraient être facilement accessibles aux prévisionnistes de la NOAA et du MELCC aux fins d'intégration et pour assurer la cohérence binationale des prévisions (par ECCC, la NOAA et le MELCC).
- 3 Il convient de poursuivre les efforts de recherche et de développement touchant à l'intégration de multiples ensembles d'indications sur les prévisions afin de fournir une méthodologie améliorée pour le SPC proposé. Entre-temps, les prévisionnistes du MELCC et de la NOAA pourront continuer d'assurer l'intégration en utilisant l'approche manuelle pratique actuelle.
- 4 Les produits de prévision suivants devraient être mis à la disposition des usagers : 1) cartes de zones inondables à court terme précisant le degré d'incertitude (c.-à-d. des scénarios probabilistes) pour un horizon d'au moins deux jours (jusqu'à cinq jours si la performance est satisfaisante) et 2) des prévisions probabilistes à long terme sous forme de graphiques.
- 5 Une combinaison de modèles hydrauliques et hydrodynamiques (certains simples et d'autres complexes) pourrait être utilisée. Pour les prévisions à court terme jusqu'à cinq jours, les effets du vent et des vagues sur le niveau d'eau du lac Champlain doivent être inclus dans les prévisions de niveau du lac. Pour les prévisions à long terme, les effets du vent et des vagues peuvent être inclus en attendant les évaluations appropriées de la performance.
- 6 Les prévisionnistes de la NOAA et du MELCC doivent continuer de veiller à la cohérence binationale de leurs prévisions officielles respectives.
- 7 Si la 3^e proposition des mesures d'atténuation de nature structurelle était adoptée (excavation sélective du haut-fond, installation d'un seuil submergé et aménagement d'une modeste dérivation du canal de Chambly), le SPC devrait inclure les règles d'exploitation du seuil submergé et de la dérivation ainsi que leurs effets sur le bilan hydrologique du réseau. Les prévisions devraient également être communiquées au gestionnaire de ces structures avec une précision et un horizon prévisionnel appuyant les décisions nécessaires à la gestion des inondations.
- 8 La NOAA et le MELCC doivent maintenir leur collaboration sur les prévisions dans le cadre du modèle de gouvernance actuel. ECCC doit également mettre à la disposition de la NOAA et du MELCC les cycles opérationnels des composantes de la chaîne de prévision qu'il exécute (p. ex., NSRPS, H2D2). Les améliorations aux modèles nationaux et aux sources d'orientation des prévisions qui peuvent être combinées pour produire des prévisions probabilistes binationales des cours d'eau devraient être coordonnées dans le cadre de l'accord bilatéral NOAA-ECCC tout en veillant à ce que le producteur officiel des prévisions du MELCC soit respecté.

BIBLIOGRAPHIE

Carrera, M.L., S. Bélair et B. Bilodeau, 2015. The Canadian Land Data Assimilation System (Caldas): Description and Synthetic Evaluation Study, *Journal of Hydrometeorology*, 16-3.

Clemen, R.T., 1989. Combining forecasts: A review and annotated bibliography. *International Journal of Forecasting*, 5(4), p. 559-583.

Groupe de travail technique sur la gestion des inondations et les mesures d'atténuation et Groupe de travail technique sur l'hydrologie, l'hydraulique et la cartographie (GIMA/HHC), 2021. Solutions potentielles de nature structurelle pour atténuer l'ampleur des inondations dans le bassin du lac Champlain et de la rivière Richelieu. Rapport à la Commission mixte internationale. <https://ijc.org/fr/lcrr/solutions-potentielles-de-nature-structurelle-pour-attenuer-lampleur-des-inondations-dans-le>

Fortin, V., G. Roy, T. Stadnyk, K. Koenig, N. Gasset et A. Mahidjiba, 2018. Ten Years of Science Based on the Canadian Precipitation Analysis: A Capa System Overview and Literature Review, *Atmosphere-Ocean*, 56:3, 178-196, DOI: 10.1080/07055900.2018.1474728.

Gaborit, E., Fortin, V., Xu, X. Y., Seglenieks, F., Tolson, B., Fry, L. M., Hunter, T., Anctil, F., Gronewold, A. D., 2017. A hydrological prediction system based on the SVS land-surface scheme: efficient calibration of GEM-Hydro for streamflow simulation over the Lake Ontario basin, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21, 4825–4839.

Hawcroft, M., Lavender, S., Copsey, D., Milton, S., Rodríguez, J., Tennant, W., Webster, S. et Cowan, T., 2021. The benefits of ensemble prediction for forecasting an extreme event: The Queensland Floods of February 2019. *Bulletin météorologique mensuel*.

Commission mixte internationale, 2015. Progress towards an operational real-time flood forecasting and flood inundation mapping system for the Lake Champlain and Richelieu River.

Groupe d'étude international sur le bassin du lac Champlain et de la rivière Richelieu. États des ateliers du Québec organisés par le Groupe d'étude LCRR sur l'évaluation des besoins des municipalités en matière de prévision des inondations et de mesures d'urgence.

Groupe d'étude international sur le bassin du lac Champlain et de la rivière Richelieu. SPE É.-U Rapport sur le thème 3.

Lachance-Cloutier, S., Turcotte, R., Cyr, J. F., 2017. Combining streamflow observations and hydrologic simulations for the retrospective estimation of daily streamflow for ungauged rivers in southern Québec (Canada). *Journal of Hydrology*, 550, 294–306.

Seiller, G., Anctil, F., Roy, R. 2017. Design and experimentation of an empirical multistructure framework for accurate, sharp and reliable hydrological ensembles. *Journal of Hydrology* 552, 313-340.

Zhu, Yuejian. Ensemble forecast: A new approach to uncertainty and predictability. *Advances in Atmospheric Sciences* 22, 781-788.

ANNEXE A - Évaluation des besoins des intervenants d'urgence en cas d'inondation

CONTEXTE

Des intervenants d'urgence des deux côtés de la frontière ont été invités à préciser leurs besoins en produits et services requis par le système de prévision des crues et de cartographie des inondations. La mobilisation des intervenants d'urgence pendant la pandémie de COVID-19 a posé des défis particuliers. Comme on pouvait s'y attendre, les besoins exprimés sont différents du côté américain et du côté canadien. Le côté américain du bassin LCRR est constitué du lac Champlain, qui est un milieu lacustre, tandis qu'on trouve principalement un milieu fluvial, la rivière Richelieu, du côté canadien (à l'exception de la baie Missisquoi). Cette configuration hydraulique est telle que l'on dispose de plus de temps pour réagir à la montée des eaux du côté américain. Des mesures de protection contre les inondations ont été prises des deux côtés de la frontière, et les inondations le long des rives du lac sont devenues de moins en moins un problème avec le temps. Tous ces facteurs ont influé sur le niveau d'intérêt vis-à-vis des besoins des intervenants d'urgence et sur les réactions reçues à cet égard. La participation des intervenants d'urgence au Canada et aux États-Unis est décrite ci-dessous.

QUEBEC

Au Québec, une série d'ateliers a été organisée pour évaluer les besoins des intervenants d'urgence. Au total, 10 collectivités situées sur les bords de la rivière Richelieu ont participé aux ateliers. Sept collectivités ont participé pleinement et rempli le questionnaire sur leurs activités de préparation aux inondations et leurs besoins d'information. Les détails sur les ateliers et les réponses reçues figurent dans le rapport intitulé « Proceedings of the ILCRR Study — Québec Workshops on Municipal Needs Assessment on Flood forecasting and Emergency Measures » (2021a).

Les ateliers ont porté sur deux questions précises :

- 1 Une prévision de débit à cinq jours vous aide-t-elle à mieux vous préparer à une inondation?
- 2 Les outils et les produits de l'étude aident-ils à améliorer votre capacité d'intervention et de préparation en cas d'inondation?

Au cours des discussions préliminaires tenues lors d'une réunion (juin 2020) avec les intervenants d'urgence, ceux-ci se sont généralement déclaré satisfait des produits de prévision existants et ont précisé qu'une prévision à plus long terme que cinq jours serait probablement encore plus utile, pour autant qu'elle soit exacte. Aucune réponse claire n'a été donnée au sujet de l'utilité des divers produits cartographiques présentés.

Après avoir participé à un exercice « d'inondation virtuelle » lors des ateliers, les intervenants se sont forgés une opinion plus positive de l'utilité d'une prévision à cinq jours et des divers produits cartographiques. La figure A-1 illustre l'inondation virtuelle qui a été présentée. L'exercice a permis aux intervenants d'urgence de mieux cerner les avantages d'une prévision à cinq jours et l'incidence qu'elle pourrait avoir sur leurs mesures d'intervention en cas d'inondation. La tolérance au risque est un facteur important qui varie d'une collectivité à l'autre. Les intervenants d'urgence ont constaté que les bandes de rangs centiles (10 %, 50 %, 90 %) étaient utiles pour définir l'incertitude. Selon leur situation et leur expérience des inondations, ils ont trouvé cette information particulièrement utile pour la prise de décisions. Il est intéressant de noter que les collectivités qui pensaient avoir relativement bien géré les inondations de 2011 tendaient à retenir les scénarios les plus optimistes, tandis

que celles qui considéraient ne pas avoir bien géré la situation penchaient pour les scénarios plus conservateurs. Bien sûr, d'autres facteurs entrent en ligne de compte dans leur prise de décision, comme le temps requis pour se préparer à l'inondation et les conséquences possibles.

Les intervenants d'urgence se sont dit intéressés par une prévision à plus long terme (de trois semaines à un mois) afin de leur donner plus de temps pour se préparer à une crue imminente. Ils reconnaissent que les prévisions à long terme sont plus incertaines. Toutefois, cet horizon de prévision plus long les aiderait à se procurer le matériel et l'équipement nécessaires pour faire face à des inondations. Les petites collectivités travaillent également en collaboration, ce qui est utile du point de vue de la planification, en cas de partage.

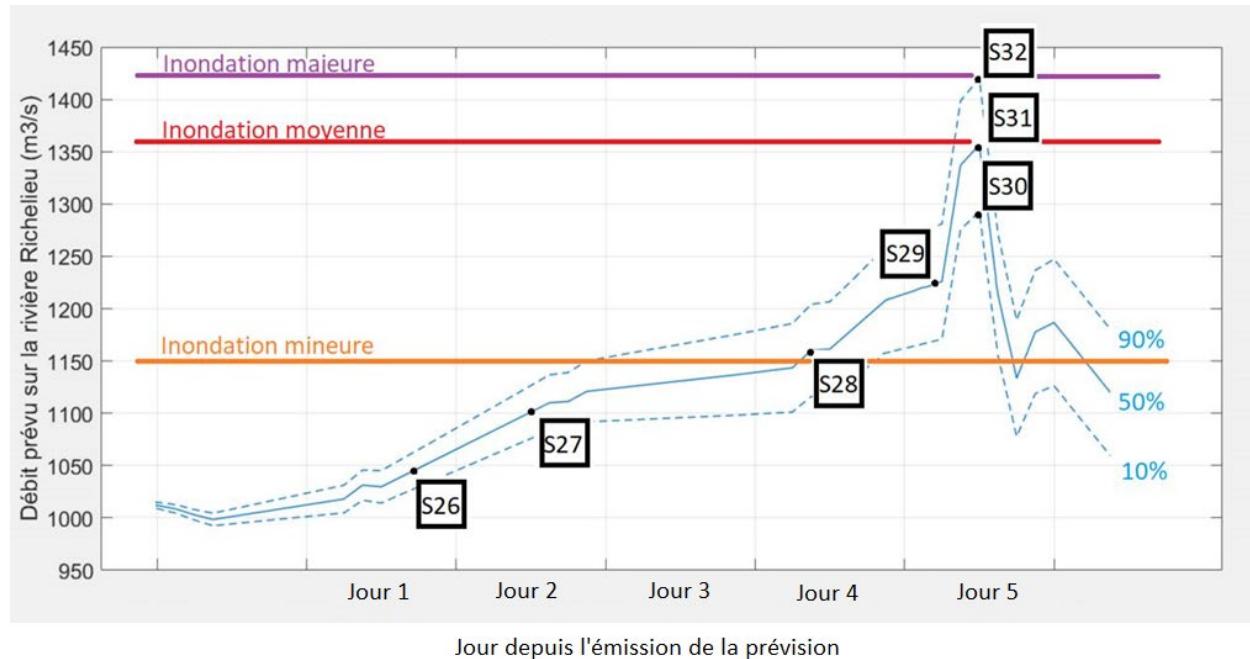


Figure A-1. Exercice virtuel sur les inondations avec des intervenants d'urgence au Québec (les valeurs « S » indiquaient à l'usager le bon numéro de carte.).

Divers produits cartographiques illustrant les impacts de chaque scénario (p. ex., S26) sur leur collectivité ont été présentés aux intervenants d'urgence. Ils comprenaient l'étendue aréale des inondations (carte de la zone inondable), l'accessibilité au réseau routier et la vulnérabilité sociale. Ces renseignements ne sont pas présentés ici pour des raisons de confidentialité, en raison de l'important niveau de détails avec lequel les renseignements de nature délicate sont affichés.

Les intervenants d'urgence ont aidé à valider les produits cartographiques en fonction de ce qu'ils savaient des événements passés. Ils ont noté que certains axes routiers avaient été rehaussés depuis 2011 et qu'il y avait donc lieu de mettre les cartes à jour. De plus, il y a lieu de tenir compte que de nombreuses résidences ont été protégées contre les inondations. Dans l'ensemble, les intervenants consultés ont estimé que les cartes des zones inondables reflétaient la réalité d'après ce qu'ils savaient des inondations passées. Ils ont trouvé ce produit particulièrement utile.

Ils ont convenu que ces données visuelles leur fournissaient des renseignements suffisamment détaillés pour prendre des décisions éclairées. Ils se sont tous dits intéressés à ce que cette information soit rendue disponible pour faire face à de futures inondations.

États de New York et du Vermont

Du côté américain, il a été difficile de mobiliser les intervenants d'urgence dans un exercice officiel pour les raisons mentionnées plus tôt (moins d'intérêt en raison des impacts moins directs des récentes inondations ainsi que de la pandémie de COVID-19). En lieu et place, cinq personnes appartenant à des organismes-clés de l'État ont été invitées à faire part de leurs commentaires en réponse à un questionnaire. Les détails des questions et des réponses de ces entrevues sont consignés dans le rapport « US SPE Theme 3 » (GEILCRR, 2021b).

Dans l'ensemble, le personnel consulté des agences s'est déclaré satisfait de la prévision des crues actuellement produite, mais s'est dit intéressé à disposer de prévisions améliorées dans le cas des vagues (prévisions qui font actuellement l'objet de travaux). Il pense également qu'une approche mieux coordonnée, suivant une planification plus intégrée à l'échelon des États, aiderait à améliorer les interventions d'urgence en cas d'inondation.

L'inondation des rives du lac a été un problème dans les deux États. Cependant, les inondations en bordure des affluents ont été jugées plus préoccupantes. Les produits de prévision des crues doivent donc se concentrer sur cette échelle d'inondations et fournir des extrants de plus grande résolution.



ANNEXE B - Configuration des modèles de prévision météorologique et indicateurs de performance à ECCC

Le Système à haute résolution de prévision déterministe (SHRPD) et la configuration actuelle du Système global de prévision d'ensemble/Système global de prévision déterministe (SGPE/SGPD) ainsi que du Système régional de prévision déterministe/Système régional de prévision d'ensemble (SRPD/SRPE) constituent une succession de versions imbriquées du LAM (modèle à domaine limité) des modèles atmosphériques GEM assortis d'une résolution croissante. Ils produisent des prévisions déterministes et d'ensemble pour la majeure partie du territoire canadien jusqu'à quatre fois par jour. Le Système global de prévision déterministe (SGPD) repose sur une configuration GEM d'une résolution de 15 km avec un horizon prévisionnel de 10 jours. Les prévisions sont émises à 00 h et 12 h UTC pour une grille couvrant tout le globe. Le SGPD est couplé de façon bidirectionnelle au modèle Nucleus for European Modelling of the Ocean (NEMO).

Le Système global de prévision d'ensemble (SGPE) est une version d'ensemble du SGPD qui repose sur une configuration GEM d'une résolution de 40 km. Les prévisions sont émises à 00 h et à 12 h UTC pour une grille mondiale. L'horizon de prévision de 16 jours peut être prolongé à 32 jours pour les prévisions émises tous les jeudis à 00 h UTC. Les extrants sont disponibles à un pas de temps de 3 heures pour la première semaine d'horizon prévisionnel, et à un pas de temps de 6 heures pour les horizons prévisionnels suivants. Le SGPE est couplé de façon bidirectionnelle au modèle NEMO. En tant que système de prévision d'ensemble, le SGPE exécute vingt scénarios de prévision (ou membres de l'ensemble) pour faire ressortir l'incertitude des prévisions. Le système fait partie d'un système de prévision d'ensemble multimodèle appelé Système de Prévisions d'Ensemble Nord-Américain (SPENA), actuellement composé de 20 membres du SGPE et de 20 membres du Global Ensemble Forecasting System (GEFS) des National Centers for Environmental Prediction (US) (NCEP). Il a été démontré que le SPENA surpassait chacun des systèmes SGPE et GEFS.

Le système régional de prévision déterministe (SRPD) repose sur une configuration de GEM d'une résolution de 10 km avec un horizon de prévision de trois jours. Les prévisions sont émises quatre fois par jour (à 00 h, à 6 h, à 12 h et à 18 h UTC) pour une grille couvrant la majeure partie de l'Amérique du Nord.

La version d'ensemble du SRPD est le Système régional de prévision d'ensemble (SRPE), qui repose sur une configuration GEM d'une résolution de 10 km selon un horizon prévisionnel de trois jours. Les prévisions sont émises à 00 h et à 12 h UTC pour une grille couvrant l'Amérique du Nord. Par rapport au SGPE, le SRPE produit 20 scénarios de prévision (membres) pour faire ressortir l'incertitude des prévisions. Le Système à haute résolution de prévision déterministe (SHRPD) repose sur une configuration GEM d'une résolution de 2,5 km avec un horizon de prévision de deux jours. Les prévisions sont émises quatre fois par jour (à 00 h, à 6 h, à 12 h et à 18 h UTC) pour une grille couvrant le Canada ainsi que tous les bassins hydrographiques transfrontaliers.

Bien que ces systèmes de prévision ne tiennent pas compte du régime hydrologique des rivières, tous dégagent des prévisions sur les processus physiques, y compris le ruissellement. De plus, le ruissellement de surface d'ensemble du SGPE est traité *a posteriori* (post-traitement) pour en établir l'anomalie climatologique (ruissellement prévu moins ruissellement du modèle climatologique). Ces séries peuvent être utilisées pour délimiter les zones à risque d'inondation. Par exemple, la figure B-1 montre le préavis de ruissellement de surface extrême émis le 11 avril 2019 et valide pour la semaine du 18 au 25 avril. Les zones susceptibles d'être sujettes à un ruissellement de surface extrême supérieur à la moyenne sont indiquées en jaune, et celles où le risque est extrême sont indiquées en rouge. Ce produit prévisionnel montre une vaste zone sujette à un

risque de ruissellement de surface extrême supérieur à la moyenne, zone dont le bassin LCRR fait partie. Rappelons qu'il y a eu des inondations au cours de cette semaine-là dans le bassin LCRR.

Extreme Surface Runoff Outlook for the week of Apr 18 to 25

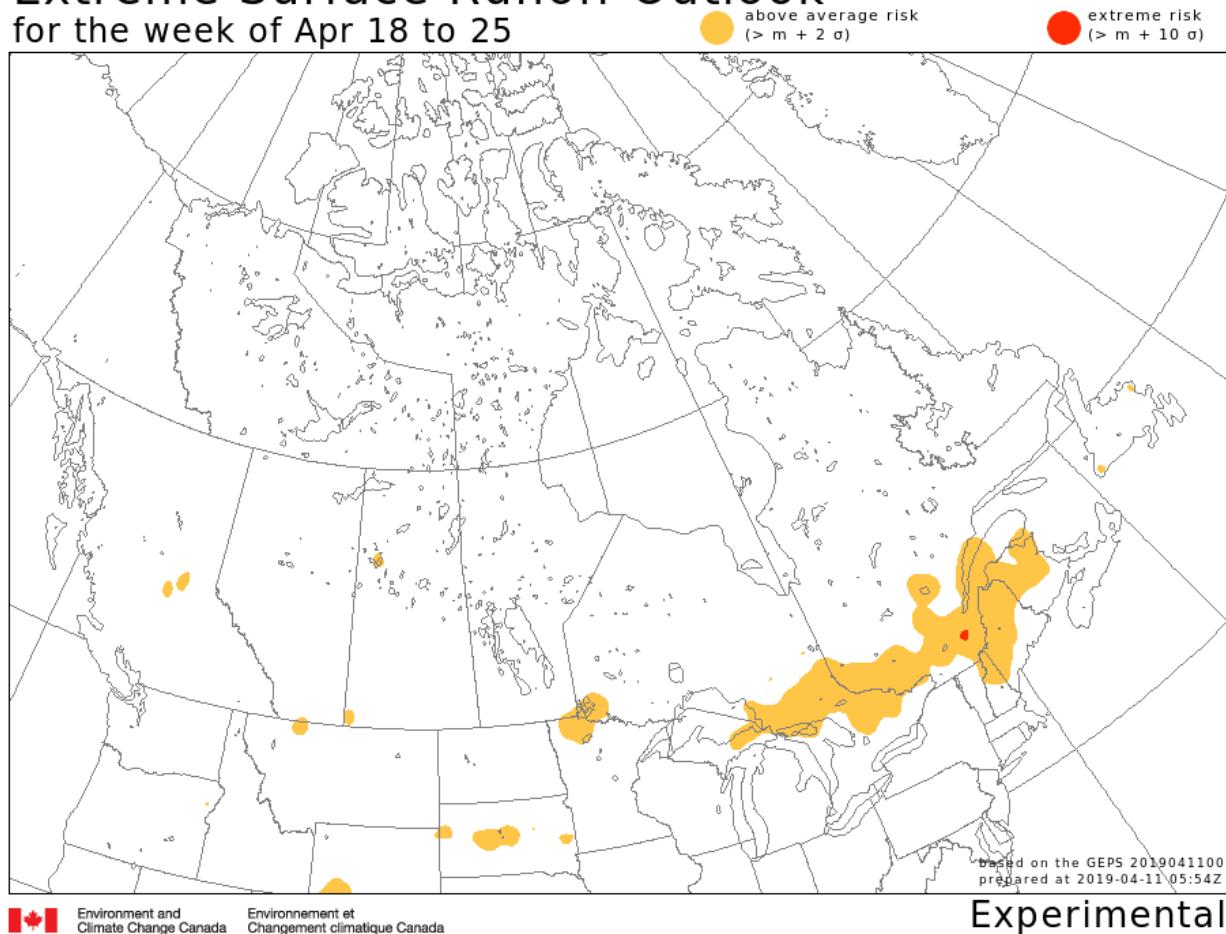


Figure B-1. Préavis de ruissellement de surface extrême publié le 11 avril pour la semaine du 18 au 25 avril 2019 (anglais seulement).

Enfin, le système de Prévision du Cycle de l'Eau (SPCE; Durnford et al., 2018) est un ensemble de modèles interreliés représentant le cycle hydrique complet (de l'atmosphère à la surface, dans les rivières et les lacs avec retour dans l'atmosphère)⁸. Il tient compte des processus de l'atmosphère, des océans, des lacs, de la glace marine et des cours d'eau dans le cas des Grands Lacs laurentiens. Plus précisément, le SPCE repose sur une configuration GEM d'une résolution de 10 km selon un horizon prévisionnel de trois jours. Des prévisions sont émises deux fois par jour (à 00 h et à 12 h UTC) pour une grille couvrant le bassin versant du fleuve Saint-Laurent à Tadoussac (ce qui inclut donc le lac Champlain). Dans la version expérimentale actuellement utilisée par ECCC, ce système est jumelé au modèle NEMO couvrant les Grands Lacs et au modèle fluvial WATROUTE d'une résolution de 1 km pour tous les affluents du fleuve Saint-Laurent. Ce système simule donc l'état actuel et futur des terres, des lacs et des rivières, mais, sur un plan opérationnel, il ne représente pas l'impact du

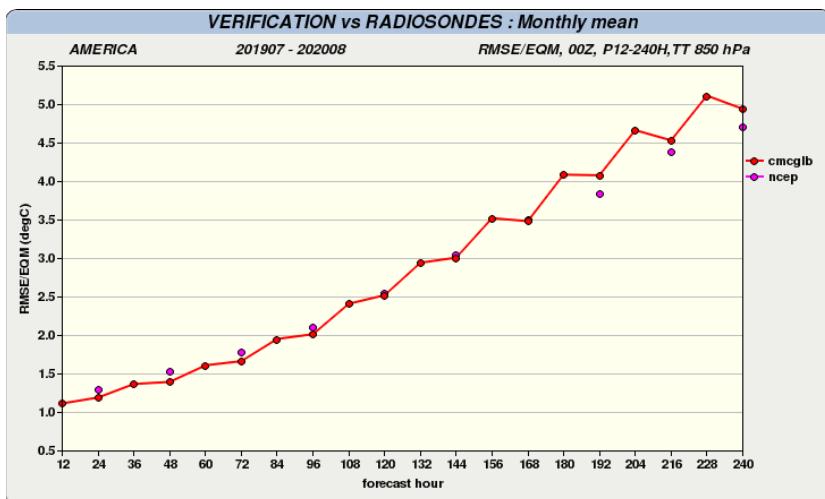
⁸ <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0155.1>

vent sur le niveau du lac ou sur le débit de la rivière Richelieu. Les configurations du système actuellement utilisées à ECCC sont résumées au tableau B-1. Il convient toutefois de noter que ces détails sont susceptibles de changer à l'avenir, à la suite de l'amélioration de chaque système. La documentation officielle, y compris un registre détaillé des changements, est conservée sur la plateforme GitHub (https://eccc-msc.github.io/open-data/msc-data/readme_fr/).

Tableau B-1. Configuration des systèmes opérationnels de prévisions météorologiques, fluviales et de surface en fonction du modèle GEM pour le bassin LCRR.

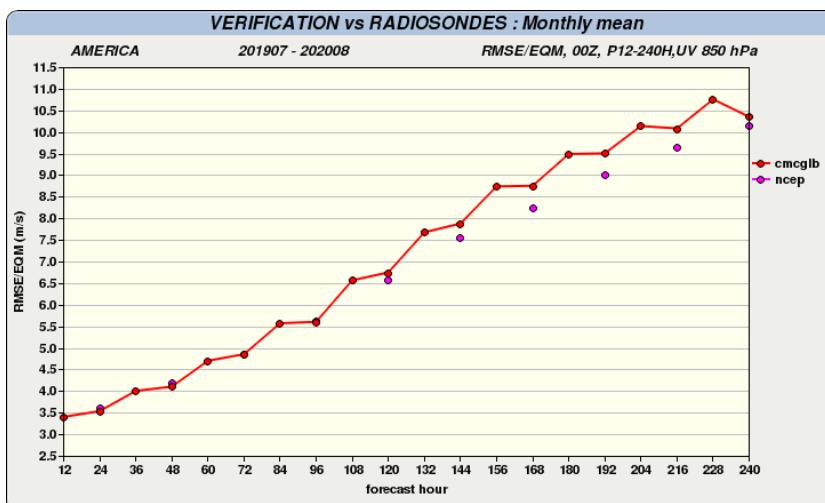
Système	Résolution	Horizon prévisionnel	Prévisions par jour	Prévisions d'ensemble	Prévisions du ruissellement	Prévisions fluviales
SGPE	40 km	16 jours (32 jours chaque jeudi)	2	Oui, 20 membres	Oui, 20 membres	Non
SGPD	15 km	10 jours	2	Non	Oui	Non
SRPE	10 km	3 jours	2	Oui, 20 membres	Oui, 20 membres	Non
SRPD	10 km	3 jours	4	Non	Oui	Non
SHRPD	2,5 km	48 heures	4	Non	Oui	Non
SPCE	10 km	3 jours	2	Non	Oui	Oui, à 1 km

Les prévisions sont régulièrement comparées aux observations et aux prévisions d'autres centres nationaux de prévision. Par exemple, la figure B-2 montre la progression des erreurs de prévision des températures en fonction de l'horizon prévisionnel pour l'Amérique du Nord. Les prévisions sont comparées aux observations par radiosonde au niveau 850 hPa (soit à environ 1500 m au-dessus de la surface) pour le Système global de prévision déterministe (SGPD, en rouge) et pour le Global Forecasting System (GFS, en magenta). L'évaluation s'est échelonnée de juillet 2019 à août 2020, car une importante mise à niveau du SGPD a été faite le 3 juillet 2019. L'erreur quadratique moyenne (EQM) est à peu près la même pour les prévisions du SGPD et du GFS, le SGPD s'avérant légèrement supérieur pour les jours 1 à 4 et le GFS l'étant un peu plus pour les jours 7 à 10 de la période en question (juillet 2019 à août 2020). La figure B-3 présente une comparaison de ces deux mêmes modèles selon le même ensemble de données et la même mesure d'erreur, mais pour la vitesse du vent. Encore une fois, les EQM des prévisions du SGPD et du GFS sont comparables, celles du GFS étant légèrement supérieures pour les jours 5 à 10 de la période visée. Au cours des dernières années, les scores de vérification du SGPD et du GFS ont été très semblables, et ils se sont constamment améliorés.



Rouge : Système global de prévision déterministe (SPDG) du Canada;
Magenta : Global Forecast System (GFS) des É.-U.

Figure B-2. Erreur quadratique moyenne (EQM) des prévisions de température au niveau 850 hPa pour la période d'octobre 2018 à septembre 2019, pour l'Amérique du Nord, exprimée en fonction de l'horizon de prévision (anglais seulement).



Rouge : Système global de prévision déterministe (SPDG),
Magenta : Global Forecast System (GFS) des É.-U.

Figure B-3. Erreur quadratique moyenne (EQM) des prévisions de vitesse du vent au niveau 850 hPa pour la période d'octobre 2018 à septembre 2019, pour l'Amérique du Nord, exprimée en fonction de l'horizon de prévision (anglais seulement).

Dans la conception d'un système de prévision du niveau de l'eau pour le bassin LCRR, il faut tenir compte de la croissance quasi linéaire de l'erreur de température et de vitesse du vent sur une période de dix jours compte tenu de l'influence de la température (surtout lors de la fonte des neiges) et du vent qui agit sur le niveau du lac. L'autre variable importante qui agit sur les changements de niveau du lac est évidemment celle des précipitations. La figure B-4 montre l'évolution de l'indice de menace (IM) en fonction des horizons prévisionnels du SGPD (en bleu) et du SRPD (en rouge), pour des précipitations de plus de 5 mm en 6 heures au printemps 2019 (mars-avril-mai). L'IS est une mesure positive de la performance des prévisions fréquemment utilisée pour les précipitations. La valeur de l'IM d'une prévision parfaite est de 1, et des valeurs d'IS négatives sont indicatives de prévisions qui ne sont pas performantes. On peut voir que les prévisions des précipitations sur 10 jours du SGPD sont très peu précises. En fait, avec cette prévision déterministe, la performance est limitée même après cinq jours. On peut aussi observer que les prévisions des modèles SGPD et SRPD présentent essentiellement la même performance dans les trois premiers jours, même si les prévisions du SRPD offrent une meilleure résolution horizontale.

Plutôt que chercher à augmenter la résolution horizontale d'une prévision déterministe, il est souvent plus avantageux de produire une prévision d'ensemble. Il est à la fois question de représenter l'incertitude des prévisions de façon dynamique et d'accroître leur précision. Il est recommandé d'utiliser des systèmes de prévision météorologique d'ensemble à modèles multiples comme le modèle SPENA (un système de prévision météorologique d'ensemble coordonné pour le Canada, les États-Unis et le Mexique) afin de maximiser la performance. La figure B-5 présente l'indice de Brier (IB) appliqué à la performance des prévisions du modèle SPENA pour des de précipitations supérieures à 15 mm en 24 heures, selon une évaluation réalisée à l'échelle planétaire pour la période d'avril 2019 à juin 2019. L'IB est une mesure positive de la performance des prévisions fréquemment utilisée pour les prévisions probabilistes des précipitations. Une valeur de 1 est indicatrice d'une prévision parfaite, et une valeur de zéro indique une prévision qui n'est pas plus performante que la climatologie. Bien qu'il ait été démontré que les prévisions du modèle SPENA surpassent les prévisions déterministes relativement à la plupart des variables à des horizons de prévision éloignés, force est de constater que la performance des prévisions de précipitations pour une deuxième semaine est considérablement inférieure à celle d'une première semaine. En pratique, les prévisions du modèle SPENA pour 15 mm de précipitations en 24 heures sont très peu performantes pour des horizons de prévision supérieurs à 10 jours.

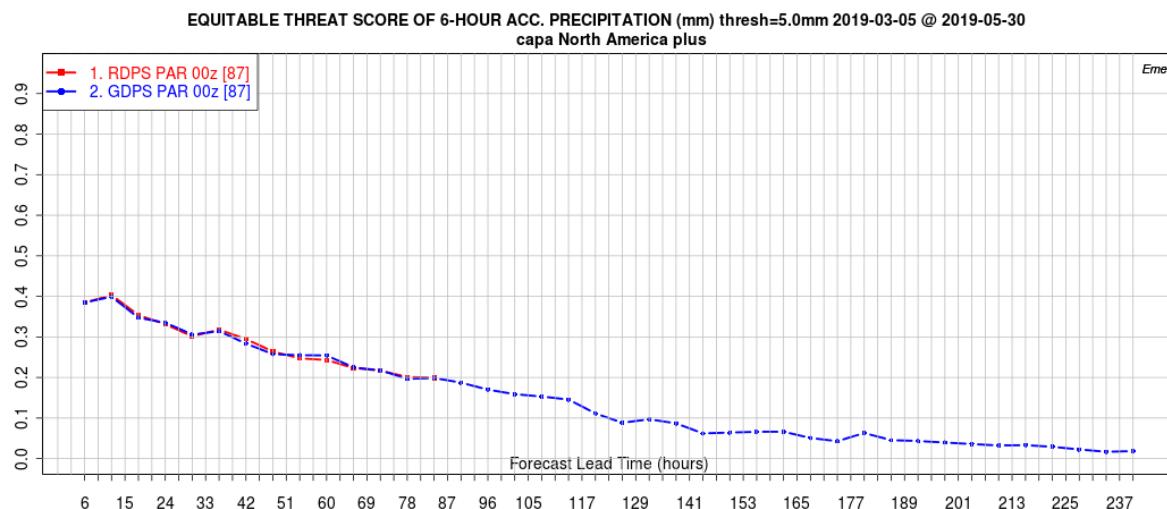
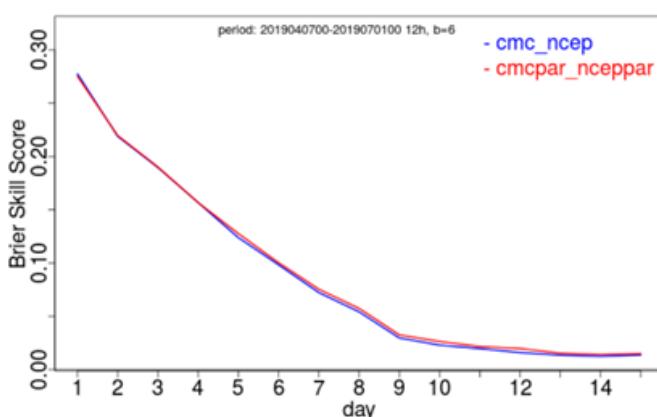


Figure B-4 . Indice de menace (IM) des prévisions de précipitations pour la période de mars 2019 à mai 2019 pour l'Amérique du Nord, exprimé en fonction de l'horizon de prévision. Rouge : Système régional prévisionnel déterministe (SRPD) en vigueur au Canada; bleu : Système global de prévision déterministe (SGPD) en vigueur au Canada (anglais seulement).



Rouge : Performance du système de prévision SPENA mis en œuvre en juillet 2019; bleu : Performance de l'ancienne version du système SPENA

Figure B-5 . Indice Brier (IB) établi pour des prévisions de précipitations de 15 mm/24 h ayant porté sur la période d'avril 2019 à juin 2019, à l'échelle planétaire, et exprimées en fonction de l'horizon de prévision (anglais seulement).

ANNEXE C - Configuration du modèle de prévisions météorologiques de la NOAA

Le Weather Prediction Center (WPC) de la NOAA émet des prévisions pour l'Amérique du Nord quatre fois par jour. Ces prévisions sont fondées sur de multiples modèles atmosphériques, notamment sur le Global Forecast System (GFS), sur le North American Mesoscale (NAM) Forecast System, sur le Modèle global du Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT), sur le High-Resolution Rapid Refresh (HRRR) model, et sur le National Blend of Models (NBM). Chacun des modèles atmosphériques pris en compte par le WPC lors de l'élaboration de ses prévisions est disponible à différentes résolutions spatiales et pour différents horizons temporels.

WPC – Les prévisions du modèle WPC sont généralement émises en format matriciel à différentes résolutions, notamment pour une grille de 2,5 km, des périodes de 168 heures. La grille est intégrée à la configuration du Advanced Weather Interactive Processing System (AWIPS) du NERFC. Les grilles de chaque prévision du WPC sont donc intégrées au AWIPS à mesure qu'elles sont disponibles, mais il en va de même pour chacun des modèles dont le WPC se sert dans l'élaboration de ses prévisions. Avec toutes ces différentes grilles de modélisation à la disposition des météorologues et des prévisionnistes des crues du WPC, les prévisions quantitatives des précipitations (QPF) générées localement, qui sont utilisées pour le forçage des modèles hydrologiques, peuvent être fondées sur l'un ou l'autre de ces modèles. Autrement dit, les prévisionnistes hydrologiques du NERFC peuvent choisir le ou les modèles atmosphériques à utiliser pour élaborer leurs prévisions hydrologiques locales.

GFS – Le modèle Global Forecast System (GFS) est produit par les National Centers for Environmental Prediction (NCEP) du NWS quatre fois par jour, à 00z, 06z, 12z et 18z. Le modèle couvre l'ensemble du globe et son horizon temporel est de 192 heures. Sa résolution horizontale passe d'environ 28 km entre les points de la grille pour la première semaine de la prévision à 70 km entre les points de la grille pour le reste de la prévision.

NAM – Le North American Mesoscale Forecast System model est également produit par le NCEP quatre fois par jour à 00z, 06z, 12z et 18z. Le domaine spatial du modèle est le continent nord-américain. Sa résolution horizontale et son horizon temporel varient. La version la plus fine de l'échelle du système NAM a une résolution de 12 km et fournit les prévisions jusqu'à 84 heures. Il existe des versions de résolution de 20 km et de 40 km du modèle qui prolongent la prévision à seulement 60 heures.

CEPMMT – Le Modèle global du Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme est publié par le Copernicus Atmosphere Modelling Service de Reading (Royaume-Uni), deux fois par jour à 00z et à 12z, selon différentes échelles et résolutions spatiales. La prévision globale à haute résolution (HRES) à moyen terme est l'un des 52 membres de l'ensemble CEPMMT et elle est produite à une résolution de 9 km pour un horizon temporel de 10 jours. Les grilles de cette version du modèle sont intégrées à l'AWIPS aux fins d'analyse et de comparaison par les prévisionnistes du NWS.

HRRR – La version opérationnelle du High-Resolution Rapid Refresh model (version 4) est produite par le NCEP à chaque heure selon une résolution horizontale de 3 km à échelle fine. L'horizon temporel de chaque analyse de modèle est de 18 heures seulement, mais il est prolongé à 48 heures pour chaque itération des cycles 00z, 06z, 12z et 18z. Deux domaines spatiaux du HRRR opérationnel sont actuellement produits, l'un pour les États-Unis contigus et l'autre pour la région de l'Alaska.

NBM – Le National Blend of Models est produit deux fois par jour par le Weather Prediction Center (WPC) du CNPE à 00z et à 12z. L'horizon temporel des grilles du modèle qui sont ingérées à l'AWIPS est de 11 jours (264 heures). De multiples résolutions de grille et domaines spatiaux sont produits, les domaines CONUS et Hawaï étant basés sur un réseau de 2,5 km et le domaine de l'Alaska sur un réseau de 3 km. Les produits du domaine océanique sont également disponibles à une résolution de 10 km.

GEFS – Le modèle de prévision météorologique du Global Ensemble Forecast System est exécuté par le NCEP quatre fois par jour à 00z, à 06z, à 12z et à 18z. La version 12.0 du GEFS a été mise en œuvre en 2020 et comprend 31 membres prévisionnels individuels. Chaque membre représente une petite perturbation des observations météorologiques utilisées pour initialiser les prévisions de base du GFS. Ensemble, les 31 membres permettent d'obtenir une estimation de l'incertitude des prévisions. L'horizon temporel du GEFS est généralement fixé à 16 jours, bien que la passe quotidienne de 00z aille jusqu'à 35 jours. La résolution horizontale du GEFS a été augmentée à environ 25 km pour la version 12.0.

SPENA - Le Système de Prévisions d'Ensemble Nord-Américain est un projet conjoint auquel participent les organismes météorologiques du Canada, du Mexique et des États-Unis. Le SPENA produit des prévisions fondées sur les prévisions d'ensemble de 21 membres du NCEP et d'ECCC. Le modèle est exécuté deux fois par jour à 00z et à 12z. Les grilles sont distribuées selon une résolution de 1 x 1 degré et elles couvrent 14 jours.



ANNEXE D - Détails techniques du modèle SNPSR

La figure D-1 est une représentation schématique de la structure du SNPSR et de la correspondance entre les composantes déterministes et les composantes d'ensemble du système. Dans cette figure, les liens avec le modèle H2D2 sont représentées par des pointillés, puisque le système est en cours d'élaboration (la version déterministe devrait être terminée d'ici un an).

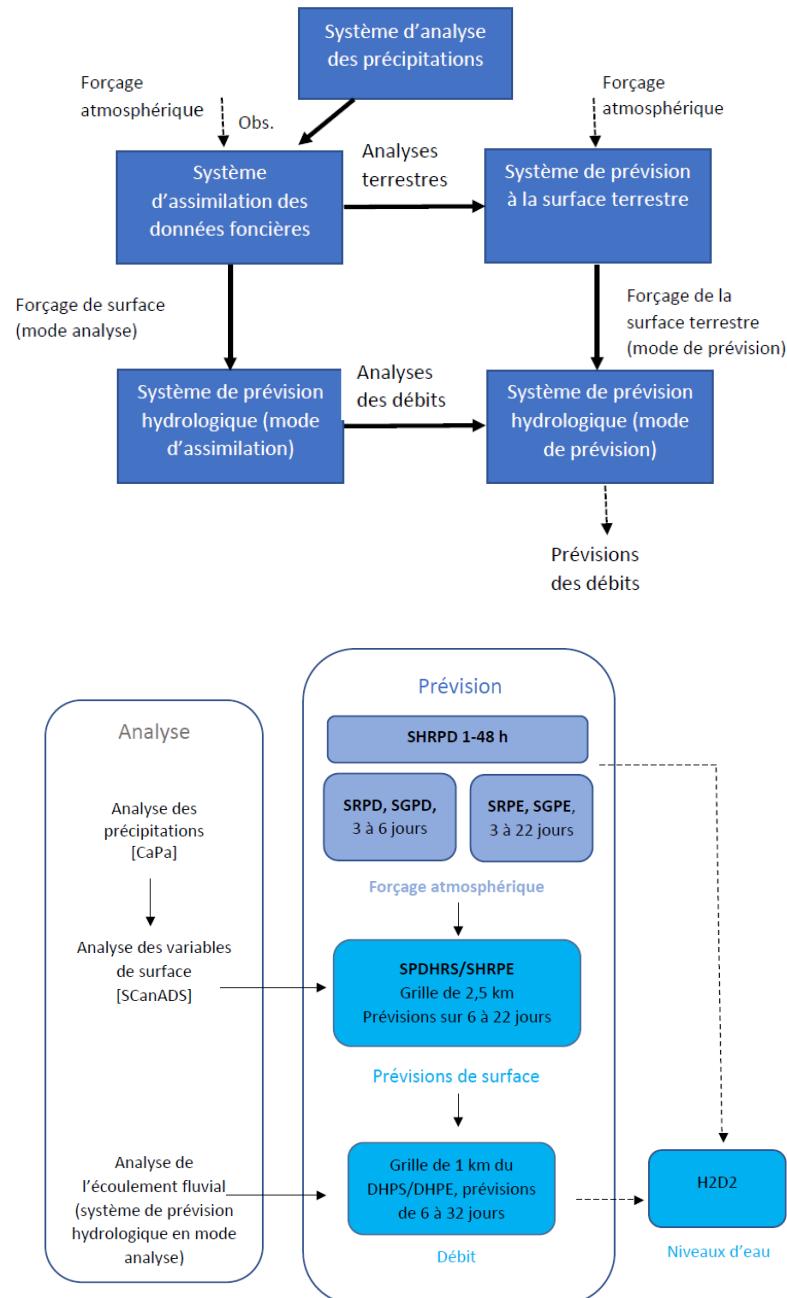


Figure D-1. Schéma du Système national de prévision de surface et de rivières (SNPSR) dans sa version déterministe (opérationnelle) et dans sa version d'ensemble (expérimentale). La composante de prévision hydrodynamique d'ensemble (pointillés) est en cours d'élaboration.

La figure D-2 montre une prévision déterministe de l'écoulement sur six jours émise par le SNPSR le 1er octobre 2019 à 00 UTC pour le 7 octobre 2019 à 00 UTC; elle est centrée sur le bassin LCRR. Les couleurs reflètent les prévisions de débit, en mètres cubes par seconde de chaque cellule de la grille de 1 km². Il est possible d'obtenir une série chronologique pour n'importe quelle cellule de la grille (voir p. ex., la figure D-3) ou de produire un hydrogramme pour un horizon de prévision précis, pour n'importe quel site jaugé du bassin versant (voir p. ex., la figure D-4). La figure D-3 présente des exemples de deux niveaux différents de performance du modèle dans le système existant.

Bien que le SPCE et le SNPSR soient entièrement automatisés, ces systèmes font l'objet d'une surveillance continue afin de s'assurer que des intrants de qualité sont fournis au système et que les modèles et les systèmes d'assimilation des données fonctionnent comme prévu. Il faut, par ailleurs, noter que la recherche en cours vise à évaluer la nature et l'ampleur des erreurs de prévisions hydrologiques (c.-à-d., l'exactitude, le biais et la fiabilité des prévisions d'ensemble) ainsi qu'à caractériser l'incertitude des intrants du système hydrodynamique (précipitations, débits, vent).

Aucun système de cartographie et d'alerte de crue n'est actuellement fonctionnel à ECCC pour le bassin LCRR. Toutefois, dans le cadre d'une collaboration continue avec le MELCC, il est question d'élaborer des prévisions combinant des prévisions numériques alimentées de diverses sources (soit divers systèmes et différents organismes de modélisation). Cela devrait permettre d'améliorer les prévisions hydrologiques et hydrodynamiques et de fournir des outils pour produire des renseignements complets sur le risque de crue.

Il a été démontré que le SNPSR fournit de meilleures prévisions de débit que le SPCE en été et en automne. On s'attend à des performances comparables en hiver et lors de la crue printanière. Parmi les autres avantages du SNPSR, mentionnons la résolution supérieure obtenue par forçage atmosphérique pour les deux premiers jours (2,5 km par rapport à 10 km) et un horizon de prévision plus long (6 jours contre 3 jours pour la prévision déterministe, 16 jours pour la prévision d'ensemble et 32 jours pour la prévision d'ensemble émise les jeudis).

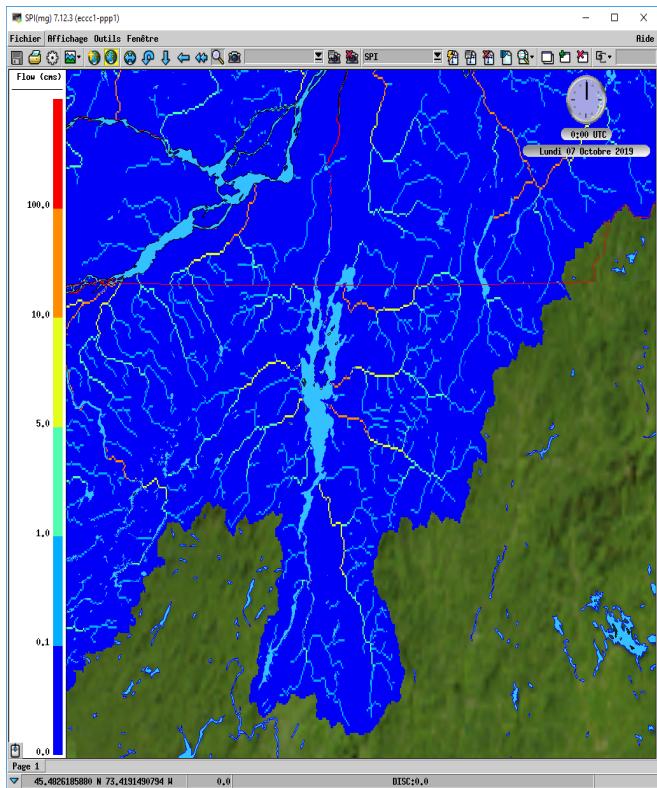


Figure D-2. Prévisions de débit du SNPSR en date du 1er octobre 2019 à 00 h UTC pour le 7 octobre 2019 à 00 h UTC

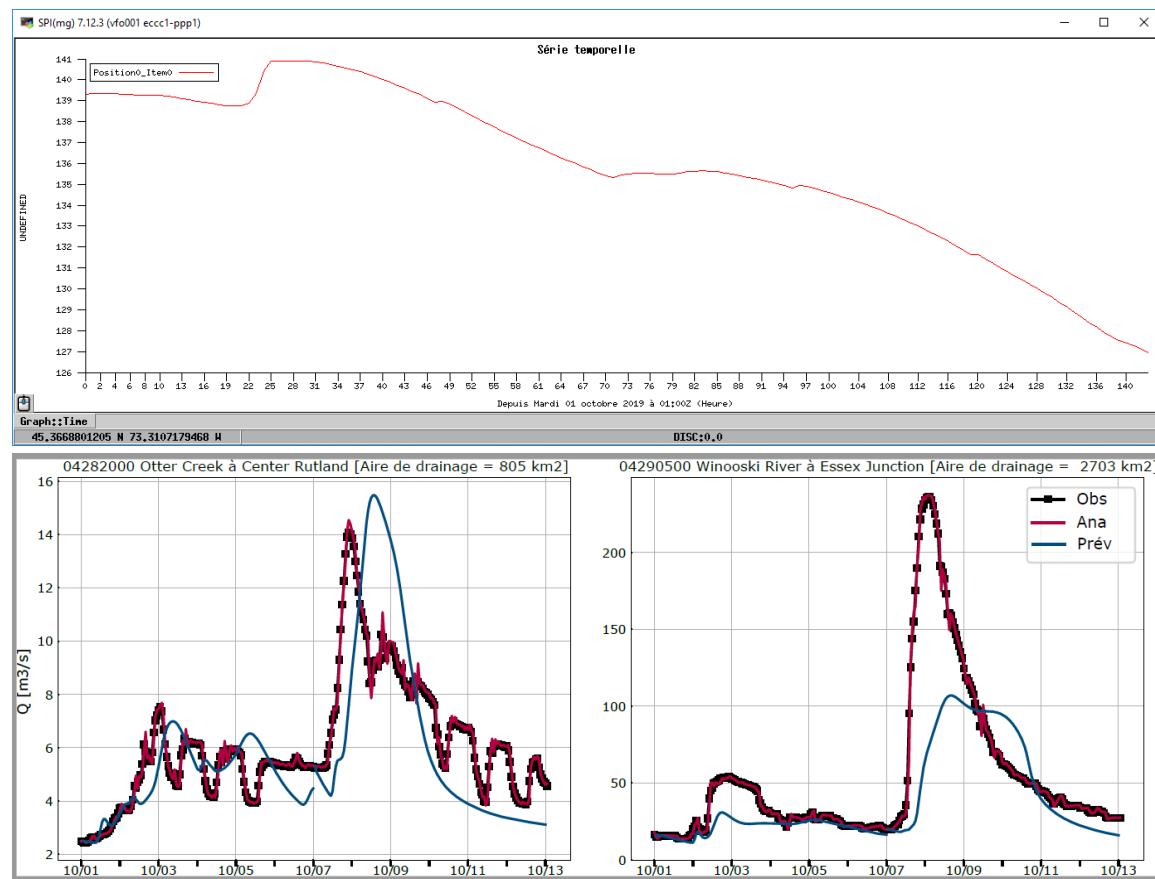


Figure D-3. Exemple de prévision de débit du SNPSR en date des 1er et 7 octobre 2019 à 00 h UTC pour deux affluents du bassin LCRR.

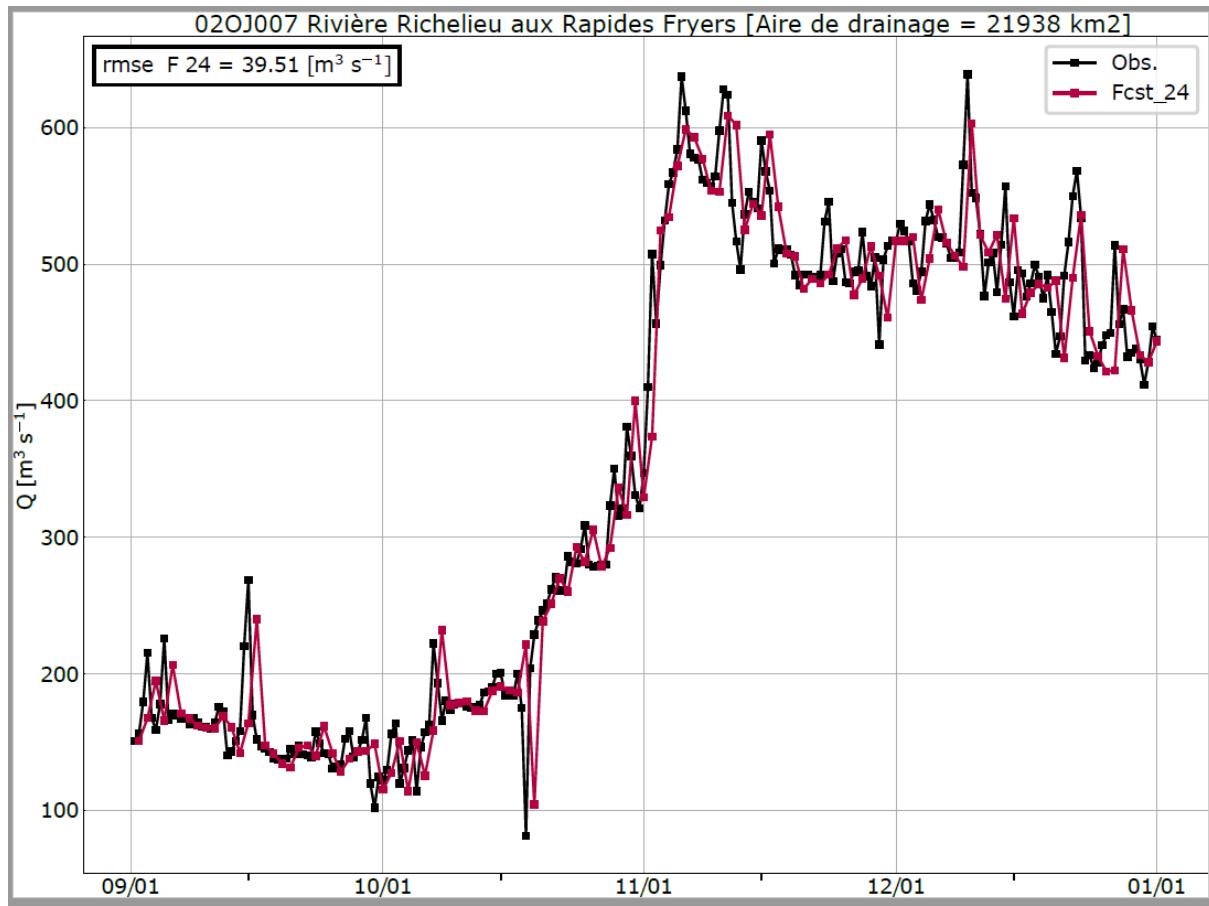


Figure D-4. Exemple de prévision des débits du SNPSR à 24 heures, pour à Saint-Jean-sur-Richelieu, à l'automne 2019.

ANNEXE E - Équations détaillées et fonctionnement du modèle de bilan hydrologique

Cette équation reflète l'équilibre entre la variation du volume du lac, le débit sortant de la rivière Richelieu et les apports nets du bassin (ANB), d'après Lee (1992) et Bruxer (2011) :

$$\Delta S \Delta S_{th} = P + R G - E - O - C \quad (1)$$

Où :

ΔS = changement de volume du lac

ΔS_{th} = expansion et contraction thermiques, ce qui peut être négligé

P = précipitations sur le lac

R = ruissellement et apports des affluents dans le lac

G = débit des eaux souterraines

E = évaporation du lac

O = débit sortant vers la rivière Richelieu

C = prélèvement d'eau

Les ANB peuvent être définis en fonction de leurs composantes :

$$ANB = P + R G - E \quad (2)$$

Comme ces composantes ne font pas l'objet de registres complets ou qu'elles n'ont pas été mesurées, il est plus utile de définir les ANB comme étant le volume d'eau entrant (diminué de l'évaporation), qui doit être égal au changement de volume du lac augmenté du volume d'eau sortant du lac :

$$ANB = \Delta S + O \quad (3)$$

Le MBH défini par l'équation (3) sert d'abord à ramener la série historique des ANB à des pas de temps d'un quart de mois (QM). En d'autres termes, les ANB correspondent à la somme des variations de niveau du lac [exprimées en volume d'eau écoulé (affecté d'un signe positif pour une augmentation de niveau et d'un signe négatif pour une diminution) et du débit sortant moyen de la rivière Richelieu, à un pas de temps d'un quart de mois (QM)]. Il a ainsi été possible d'établir les ANB historiques qui sont considérés comme étant une série certifiée pouvant servir de base de comparaison pour toute autre donnée obtenue par analyse stochastique ou par forçage climatique.

Dans un deuxième temps, la même équation sert à évaluer l'impact des solutions de nature structurelle. Il s'agit ici d'ajuster la fonction de tarage dans le temps d'après les résultats des simulations multiples selon le modèle hydraulique bidimensionnel H2D2 (décris à la section 4.2).

Les fluctuations de niveau du lac Champlain sont lentes en raison de la grande capacité de stockage de ce plan d'eau. Le pas de temps d'un quart de mois est donc jugé approprié pour quantifier l'effet des différentes valeurs de débit sortant sur le niveau du lac. L'équation de conservation de masse est résolue par application d'un processus itératif.

La formule de Manning-Strickler est utilisée pour définir le débit en termes de géométrie du chenal, de paramètres de rugosité, de pente du lit/de la surface de l'eau, etc. À partir du débit connu et d'une coupe transversale mesurée à la station virtuelle de Saint-Jean-sur-Richelieu, la variation du coefficient n de Manning est calculée pour la période la plus récente, de 2010 à 2016. Cette valeur a varié d'un minimum de 0,071 au QM 14 à un maximum de 0,14 au QM 33.

Pour exploiter le modèle de bilan hydrologique, un état initial du système est d'abord établi avec un niveau du lac Champlain et un débit de la rivière Richelieu représentant la situation au début du premier QM. Les étapes sont les suivantes :

- **Étape 1** : Calcul du niveau du lac Champlain (à la fin du QM) d'après la moyenne des débits de la rivière Richelieu à la fin d'un QM et au début du suivant, ainsi que des ANB durant le QM envisagé. Lors de la toute première itération d'un QM donné, les débits de la rivière Richelieu à la fin et au début du QM sont identiques.
- **Étape 2** : Calcul du niveau entre la naissance de la rivière Richelieu et la station virtuelle de Saint-Jean-sur-Richelieu (à la fin du QM) à l'aide de la formule Manning-Strickler, à partir du niveau du lac (à la fin du QM) et du débit de la rivière Richelieu (à la fin du QM).
- **Étape 3** : La relation niveau-débit est calculée à l'aide de simulations de modèles hydrauliques en 2D. Le niveau d'eau à la station virtuelle est calculé en même temps (étape 4). L'équation Manning-Strickler est utilisée pour « transférer » le niveau d'eau de la station virtuelle au lac pendant le processus itératif de l'étape 2. Le niveau final pour le QM est calculé à l'étape 4.
- **Étape 4** : Calcul du nouveau débit de la rivière Richelieu (à la fin du QM) d'après la relation niveau-débit établie à la station virtuelle de Saint-Jean-sur-Richelieu. Une itération entre les étapes 2 à 4 permet de faire converger les résultats de niveau et de débit à Saint-Jean-sur-Richelieu. La prochaine action consiste à revenir à l'étape 1.

Le processus itératif (étapes 1 à 4) se poursuit jusqu'à ce que la convergence au niveau du lac Champlain soit atteinte (à la fin du QM). Le processus est répété pour le QM suivant, et ainsi de suite jusqu'à ce que la série soit entièrement traitée.

Toutes ces variables sont interdépendantes. Par conséquent, ces processus itératifs sont nécessaires pour établir un bilan hydrologique à chaque quart de mois. La série historique des ANB, quant à elle, est fixe.

ANNEXE F - Services de prévision et indicateurs de performance au Canada

Au Canada, le MELCC se concentre sur la production de prévisions pour les affluents du fleuve Saint-Laurent. La prévision des crues du Saint-Laurent est produite par le palier fédéral, par Pêches et Océans Canada, et elle est transmise au ministère de la Sécurité publique.

L'équipe de prévision du MELCC produit des prévisions hydrologiques (débit et/ou niveau) pour plus de 130 emplacements au Québec (figure F-1), y compris pour la partie canadienne de la rivière Richelieu et ses principaux affluents (rivière l'Acadie et rivière des Hurons).

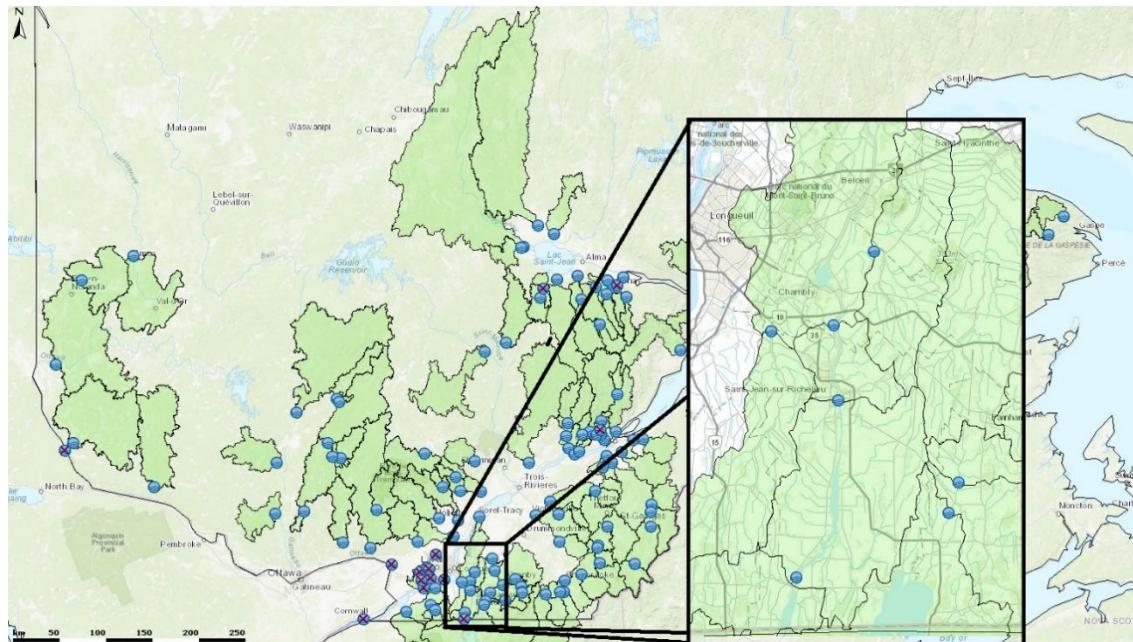


Figure F-1. Emplacements dans le bassin LCRR pour lesquels le MELCC produit des prévisions.

Le MELCC utilise le logiciel Delft-FEWS (Système d'alerte rapide aux inondations) de Deltares avec le modèle hydrologique semi-distribué HYDROTEL de l'Institut National de la Recherche Scientifique-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE) pour produire des prévisions sur trois à cinq jours. Les prévisionnistes appliquent une approche pratique pour l'assimilation des données afin d'ajuster les états du modèle en fonction de l'état observé. Cela peut se traduire par une correction manuelle du débit du lac Champlain dans les prévisions afin de tenir compte des effets du vent ou du déplacement de la courbe niveau-débit causée par la glace ou par la végétation aquatique.

Les prévisions propres à la rivière Richelieu comprennent le forçage découlant des prévisions de niveau du NERFC à Rouses Point. Les apports de la partie canadienne du bassin sont cumulés et calculés dans HYDROTEL. Les données de niveau pour Saint-Jean-sur-Richelieu et Saint-Paul-de-l'Île-aux-Noix, ainsi que les données de débit pour Carignan, sont utilisées pour l'assimilation des données. Les relations niveau-débit sont appliquées pour divers emplacements. La figure F-2 illustre les prévisions de débit et de niveau pour le cours supérieur de la rivière (entre la frontière internationale et le bassin de Chambly).

Prévision validée

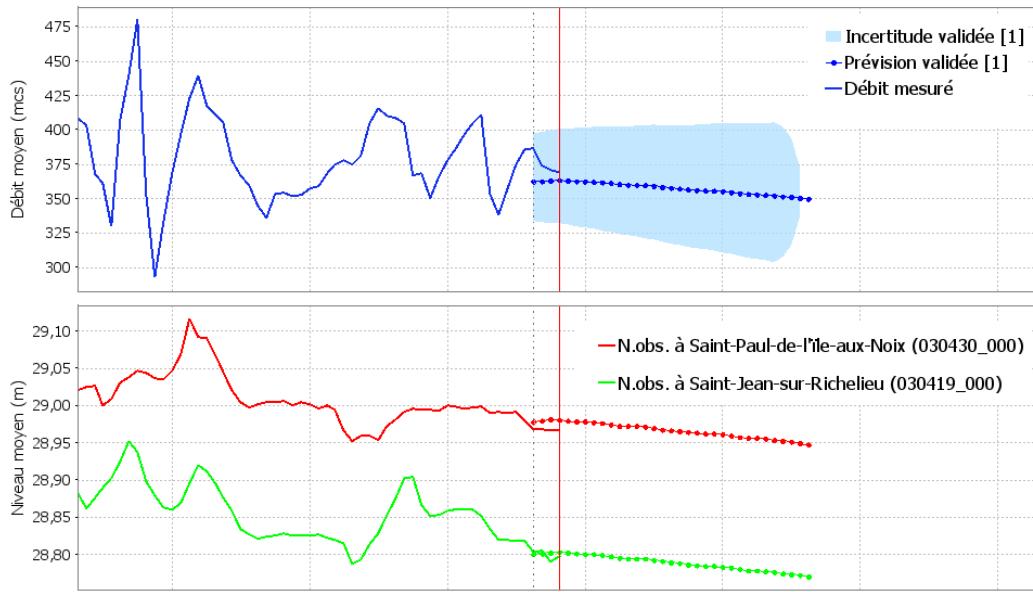


Figure F-2. Prévisions des débits et des niveaux du MELCC pour le cours supérieur de la rivière Richelieu.

Les prévisions sont habituellement produites avant 10 heures à partir des prévisions du NERFC de la veille qui établissent la condition limite en amont, à Rouses Point. Des mises à jour sont effectuées au besoin tout au long de la journée à mesure que de nouvelles observations et prévisions deviennent disponibles. Les données prévisionnelles sont disponibles sur le site Web du MELCC ainsi que sur la plateforme Vigilance Crue du MSP qui offre un accès public au Web ainsi qu'un accès restreint à une page contenant plus d'informations réservée aux responsables des mesures d'urgence (voir figure F-3 - Plateforme Vigilance du MSP accessible au public).

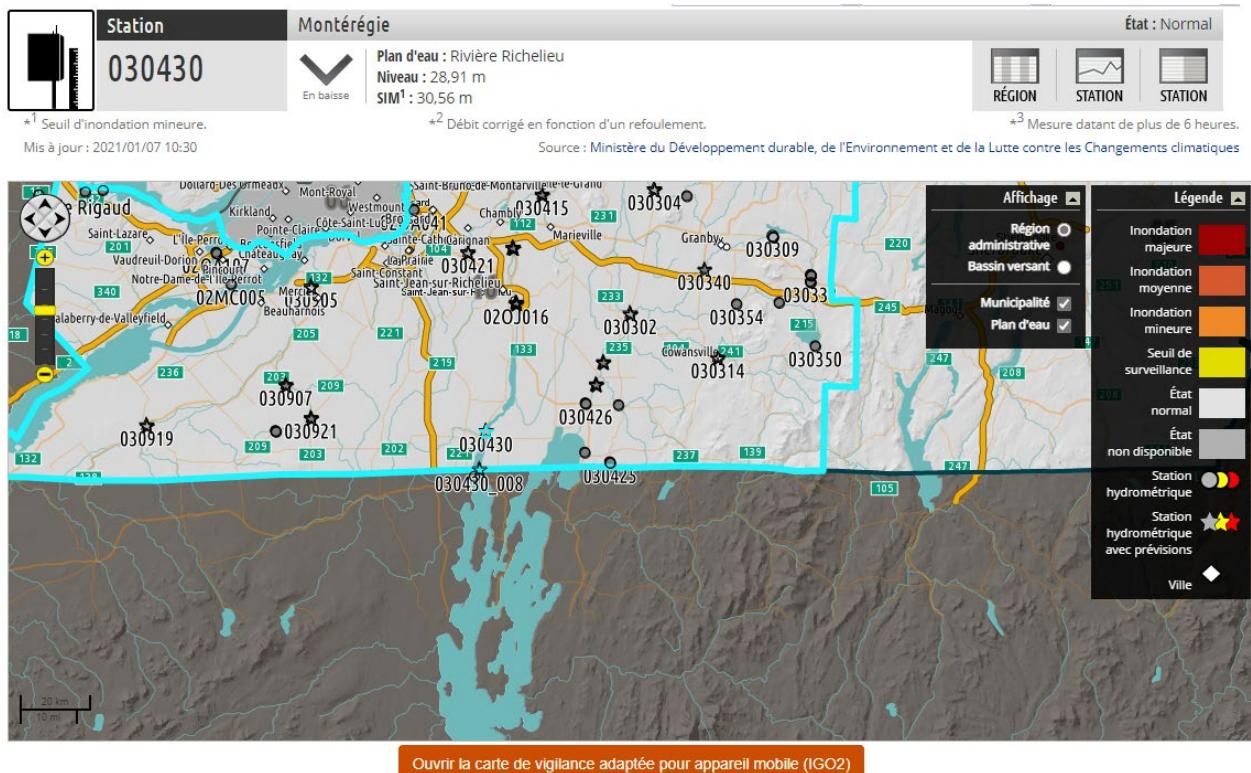


Figure F-3. Plateforme Vigilance du MSP accessible au public.

Le tableau F-1 présente les mesures calculées pour les prévisions de débit à Carignan, en aval de Saint-Jean-sur-Richelieu. L'EAM est l'erreur absolue moyenne pour des horizons journaliers. Le pourcentage de biais est une mesure du biais relatif des prévisions. Les paramètres d'alerte sont fondés sur les seuils d'inondation connus. Une alerte est basée sur la prévision du passage d'un seuil donné au seuil supérieur. Les alertes peuvent avoir réussi ou s'être révélées fausses (ce qui signifie qu'aucun passage au supérieur n'a été observé, bien qu'il ait été prévu) ou encore avoir été manquées (ce qui signifie que le passage au seuil supérieur a été constaté, mais qu'il n'avait pas été prévu).

Tableau F-1. Données prévisionnelles pour l'emplacement 030401_000, à Carignan (2019-2020).

	Jour 1	Jour 2	Jour 3
EAM (m^3/s)	66,2	91	102,9
BIAIS (%)	-0,7	-0,7	-0,3
Alerte réussie (%)	89	87	85
Alerte manquée (%)	11	13	15
Fausse alerte (constat)	0	3	2

L'inondation de 2019 a été le plus récent événement de débit élevé sur la rivière Richelieu. L'examen attentif d'une prévision émise permet d'évaluer la qualité du produit. Le tableau F-2 présente les mesures calculées pour les cinq épisodes de crue les plus importants de 2019, pour tous les horizons prévisionnels combinés (jour 1, jour 2 et jour 3).

Tableau F-2. Données prévisionnelles pour l'emplacement 030401_000, à Carignan (5 événements les plus importants en 2019).

	Prévision complète
EAM (m^3/s)	53
BIAIS (%)	-0,5

La figure F-4 montre la période du printemps 2019 (de la mi-avril au début juin) avec cinq prévisions d'événements, comparativement aux débits observés. L'augmentation lente des débits tout au long de la deuxième moitié d'avril a été correctement captée. Un pic observé a posteriori n'a cependant pas été capté dans les prévisions de la deuxième moitié d'avril. Ce sont des événements soudains à développement rapide qui sont difficiles à prendre en compte. En fait, le modèle de l'ETS décrit plus loin dans le présent rapport a été élaboré expressément pour améliorer les prévisions pour ce genre d'événement. Les prévisionnistes sont généralement en mesure de calculer manuellement l'effet des prévisions du vent à partir de modèles empiriques et de l'intégrer aux prévisions, comme on peut le constater pour l'événement de la mi-mai, qui présente une bonne correspondance entre les prévisions et les observations.

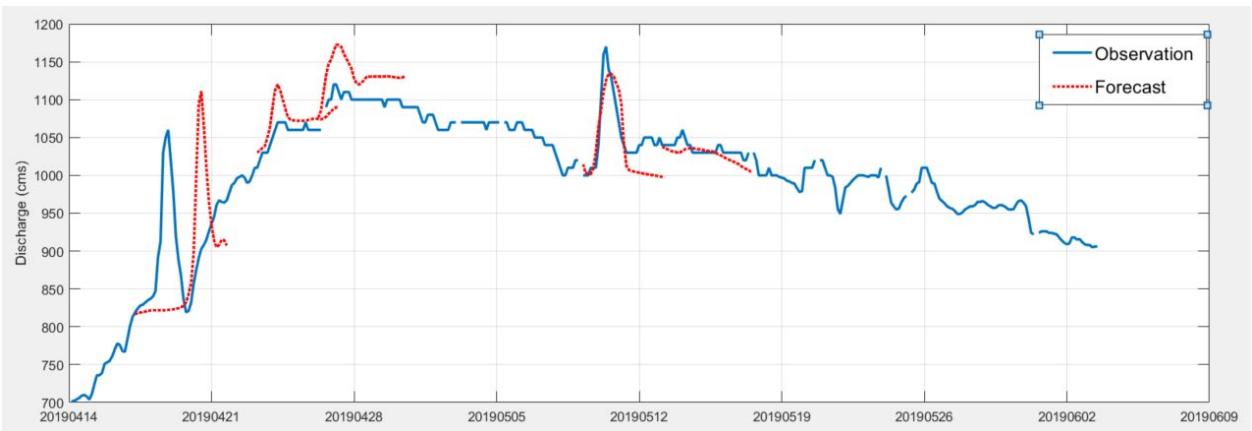


Figure F-4. Prévisions d'épisodes de crue (5 événements) en 2019 (Discharge (cms)= Débit (m^3/s)), Forecast=Prévision).



ANNEXE G - Services de prévision et indicateurs de performance aux États-Unis

Aux États-Unis, le National Weather Service (NWS) produit des prévisions hydrologiques (séries chronologiques de débit et/ou de niveau) par l'entremise de ses River Forecast Centers (RFC) qui sont au nombre de 12 sur le territoire des États-Unis contigus et auxquels s'ajoute un treizième en Alaska. Le Northeast River Forecast Center (NERFC) produit des prévisions pour plus de 200 emplacements le long de cours d'eau en Nouvelle-Angleterre et dans certaines parties de l'État de New York (figure G-1). Les points de prévision sont généralement coimplantés avec des jauges de l'USGS (mais cela n'est pas *systématique*) dans les collectivités ayant réclamé des services de prévision de crues ou en ayant prouvé la nécessité. Pour la plupart des points de prévision, le débit des cours d'eau est simulé par des algorithmes de modèles hydrographiques globaux. Comme les données disponibles sur le forçage atmosphérique de ces modèles sont émises à un pas de temps de 6 heures, et afin que les réponses aux pics hydrologiques puissent être saisies, les points de prévision sont généralement limités aux endroits où l'aire de drainage différentielle à hauteur du point de prévision est de 100 milles carrés au moins.

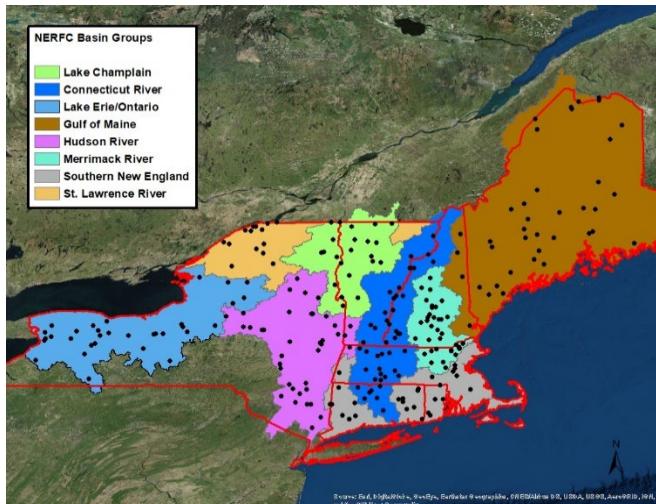


Figure G-1. Points de prévision du NERFC (en noir) et bassins hydrologiques (anglais seulement).

La zone de prévision du NERFC englobe la partie américaine du bassin du lac Champlain et de la rivière Richelieu. Les prévisions pour les principaux affluents du bassin LCRR concernent tous le secteur amont du lac Champlain, de sorte que les apports modélisés pour chacun de ces affluents puissent servir d'intrants aux simulations du régime hydrologique du lac. La figure G-2 montre les points de prévision actuels dans le bassin et leurs aires de drainage contributives, qui définissent les bassins versants des modèles hydrologiques globaux utilisés par le NERFC.

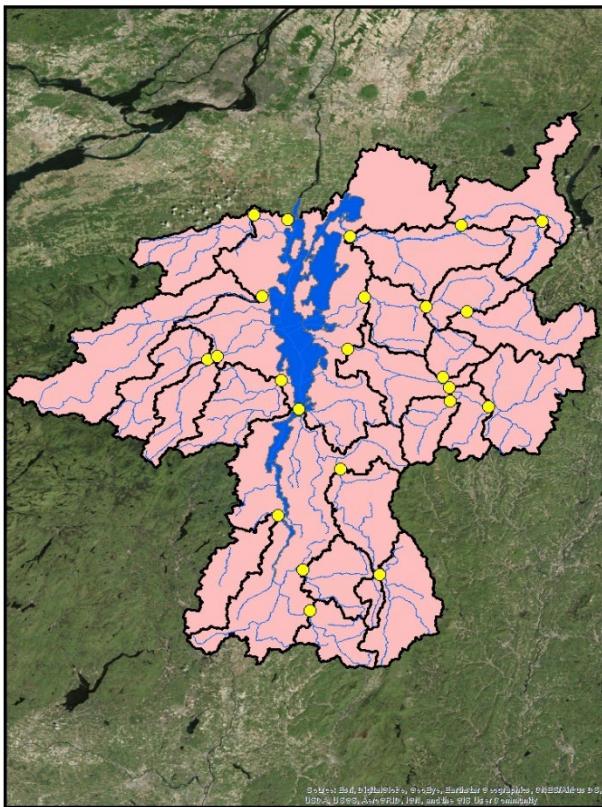


Figure G-2. Points de prévision actuels (jaunes) du bassin LCRR et leurs aires de drainage respectives.

Le NWS utilise une version du logiciel Système d’alerte rapide aux inondations (SARI) de Deltaires pour créer ces prévisions. Les algorithmes du modèle hydrologique global utilisés pour la plupart des points de prévision sont internes à l’environnement de SARI. En règle générale, la version du SARI qu’utilise le NWS (appelée CHPS pour Community Hydrologic Prediction System) permet : a) d’intégrer des données de forçage selon une distribution spatiale et temporelle (p. ex., précipitations, température); b) d’établir des valeurs aréales moyennes des forçages pour chaque bassin hydrographique et chaque pas de temps du modèle ; c) d’exécuter les divers algorithmes relatifs à l’accumulation et à l’ablation de la neige, à la comptabilisation de l’humidité du sol, au ruissellement et à la résurgence des eaux souterraines à la surface, et d) de calculer le ruissellement et les apports dans les bassins et les plans d’eau en aval.

Le système CHPS permet également d’utiliser différents modèles externes autonomes. Le cas échéant, toutes les données d’entrée du modèle sont préparées dans l’environnement du CHPS, puis transmises au modèle externe. Le CHPS initialise le modèle externe, puis accepte en retour les résultats du modèle aux fins d’affichage. Comme exemple de modèle externe autonome intégré au CHPS, mentionnons le modèle Hydrologic Engineering Center – River Analysis System (HEC-RAS) du US Army Corps of Engineers dont se sert le NERFC pour simuler le comportement du lac Champlain et de la rivière Richelieu jusqu’à Saint-Jean-sur-Richelieu.

Les hydrologues du NERFC émettent régulièrement des prévisions déterministes pour chaque point de prévision. Les prévisionnistes, quant à eux, appliquent une approche interactive et pratique pour ajuster les simulations des modèles hydrologiques afin de les amener à correspondre aux observations des cinq derniers jours aux stations hydrométriques de l’USGS, puis de prolonger les prévisions de niveau d’eau au-delà de cinq jours, en fonction des prévisions des modèles de prévision météorologique relativement aux précipitations, à la température, aux changements d’humidité du sol et aux apports en amont.

La figure G-3 présente un exemple de prévisions du NERFC pour le 25 mars 2021. Les observations y sont représentées par des points noirs, les simulations par modèle informatique sont représentées par des lignes bleues et les prévisions (qui combinent habituellement les observations les plus récentes avec les simulations) sont présentées en magenta. À noter que des graphiques

sont fournis pour Rouses Point (en haut) et pour Saint-Jean-sur-Richelieu (en bas). Comme nous l'avons vu, le domaine du modèle hydraulique HEC-RAS du NERFC part du lac Champlain et s'étend le long de la rivière Richelieu, en aval de Saint-Jean-sur-Richelieu. Ce modèle hydraulique englobe des sections transversales du lac et de la rivière, ainsi que de la plaine inondable. Les débits correspondant à chaque coupe transversale du modèle sont simulés à l'aide de la série chronologique des apports de chaque bassin versant amont qui alimentent le modèle. Ensuite, pour les sections transversales jaugées, les courbes débit-niveau servent à traduire les débits en altitudes.

Tous les mois, le NERFC évalue rétrospectivement la performance de prévision. Pour ce faire, un script qui compare chaque valeur de prévision publiée avec l'observation finale pour le même pas de temps est exécuté automatiquement. Pour des points de prévision choisis dans un bassin hydrologique donné et selon un certain pas de temps (un mois), le script détermine le nombre de comparaisons qui existent dans la base de données. Le script calcule ensuite l'erreur moyenne et l'erreur absolue moyenne pour chacun des points de prévision. Le tableau G-1 montre les résultats du script pour avril 2019.

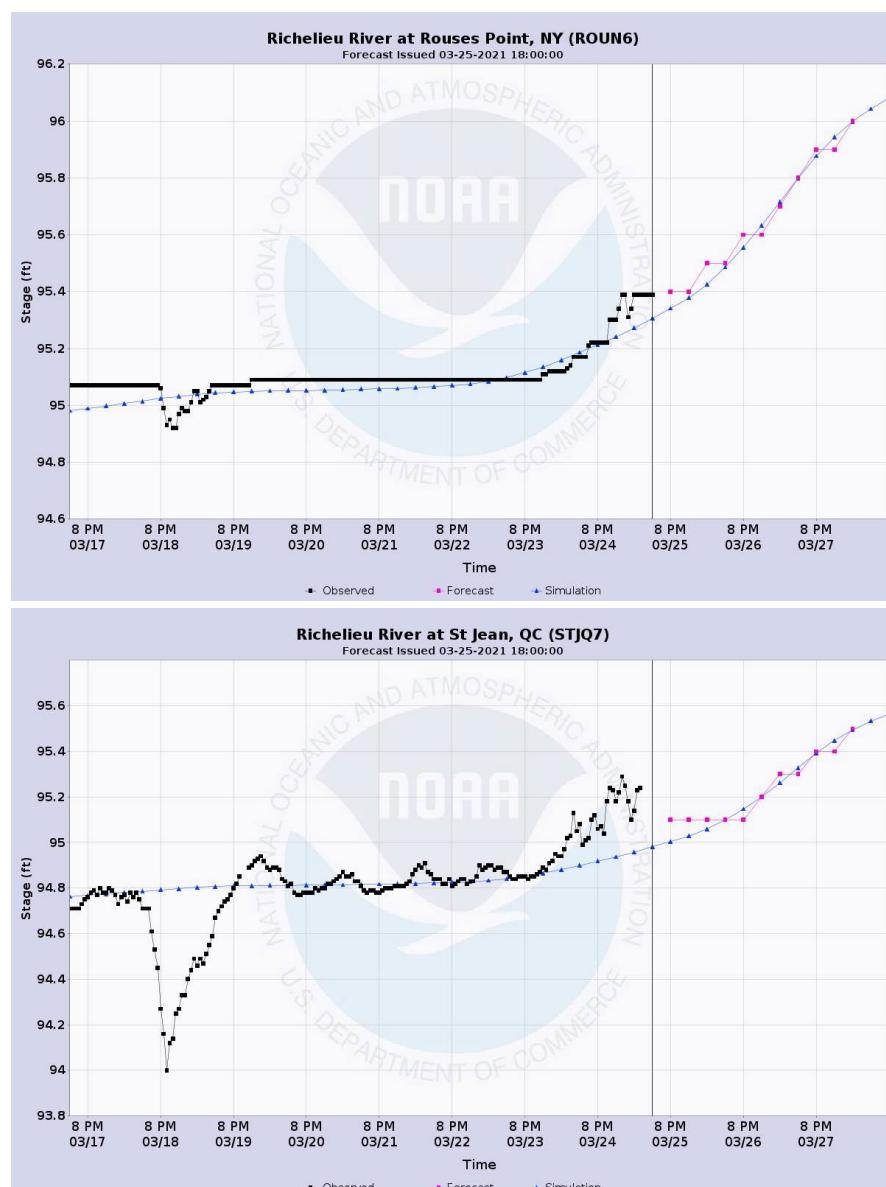


Figure G-3. Indication de prévision du modèle hydrologique du NERFC pour Rouses Point (en haut) et pour Saint-Jean-sur-Richelieu (en bas) (anglais seulement).

Tableau G-1. Erreur moyenne mensuelle et erreur absolue moyenne pour les prévisions du bassin du lac Champlain (avril 2019).

Relevés des rivières d'avril 2019 Lac Champlain				
ID de la station	Nom	Numéro	Erreur moyenne (pi)	Erreur absolue Moyenne (pi)
CZRN6	Rivière Great Chazy à Perry Mills (NY)	318	0.092	0.363
ASFN6	Bras est de la Rivière Au Sable, à Au Sable Forks (NY)	410	0.085	0.475
PBGN6	Rivière Saranac, à Plattsburgh (NY)	354	0.021	0.237
CARV1	Rivière Poultney, près de Fair Haven (VT)	363	-1.504	1.707
CENV1	Ruisseau Otter, à Center Rutland (VT)	411	-0.19	0.674
GVVN6	Rivière Mettawee à Middle Granville (NY)	366	-0.113	0.227
MONV1	Rivière Winooski, à Montpelier (VT)	411	0.282	0.488
MOOV1	Mad River, à Moretown (VT)	423	-0.154	0.654
ESSV1	Rivière Winooski, à Essex Junction (VT)	437	0.152	0.832
JONV1	Rivière Lamoille, à Johnson (VT)	397	0.175	0.821
NTYV1	Rivière Missisquoi, à North Troy (VT)	409	-0.286	0.901
EBKV1	Rivière Missisquoi, à East Berkshire (VT)	385	-0.176	0.712
ROUN6	Lac Champlain, à Rouses Point (NY)	381	-0.098	0.128
STJQ7	Rivière Richelieu, à Saint-Jean (QC)	394	-0.083	0.181

Les statistiques relatives à ces erreurs moyennes et erreurs absolues moyennes sont également produites pour le sous-ensemble de prévisions ou d'observations qui comprennent les dépassements du seuil d'inondation. Le tableau G-2 montre les résultats d'avril 2019 pour les points de prévision du bassin du lac Champlain, dans le cas de ce sous-ensemble. Il est à noter que les erreurs moyennes et les erreurs absolues moyennes dans ce sous-ensemble sont généralement plus importantes que dans l'évaluation d'ensemble présentée au tableau G-1. Cela n'a rien de surprenant, car les quantités de précipitations prévues peuvent varier considérablement. Les accumulations réelles en un grand nombre de points de prévision de cours d'eau torrentiels peuvent augmenter rapidement pour atteindre le niveau critique de crue plus rapidement que ne permet de l'entrevoir une mise à jour des prévisions. Malgré cette tendance générale, il est intéressant de noter que les prévisions de dépassement des crues du lac Champlain à Rouses Point (ROUN6) étaient en fait meilleures que dans les conditions générales d'avril 2019. Cela est peut-être dû à la nature des inondations survenues en avril 2019, principalement en raison d'une fonte très graduelle de la neige, sur une longue période, qui a maintenu le statut d'inondation mineure pendant plus de 30 jours.

Tableau G-2. Erreur moyenne et erreur absolue moyenne pour les prévisions du lac Champlain qui comprennent un dépassement du seuil d'inondation (avril 2019).

..... PRÉVISION DE CRUE PAR POINT DE PRÉV			
ID de la station	Nombre	Erreur moyenne (pi)	Erreur absolue moyenne (pi)
ASFN6	28	0.752	1.212
CENVI	74	-1.829	1.869
ESSVI	53	0.89	1.79
GVVN6	20	-1.471	1.493
JONVI	11	0.274	0.459
MOOV1	6	1.462	1.462
NTYVI	33	0.337	1.343
ROUN6	87	-0.046	0.064
STJQ7	55	0.125	0.19

..... Remarque : Comprend les paires pour lesquelles la prévision ou l'observation est supérieure au seuil d'inondation.....

Ces mêmes statistiques sont également regroupées à l'échelle régionale, puis ventilées par : a) horizon prévisionnel ; b) heures d'émission des prévisions (00z, 06z, 12z, 18z) et c) changement d'amplitude du niveau. Par ailleurs, les comparaisons régionales entre les prévisions et les observations servent également à déterminer la probabilité de détection (PDD) mensuelle et le rapport de fausses alarmes (FAR). Le PDD est une statistique qui indique, pour tous les épisodes de crue confirmés sur une période donnée (p. ex., un mois), le pourcentage de temps durant lequel a duré la crue prévue. À l'inverse, le FAR indique, pour toutes les crues prévues, le pourcentage de temps durant lequel les crues prévues ne se sont pas concrétisées. Les PPD et FAR sont un autre ensemble de statistiques qui sont regroupées dans l'ensemble de la région aux fins de l'évaluation mensuelle. Le tableau G-3 montre les résultats des PPD et des FAR du NERFC pour avril 2019.

Tableau G-3 - Taux de probabilités de détection et rapports de fausses alarmes dans la région du Nord-Est en avril 2019.

..... TABLEAU des prob. de détect.-TFA				
	Tous	Jour 1	Jour 2	Jour 3
Bons	2044	891	628	525
Manquées	676	177	274	225
Fausses alarmes	620	160	226	234
Prob. de détect	0.75	0.83	0.7	0.7
TFA	0.23	0.15	0.26	0.31

La NERFC dispose d'autres outils pour évaluer la performance des prévisions, comme le Interactive Verification Program (IVP), qui peut calculer diverses statistiques pour n'importe quel pas de temps des prévisions et des observations à des emplacements particuliers. La figure G-4 présente un graphique de comparaison typique des valeurs de toutes les prévisions sur 72 heures (c.-à-d. 12 valeurs par prévision) ainsi que des observations faites. Ce graphique pour la rivière Winooski à Essex Junction (Vermont) illustre de façon assez typique l'écart entre les valeurs prévues et les valeurs observées à des emplacements riverains. L'heure de début de la fenêtre sélectionnée pour le graphique (8/1/2011) correspond à la date à laquelle le NERFC est passé des prévisions à 54 heures à des prévisions à 72 heures.

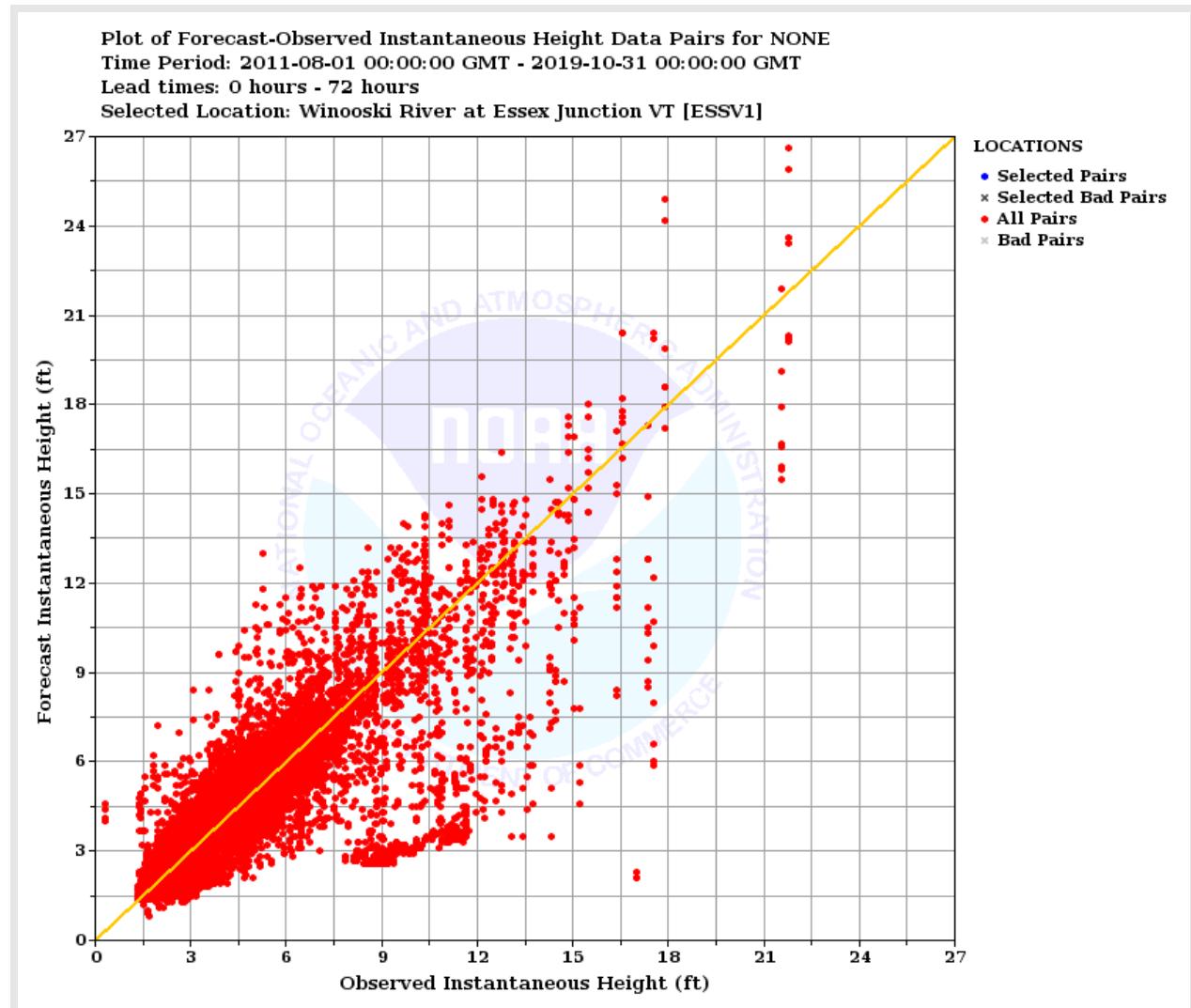


Figure G-4. Prévisions typiques de l'IVP comparativement au graphique des observations pour des prévisions à 72 heures à l'un des emplacements riverains du NERFC (anglais seulement).

Par contraste avec la figure G-4, la figure G-5 montre le même type de graphique couvrant la même période pour Rouses Point, sur le lac Champlain. Les prévisions et les observations sont plus étroitement corrélées à cet endroit, principalement en raison du grand volume d'eau dans le lac qui varie plus graduellement que dans une rivière. Il convient également de noter que le modèle hydrologique actuellement utilisé pour le lac est le modèle du système d'analyse des cours d'eau du Hydraulic Engineering Center River Analysis System du US Army Corps of Engineers (HEC-RAS). Bien que l'application de ce modèle transversal au lac Champlain soit relativement grossière, la figure G-5 montre que le modèle produit d'excellents résultats en ce qui concerne les prévisions d'élévation de la surface de l'eau du lac. Les écarts les plus importants entre les prévisions et les valeurs observées surviennent quand les effets du vent perturbent la surface de l'eau, car la version du HEC-RAS utilisée pour cette simulation ne

simule pas le vent. Le tableau G-4 présente une comparaison des statistiques de base tirées des figures G-4 et G-5. On notera l'amélioration relative de la performance des prévisions pour ROUN6 par rapport à celles pour ESSVI.

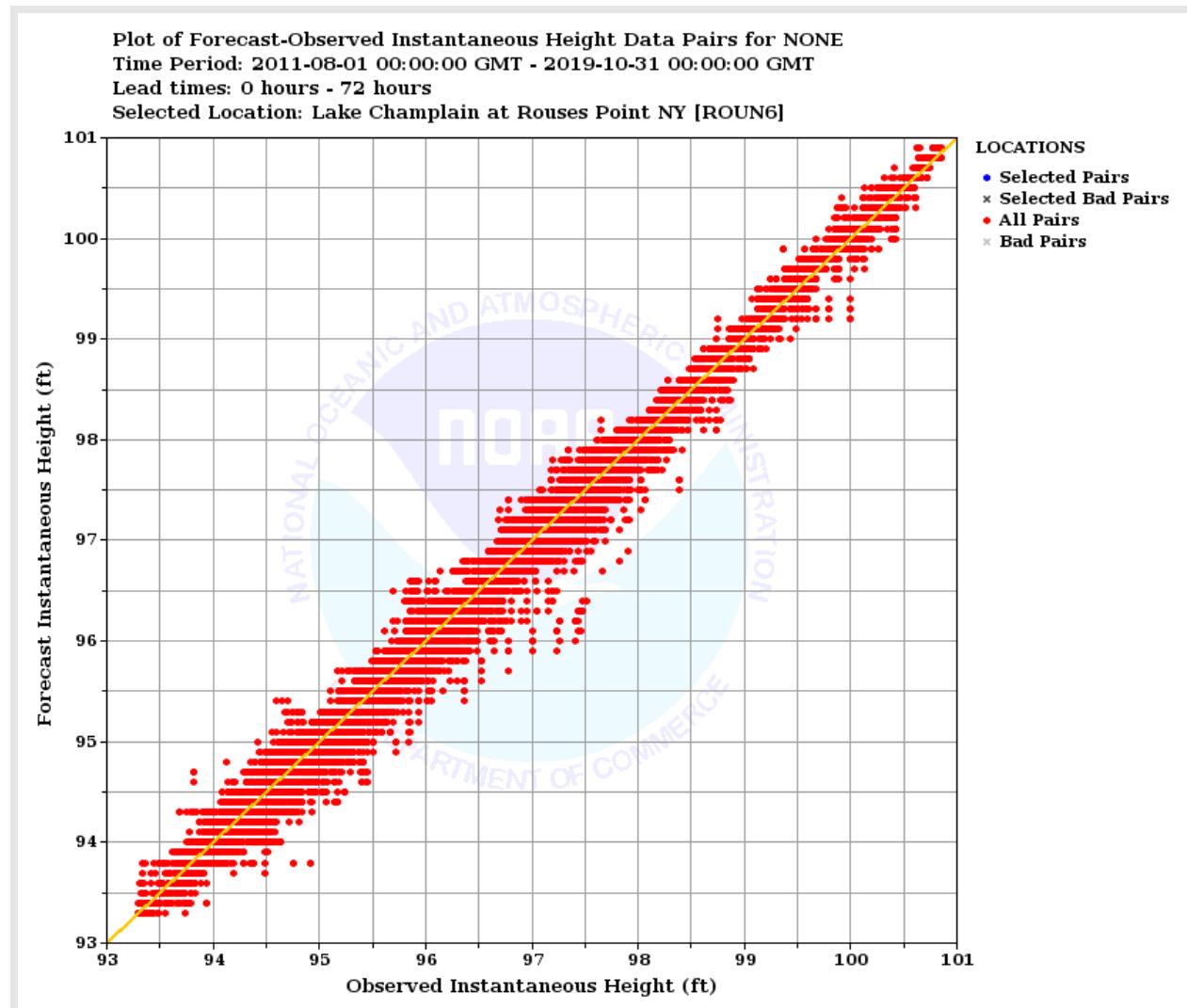


Figure G-5. Graphique des prévisions et des observations pour les prévisions sur 72 heures au lac Champlain à Rouses Point (ROUN6) (anglais seulement).

Tableau G-4. Comparaison des statistiques d'Essex Junction (Vermont) et de Rouses Point (New York) (du 8/1/2011 au 31/10/2019).

Lieu	Erreur moyenne (pi)	Erreur absolue moyenne (pi)	Erreur-quadratique moyenne (pi)	Erreur maximale (pi)	Corrélation de Pearson	
					r	r^2
ESSV1	-0.097	0.4615	1.057	14.9	0.851	0.724
ROUN6	-0.0098	0.0943	0.1395	1.41	0.996	0.992

L'IVP permet également la désagrégation des statistiques prévisionnelles par horizon prévisionnel. Étant donné que les prévisions du NERFC sont émises pour des pas de temps de six heures, cela signifie qu'il est possible de produire des statistiques de prévision pour chaque pas de temps afin d'évaluer l'évolution de la performance. La figure G-6 montre un histogramme de l'erreur moyenne (EM), de l'erreur absolue moyenne (EAM), de l'erreur quadratique moyenne (EQM) et de la corrélation de Pearson (CORR) pour Rouses Point, encore une fois pour la période du 8/1/2011 au 31/10/2019, mais selon une ventilation par horizon prévisionnel. Le tableau G-5 présente les valeurs brutes de ce graphique. À noter que, comme on pouvait s'y attendre, l'EAM et l'EQM augmentent généralement dans le même sens que l'horizon prévisionnel. Cependant, les valeurs d'EM ne montrent pas la même tendance à la hausse en même temps qu'augmente l'horizon prévisionnel, car les valeurs pour les heures 30 et 54 montrent de façon atypique une meilleure concordance avec les observations que les valeurs pour les heures 24 et 48, respectivement. On ne constate pas ce comportement à d'autres emplacements riverains dans le bassin LCRR. Cependant, il convient aussi de noter que toutes les valeurs d'EM dans ce graphique se situent à +/-0,03 pi des valeurs observées..

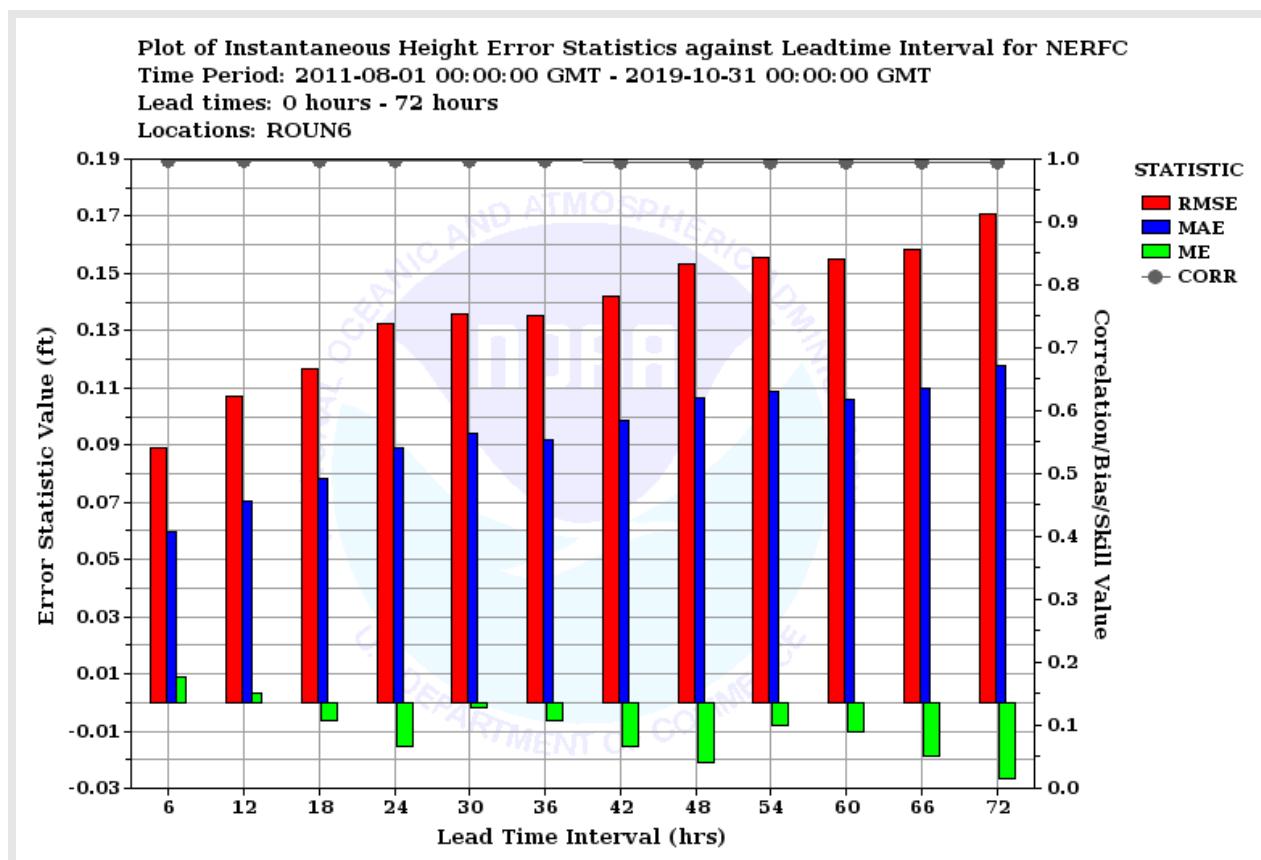


Figure G-6. Statistiques simples de la performance dans le cas du lac Champlain à Rouses Point (ROUN6), ventilées par horizon de prévision (anglais seulement).

Tableau G-5. Statistiques simples de la performance dans le cas du lac Champlain à Rouses Point (ROUN6), ventilées par horizon de prévision.

Horizon temporal (en h)	Erreur moyenne (pi)	Erreur absolue moyenne (pi)	Erreur-quadratique moyenne	Corrélation de Pearson	
				r	r^2
6	0.009	0.060	0.089	0.998	0.997
12	0.003	0.070	0.107	0.998	0.995
18	-0.006	0.078	0.117	0.998	0.994
24	-0.016	0.089	0.132	0.997	0.993
30	-0.002	0.094	0.136	0.996	0.993
36	-0.006	0.092	0.135	0.996	0.993
42	-0.015	0.099	0.142	0.996	0.992
48	-0.021	0.106	0.153	0.996	0.991
54	-0.008	0.109	0.155	0.995	0.990
60	-0.010	0.106	0.155	0.995	0.990
66	-0.019	0.110	0.159	0.995	0.990
72	-0.027	0.171	0.171	0.994	0.989

Prévisions et services du NERFC

Une fois produites par le NERFC, les prévisions sont transmises, par message texte, à chacun des huit WFO de la région. Les gestionnaires des prévisions hydrologiques ont la responsabilité de publier les prévisions, après quoi des hydrogrammes individuels pour chaque point sont affichés sur le site Web du Advanced Hydrologic Prediction System (AHPS) de l'Office of Water Prediction (OWP) du NWS (<https://water.weather.gov/ahps/>). L'interface graphique de l'AHPS affiche une carte indiquant la catégorie de la crue maximale prévue à chaque point de prévision (figure G-7). En sélectionnant les points de prévision sur cette carte, tout usager peut accéder à des pages Web en lien avec ces points. Ces pages donnent un hydrogramme ainsi que d'autres renseignements propres au site, comme une carte de localisation, des données historiques sur les inondations, les seuils de catégorie de crue et les graphiques de probabilité de dépassement. Le site AHPS de Rouses Point sur le lac Champlain est accessible à l'adresse : <https://water.weather.gov/ahps2/hydrograph.php?WFO=btv&gage=roun6>.

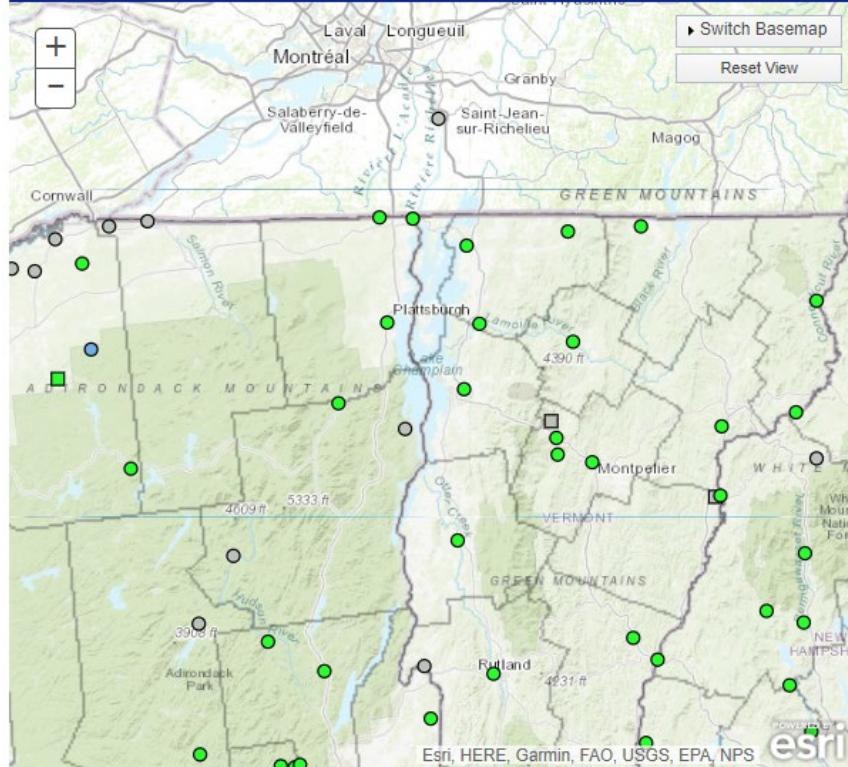
AHPS Forecast Gauge Map



Maximum Forecast Flood Category Through: 08/15/2019 11:57:41 UTC



Entire Period



○ Probability and forecasts available
□ Forecasts available

230 total gauges
[Show all locations in flood \(0\)](#)

- 0 Gauges: Major Flooding
- 0 Gauges: Moderate Flooding
- 0 Gauges: Minor Flooding
- 7 Gauges: Near Flood Stage
- 174 Gauges: No Flooding
- 4 Flood Category Not Defined
- 0 At or Below Low Water Threshold
- 45 Gauges: Forecasts Are Not Current
- 0 Gauges: No forecast within selected timeframe
- 0 Gauges: Out of Service

Figure G-7. Carte sites de prévisions jaugées AHPS du NERFC pour la région du lac Champlain (anglais seulement).

Voici les autres produits graphiques générés par le NERFC :

Carte des précipitations journalières — Chaque jour, les prévisionnistes du NERFC effectuent une vérification de qualité en regard des précipitations horaires des 24 dernières heures, telles qu'elles ont été observées et enregistrées. Les données compilées sur les précipitations sont additionnées pour chaque emplacement jaugé, pour les périodes de six heures se terminant à 00z, à 06z, à 12z et à 18z. Des grilles de précipitations distribuées sont créées pour chaque période de 6 heures selon un calcul d'interpolation des valeurs effectué pour chaque jauge. Enfin, une grille des totaux quotidiens est créée par l'addition des quatre grilles de 6 heures. La figure G-8 montre un exemple d'une carte de précipitations totales journalières. Le NERFC archive chacune de ces cartes journalières et crée également des cartes sommatives à 3 et à 5 jours. Ces cartes sont accessibles à l'adresse <https://www.weather.gov/nerfc/ObservedPrecipitation>.

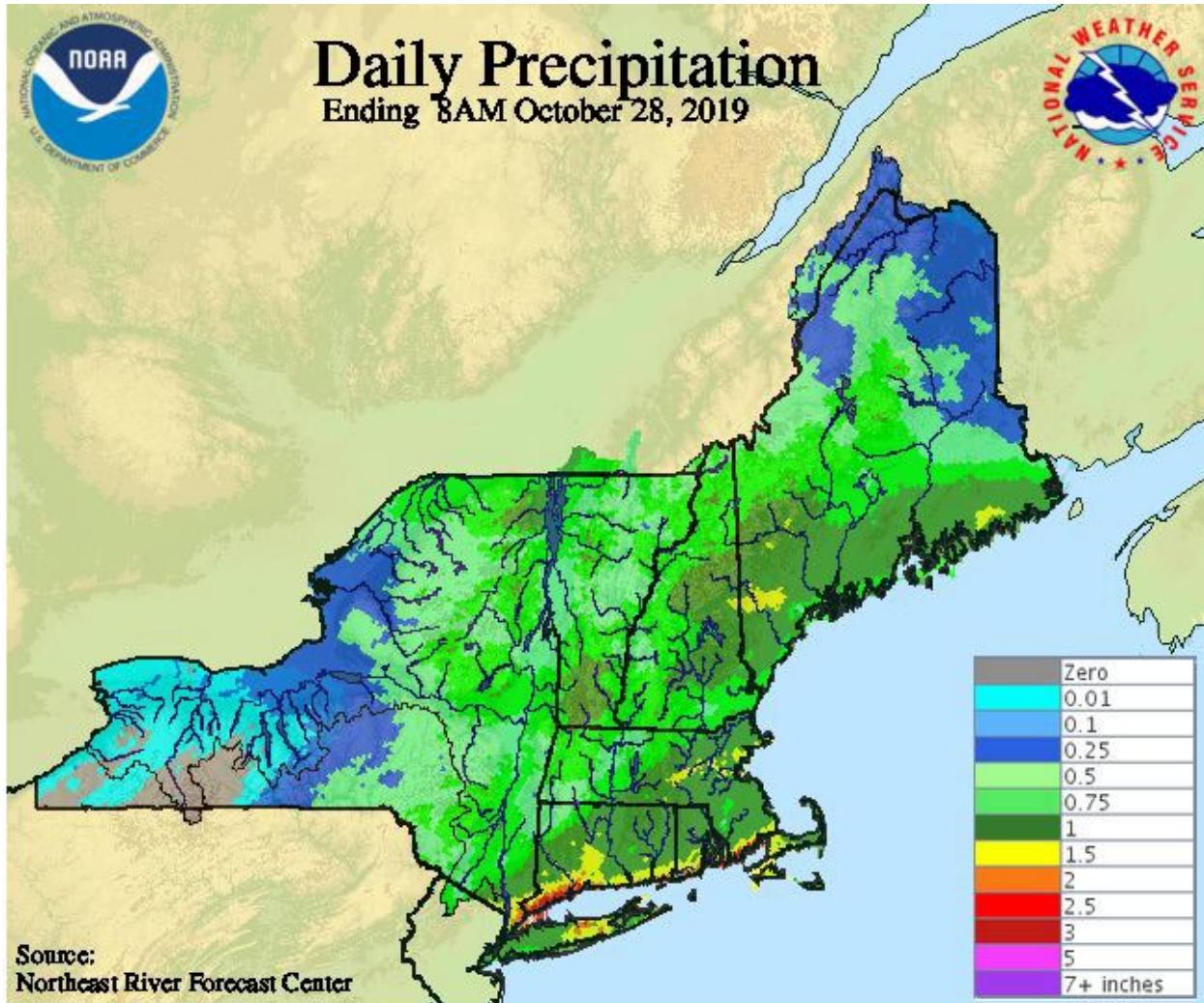


Figure G-8. Précipitations observées sur 24 heures par le NERFC (anglais seulement).

Quantitative Precipitation Forecast (QPF) — Les prévisionnistes du NERFC examinent les modèles atmosphériques les plus récents afin d'élaborer de futurs forçages de précipitations pour les modèles hydrologiques CHPS. Ces cartes QPF couvrent généralement 72 heures, mais vont parfois jusqu'à 96 heures quand un événement imminent chevauche la période de 72 à 96 heures. Les prévisionnistes du NERFC actualisent les cartés QPF trois fois par jour (quatre fois, quand une inondation nécessite la mobilisation d'un personnel de nuit). Comme pour les cartes de précipitations observées (décrivées ci-dessus), les cartes QPF sont élaborées pour chaque pas de temps de 6 heures se terminant à 00z, à 06z, à 12z et à 18z. Une carte résumant les QPF pour toute la période de prévision des précipitations est ensuite élaborée et publiée. La figure G-9 montre un exemple de graphique de QPF de 72 heures. Cette carte, ainsi que chaque carte additionnelle de QPF de six heures qui la compose, sont accessibles à l'adresse : <https://www.weather.gov/nerfc/ForecastPrecipitation>.

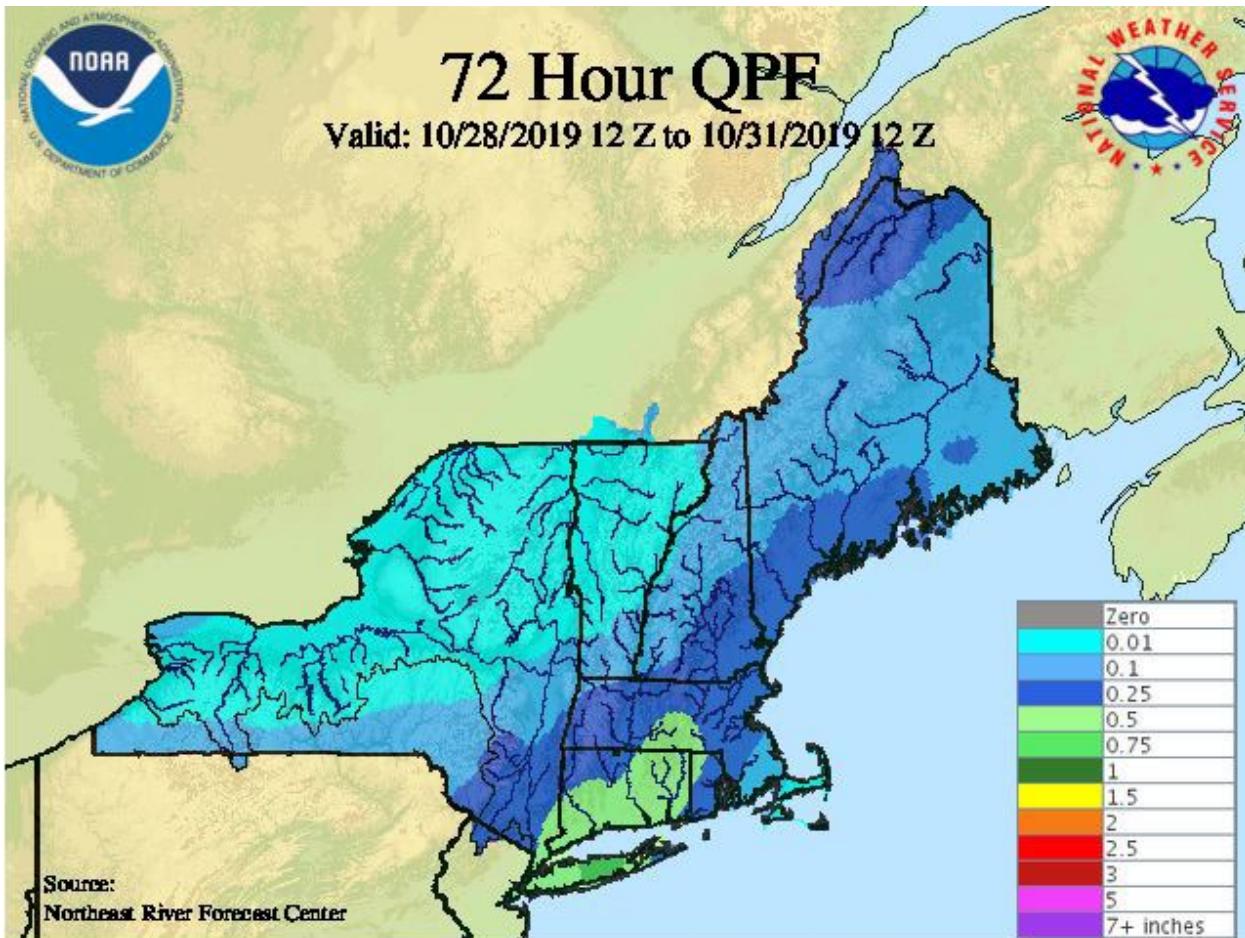
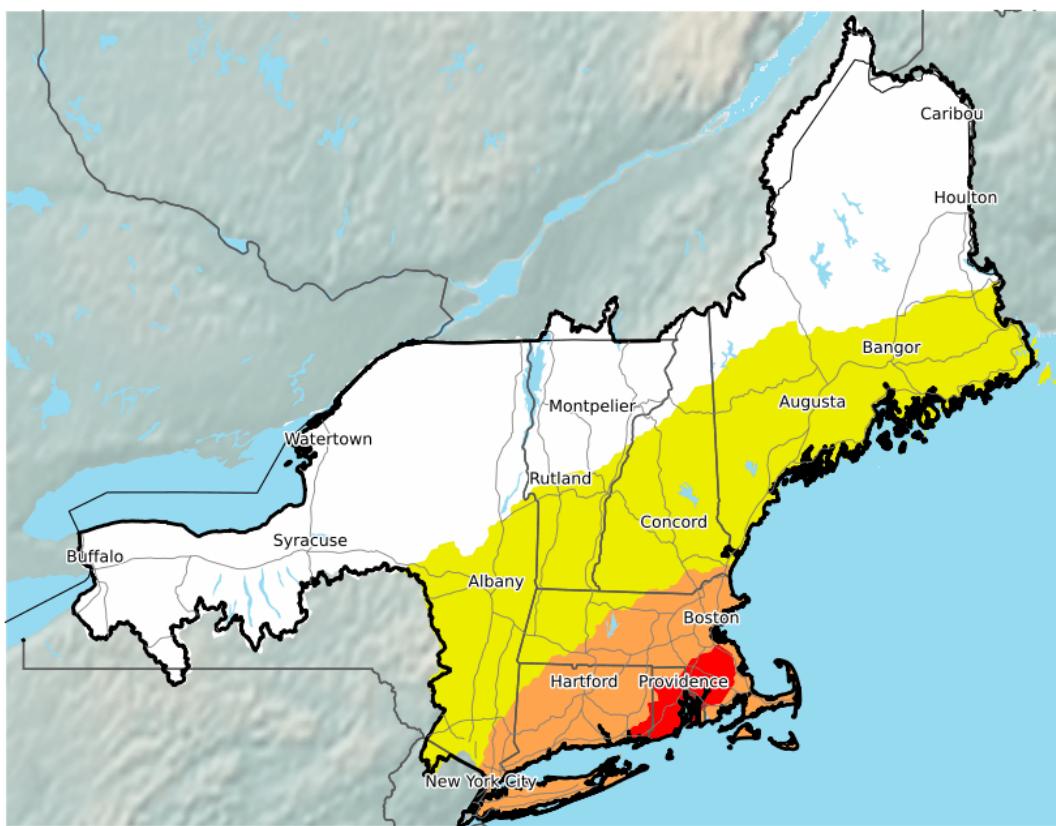


Figure G-9. Précipitations prévues dans les 72 heures du NERFC (anglais seulement).

River Flood Outlook Product (FOP) à 5 jours – Après la publication des prévisions journalières, le prévisionniste en chef de service évalue les endroits où une crue notoire (c.-à-d. modérée ou majeure) s'est produite, ou encore s'avère probable ou possible, en vue d'élaborer une carte qui fera office de préavis d'inondations majeures, ou FOP, destinée à servir de référence rapide à l'échelle régionale pour les entités partenaires du NERFC et pour le grand public. Le plus souvent, le graphique indique qu'aucune inondation importante n'est attendue. Toutefois, si une inondation est imminente ou prévue, le graphique peut être rempli pour plusieurs jours de suite. La figure G-10 présente un exemple de graphique FOP rempli. Ce graphique est mis à jour quotidiennement et il est accessible à l'adresse : <https://www.weather.gov/nerfc/PSCCE>.

5-Day Significant River Flood Outlook

Valid: 10/22/2019 08:00 AM - 10/27/2019 08:00 AM EDT



**National Weather Service
Northeast RFC**
10/22/2019 03:14 PM EDT

Follow Us:
weather.gov/nerfc

Significant River Flooding impacts include road hazards and damage to residential, commercial, and/or agricultural areas. Evacuation may be required. Flash flooding or Minor river flooding are NOT included in this outlook. Check your local weather forecast frequently for the most up-to-date information for your area.

Shaded areas are the forecast region of the Northeast River Forecast Center



Significant River Flooding Not Expected



Significant River Flooding Possible

Weather conditions indicate, without certainty that significant river flooding could occur



Significant River Flooding Likely

Weather conditions indicate that significant river flood conditions can be expected



Significant River Flooding Occurring

Significant river flooding is occurring at this time

Figure G-10. Flood Outlook Product du NERFC (exemple) (anglais seulement).

Flash Flood Guidance — En plus des prévisions fluviales émises quotidiennement, les prévisionnistes du NERFC produisent des cartes d'avis de crue éclair trois fois par jour. Ces cartes, qui sont générées pour des indications d'une heure, de trois heures et de six heures, fournissent des estimations du volume de pluie susceptible d'occasionner des crues subites. Les algorithmes utilisés pour ces calculs tiennent compte, pour chaque cellule de 4 km du quadrillage de la région, de la teneur en humidité du sol modélisée, de la conductivité hydrologique du sol et du pourcentage de terres imperméables. Les graphiques de ces cartes d'indication de crue éclair sont mis à jour à l'adresse <https://www.weather.gov/nerfc/Htg> à mesure qu'ils sont générés. La

figure G-11 montre un exemple de carte d'indication de crue éclair à échéance d'une heure.

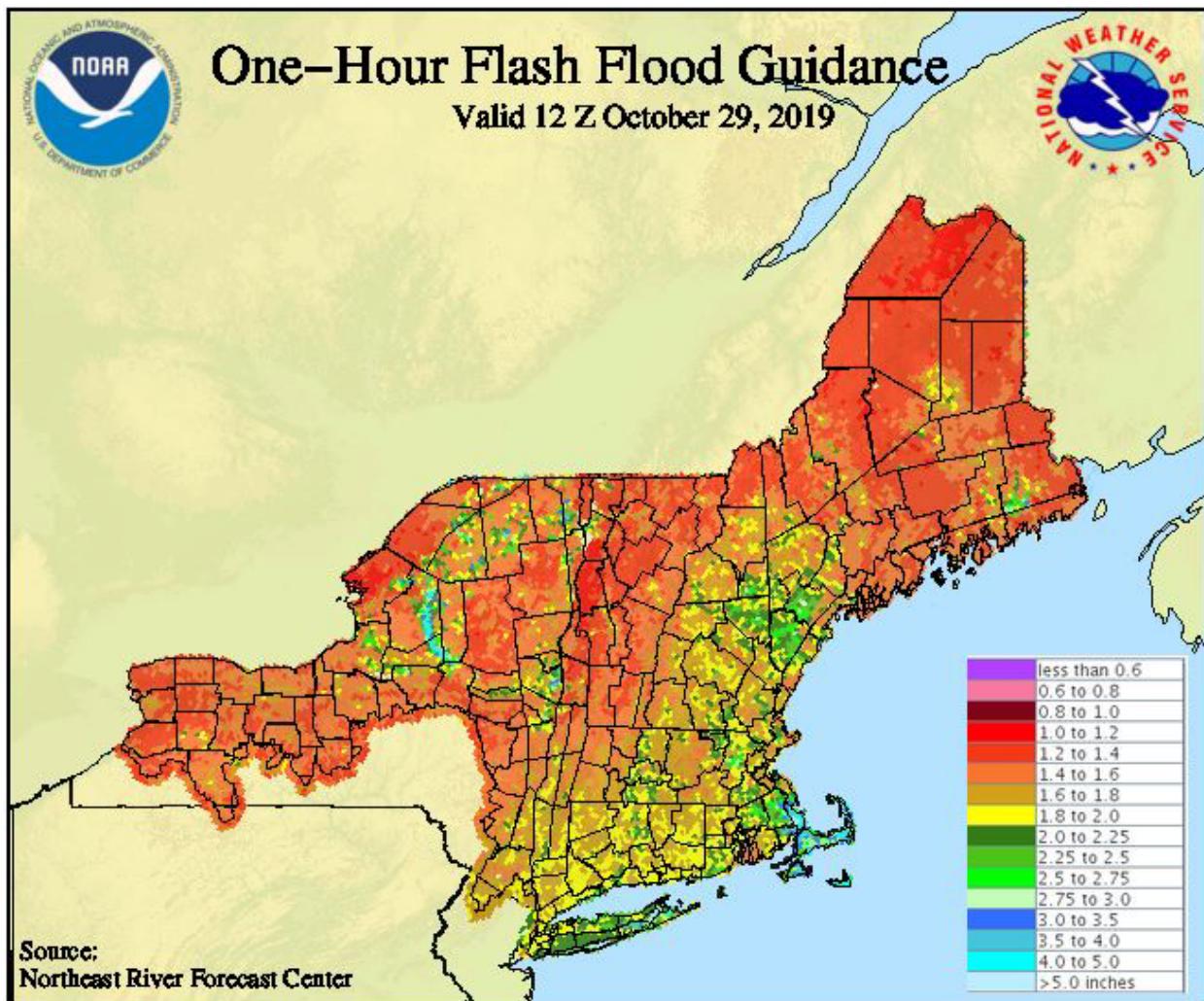


Figure G-11. Indication de crue éclair dans l'heure du NERFC (anglais seulement).

Graphical Hydrometeorological Discussion (HMD) Les prévisionnistes du NERFC génèrent une information journalière sous forme graphique pour diffusion sur diverses plateformes de médias sociaux. Ce produit donne un bref résumé des principaux points de prévision durant la journée. Outre que ce graphique est publié sur Twitter et sur Facebook, il se retrouve aussi sur le site Web du NERFC à l'adresse : <https://www.weather.gov/nerfc/briefings>. La figure G-12 montre un exemple de HMD journalier.



NERFC Daily Briefing

Sep 23, 2019 - 11:20 am

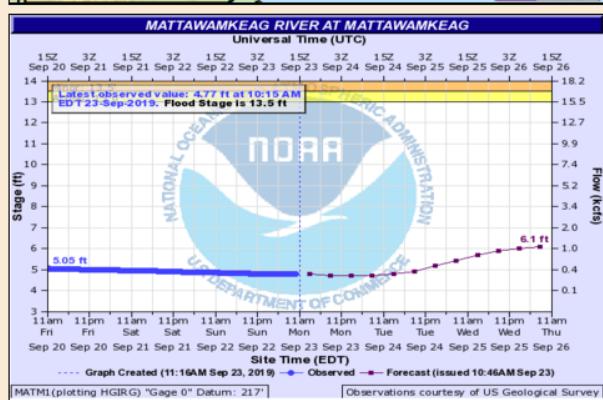
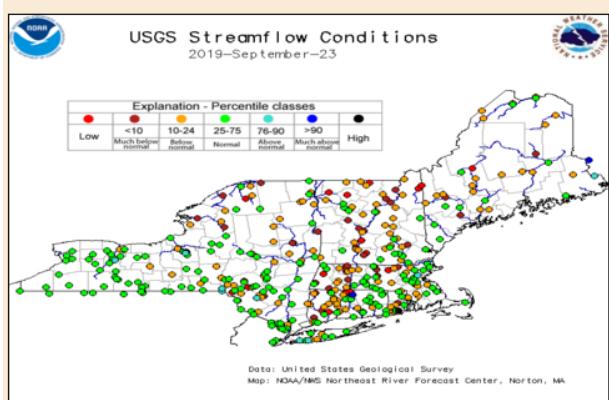
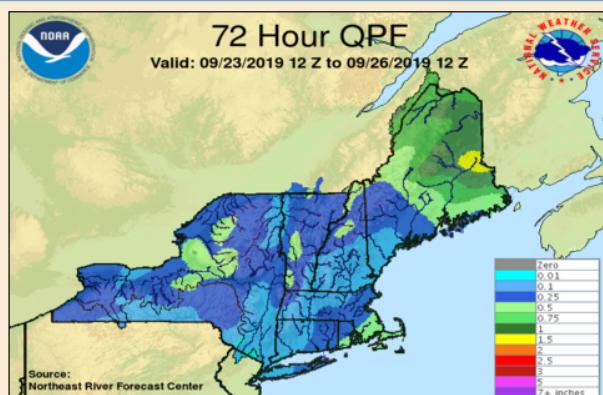


* Regional streams Normal to Much Below Normal

* Showers & T-Storms Expected Today - Tomorrow

* Up To 1.5" in Northern Maine, Under 0.5" Elsewhere

* Minor River Responses Expected, Mattawamkeag River to Rise 1 Foot



NOAA/National Weather Service
Northeast River Forecast Center

<http://weather.gov/nerfc> Twitter @NWSNERFC
[Facebook: http://www.facebook.com/NWSNERFC](http://www.facebook.com/NWSNERFC)

Figure G-12. Analyse hydrométéorologique graphique du NERFC (anglais seulement).

Cartes de précipitation et d'accumulation de neige — Pendant la saison de neige (du 1 octobre au 31 mai), les prévisionnistes du NERFC produisent des cartes journalières des chutes de neige et de l'épaisseur de la neige au sol. Ces cartes sont mises à jour quotidiennement et sont affichées sur le site Web du NERFC à l'adresse <https://www.weather.gov/nerfc/snow>. La figure G-13 présente des exemples de grilles quotidiennes de chutes et d'accumulation de neige.

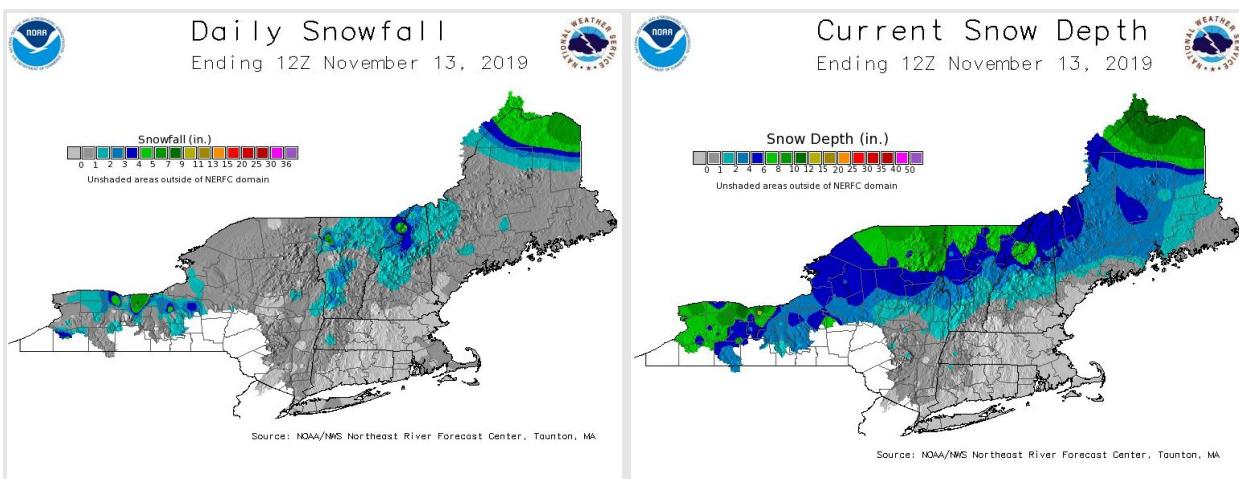


Figure G-13. Cartes journalières des chutes et des accumulations de neige du NERFC (anglais seulement).

Model Ensemble Graphics – Outre qu'ils émettent des prévisions déterministes quotidiennes, les prévisionnistes du NERFC génèrent des cartes d'ensemble supplémentaires pour chacun des points de prévision du Centre. Les trois cartes, qui renseignent sur les probabilités à long terme pour chacun des points de prévision sont accessibles sur le site Web de l'AHPS pour chaque point en question (comme Rouses Point, ci-dessus). Il suffit de sélectionner l'onglet *Probability Information* juste au-dessus de l'hydrogramme de prévision pour le point. Les trois graphiques se présentent ainsi :

- a) Des graphiques de probabilité de dépassement sont créés chaque semaine pour chaque point de prévision. Les simulations effectuées pour ces graphiques s'étendent sur 90 jours. Les graphiques montrent deux courbes de probabilité de dépassement classées : 1) une simulation historique classant les valeurs maximales de la période de 90 jours à venir pour chaque année de l'enregistrement historique à long terme (59 ans) ; 2) un ensemble de simulations conditionnelles utilisant les conditions météorologiques et hydrologiques actuelles, ainsi qu'un sous-ensemble d'années de l'enregistrement historique qui sont semblables aux conditions météorologiques prévues indiquées dans les prévisions météorologiques à long terme (c.-à-d. le climat). La figure G-14 illustre un exemple de graphique des probabilités de dépassement créé pour le point de prévision de Rouses Point, sur le lac Champlain.
- b) Des graphiques de probabilités de dépassement hebdomadaire des niveaux sont créés chaque semaine pour chaque point de prévision. Comme pour le graphique des probabilités de dépassement, ce graphique fournit des renseignements supplémentaires sur les prévisions pour les 90 prochains jours. Le graphique prend les données des simulations conditionnelles décrites ci-dessus et, plutôt que d'afficher la valeur maximale de chaque simulation de l'ensemble, il tient compte de la distribution de toutes les valeurs pour chaque période de sept jours de l'intervalle de 90 jours à venir. Les valeurs de chaque période de 7 jours consécutifs sont ensuite tracées sous forme d'histogrammes empilés, chaque valeur se situant dans une plage de probabilités prédéfinie. Ce graphique peut être utile pour estimer le moment où, dans les 90 prochains jours, une menace potentielle d'inondation pourrait se produire. La figure G-15 est un exemple de graphique des probabilités de dépassement hebdomadaire des niveaux dans le cas du point de prévision de Rouses Point (New York) sur le Lac Champlain.
- c) Des graphiques expérimentaux des probabilités à 10 jours du niveau de la rivière sont produits quotidiennement pour chaque point de prévision. Les graphiques font partie du Hydrologic Ensemble Forecast System (HEFS) du NWS qui créé un ensemble de simulations à partir d'une combinaison de modèles physiques et statistiques. Les conditions hydrologiques du moment, telles que définies par les prévisions déterministes des River Forecast Centers, sont utilisées avec les forçages atmosphériques du Global Ensemble Forecast System (GEFS) et du Climate Forecast System (CFS) et moyennant divers ajustements des paramètres hydrologiques pour créer les membres de l'ensemble. Les graphiques de probabilités expérimentaux visent à transmettre l'incertitude des prévisions pour la période de prévision immédiate de 10 jours sous la forme d'enveloppes limitatives caractérisant tous les tracés de simulation qui se situent dans les 25^e, 75^e, 10^e, 90^e, et 5^e et 95^e centiles des simulations d'ensemble. La figure G-16 montre un exemple de graphique des probabilités à 10 jours au niveau de la rivière pour le point de prévision de Rouses Point (État de New York), sur le lac Champlain.

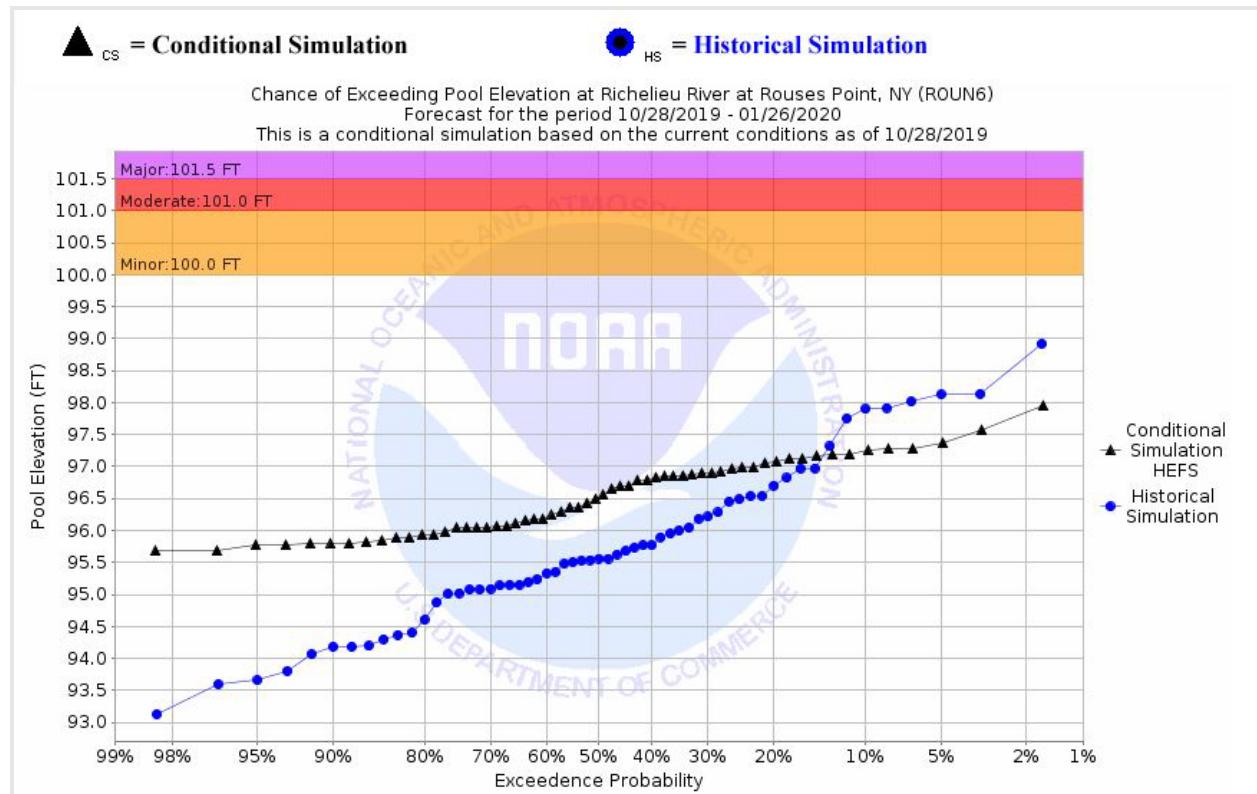


Figure G-14. Graphique des probabilités de dépassement hebdomadaire du NERFC (anglais seulement).

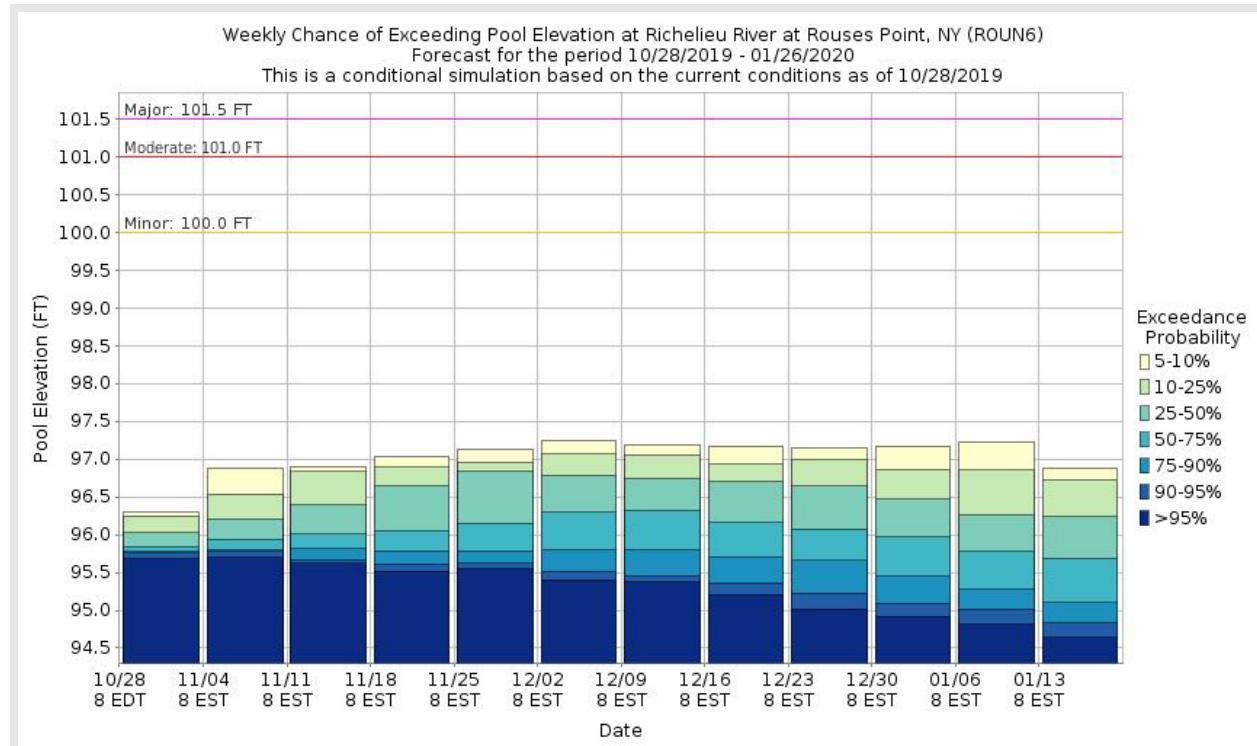


Figure G-15. Graphique du NERFC des probabilités hebdomadaires de dépassement des niveaux (anglais seulement).



10 Day River Level Probabilities

Used to Estimate the Range of Possible River Levels
[without ENSPOST (Experimental)]

Caution: Official forecast may be updated after this graph is generated.
For the latest official forecast, go to <http://water.weather.gov/ahps>



Richelieu River at Rouses Point, NY (ROUN6)

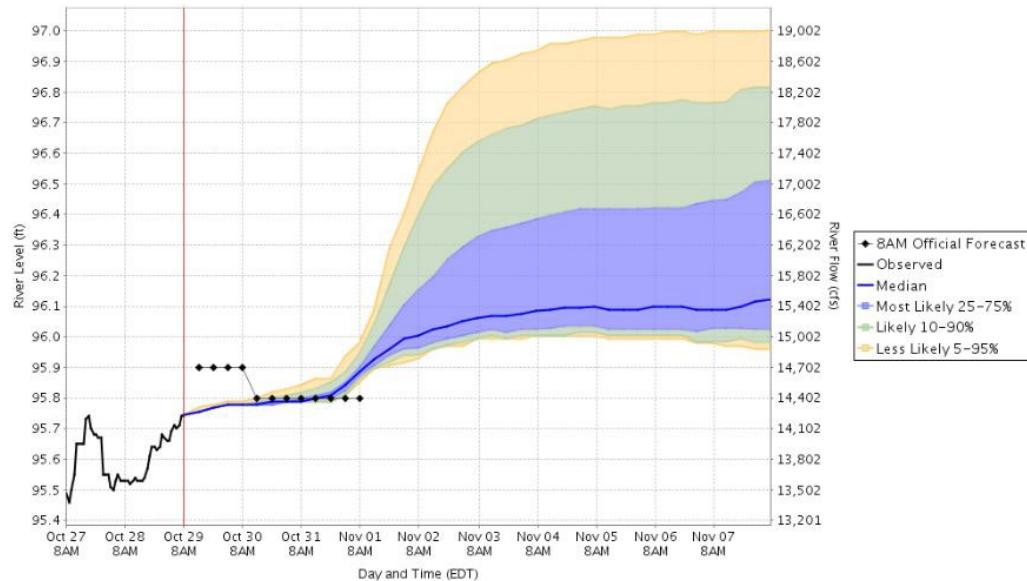


Figure G-16. Graphique quotidien des probabilités de niveau des cours d'eau à 10 jours (NERFC) (anglais seulement).

Weather Forecast Offices

Après avoir terminé toutes les prévisions hydrologiques du NERFC (dont celles pour le lac Champlain), habituellement entre 11 heures et midi chaque jour, le NERFC envoie la série chronologique résultante des débits et/ou des niveaux aux huit WFO (Weather Forecast Offices ou bureaux de prévision météorologique) de la région nord-est. Parmi ces bureaux se trouve celui de Burlington (Vermont) qui couvre le bassin du lac Champlain. Les WFO du NWS sont responsables de la publication des produits d'information, soit des avertissements et des veilles concernant la météorologie et l'hydrologie pour l'ensemble de leur secteur respectif. De plus amples renseignements sur les produits d'information sur les phénomènes hydrologiques du NWS sont disponibles en ligne à l'adresse <https://www.weather.gov/safety/flood-products>.

Les WFO analysent les prévisions hydrologiques quotidiennes du NERFC, puis les publient telles quelles ou y apportent de légères modifications avant la publication. La plupart du temps, ils apportent des modifications quand : a) les limnimètres du cours d'eau sont pris par la glace et que le débit naturel ne correspond pas aux observations, ou b) quand les prévisions indiquent que le niveau d'eau fluctuera autour d'un des seuils de crue (p. ex., crue mineure, modérée ou majeure). Dans ce cas, le WFO peut décider de maintenir la prévision juste au-dessus du seuil, afin de communiquer le danger (p. ex., pour éviter d'avoir à retirer une veille d'inondation pour devoir la rediffuser peu après).

À partir de ces prévisions hydrologiques, le WFO du NWS diffuse plusieurs produits pour communiquer les niveaux d'eau du lac Champlain aux parties prenantes qu'il dessert. Un message texte quotidien des prévisions concernant le lac et de la rivière (figure G-17) est publié pour communiquer les prévisions de niveau à tous les points de la zone dont le WFO est responsable. Quand les prévisions de niveau correspondent à des seuils d'intervention prédéterminés calculés par les hydrologues du NWS (soit le seuil d'intervention, de crue mineure, moyenne ou majeure)), le WFO peut émettre des veilles d'inondation, des avertissements (figure G-18) et des énoncés de suivi des inondations (figure G-19).

Daily River and Lake Summary
National Weather Service Burlington VT
1040 AM EDT Mon Aug 5 2019

Go to www.weather.gov/btv/rivers for the latest observed and forecast river levels. Some river levels are affected by power generation.
River forecasts represent natural flow and are not adjusted for ice.

.B BTV 0805 DC19080510 DH12/HG/DRH+24/HGIFF/DRH+36/HGIFF/DRH+48/HGIFF

	Station	Flood	7AM	24-Hr	7AM	7PM	7AM
:	ID	Name	Stage	Stage	Change	Forecast	Forecast
:						Tue	Tue
:							Wed
:	Lake Champlain						
ROUN6:	Rouses Point	100.0:	95.40	/:	-0.02:	95.40	/ 95.40 / 95.40 /
:	Great Chazy River						
CZRN6:	Perry Mills	9.0:	1.60	/:	0.06:	1.60	/ 1.50 / 1.50 /
:	Saranac River						
PBGN6:	Plattsburgh	9.0:	2.97	/:	-0.02:	3.00	/ 3.00 / 3.00 /
:	East Branch Ausable River						
ASFN6:	Ausable Forks	7.0:	1.03	/:	-0.03:	1.00	/ 1.00 / 1.00 /
:							

FLWBTV
BULLETIN - EAS ACTIVATION REQUESTED
Flood Warning
National Weather Service Burlington VT
1244 AM EDT Sun Apr 21 2019

...The National Weather Service in Burlington has issued a Flood Warning for Lake Champlain in New York and Vermont...

Lake Champlain At Rouses Point

PRECAUTIONARY/PREPAREDNESS ACTIONS...

Safety message...

Persons with interests in flood prone areas along Lake Champlain should take action to protect their property. The combination of wind and wave action will enhance flood effects on windward facing shores, and may cause additional damage to shoreline roads and low lying areas.

Stay tuned to developments by listening to noaa weather radio, or by visiting our web site at: weather.gov.

&&

NYC019-031-115-VTC001-007-011-013-021-220443-
/0.NEW.KBTW.FL.W.0017.190421T1800Z-000000T0000Z/
/ROUN6.1.ER.190421T1800Z.190424T0000Z.000000T0000Z.NO/
1244 AM EDT Sun Apr 21 2019

The National Weather Service in Burlington has issued a

- * Flood Warning for
The Lake Champlain At Rouses Point.
- * from this afternoon until further notice...Or until the warning is cancelled.
- * At 12:00 AM Sunday the stage was 99.8 feet.
- * Flood stage is 100.0 feet.
- * Minor flooding is forecast.
- * Forecast...Rise above flood stage by Sunday afternoon and continue to rise to near 100.4 feet by Tuesday evening. Additional rises are possible thereafter.
- * Impact...At 100.0 feet...Water begins to enter some lake front properties. Water also begins to threaten low lying roads, piers, and docks. Wave action can compound flooding on windward facing shorelines. Water will threaten the Burlington waterfront at Perkins Pier and the King Street ferry dock.

&&

LAT...LON 4501 7347 4501 7306 4361 7328 4360 7348

Figure G-17. Sommaire des prévisions quotidiennes pour la rivière et le lac émanant du WFO de Burlington (anglais seulement).

Figure G-18. Avertissement de débordement du lac Champlain émis par le WFO de Burlington (anglais seulement).

FLSBTV
Flood Statement
National Weather Service Burlington VT
1158 AM EDT Mon Apr 22 2019

...The Flood Warning continues for Lake Champlain...
Affecting the Lake Champlain shoreline counties in New York...
Clinton...Essex...Washington and in Vermont...Addison...
Chittenden...Franklin...GrandIsle...Rutland

PRECAUTIONARY/PREPAREDNESS ACTIONS...

Persons with interests in flood prone areas along Lake Champlain should take action to protect their property. The combination of wind and wave action will enhance flood effects on windward facing shores, and may cause additional damage to shoreline roads and low lying areas.

&&

NYC019-031-115-VTC001-007-011-013-021-231657-
/O.CON.KBTV.FL.W.0017.000000T0000Z-000000T0000Z/
/ROUN6.1.ER.190421T1115Z.190425T0000Z.000000T0000Z.NO/
1158 AM EDT Mon Apr 22 2019

The Flood Warning continues for
The Lake Champlain At Rouses Point.
* At 11:00 AM Monday the stage was 100.3 feet.
* Flood stage is 100.0 feet.
* Minor flooding is occurring and Minor flooding is forecast.
* Forecast...The lake level will continue rising to near 100.6 feet by Wednesday evening. Additional rises may be possible thereafter.
* Impact...At 101.0 feet...Flooding affects low lying roads and properties, and wind and wave action can compound flooding on exposed shorelines. Portions of the Burlington waterfront will flood, including the King Street ferry dock and Perkins Pier.

&&

LAT...LON 4501 7347 4501 7306 4361 7328 4360 7348

Figure G-19. Avertissement de crue (suivi de l'avertissement initial d'inondation) du WFO de Burlington (anglais seulement).

Les WFO envoient également les prévisions qu'ils publient à l'Office of Water Prediction (OWP) du NWS, lequel les affiche sur les pages Web du Advanced Hydrologic Prediction Service (AHPS). Ces pages présentent un hydrogramme des observations des trois derniers jours à chaque jauge et des trois premiers jours de la prévision (figure G-20). Les WFO présentent aussi couramment des données historiques sur les crêtes, une carte d'emplacement de la jauge et des renseignements descriptifs sur les crues survenues dans le secteur de la jauge en fonction des écarts altimétriques au-dessus du niveau d'inondation. À titre d'information, voir la page AHPS de Rouses Point qui se trouve à l'adresse :

<https://water.weather.gov/ahps2/hydrograph.php?WFO=btv&gage=roun6>.

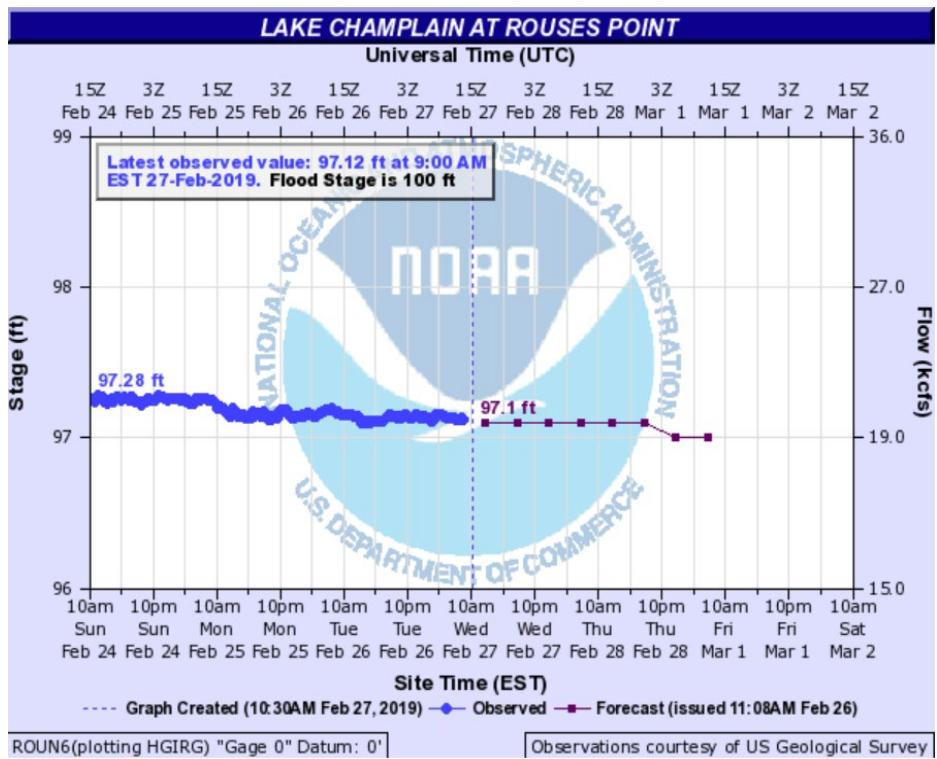


Figure G-20. Site AHPS pour Rouse's Point (anglais seulement).

L'information pour l'hydrogramme de Rouses Point est également disponible en format XML. Il convient de noter que les renseignements sur les prévisions se trouvent au bas du fichier XML, juste en dessous de la ligne </observed>. Il est possible d'y accéder en cliquant sur le bouton XML sous l'hydrogramme de la page indiquée ci-dessus ou d'y accéder directement (p. ex. : <https://water.weather.gov/ahps2/hydrograph.php?WFO=btv&gage=roun6&output=xml>). Toutefois, aucune cartographie des crues n'est actuellement disponible pour les prévisions du NWS pour le lac Champlain.

Outre qu'il émet régulièrement des prévisions du niveau du lac Champlain, le WFO de Burlington diffuse des veilles et des avertissements d'inondation pour l'ensemble du lac Champlain dans les États de New York et du Vermont, lorsqu'il est prévu que le niveau du lac va dépasser la cote de crue de 100 pieds au NGVD29. Ces informations sont mises à jour quotidiennement à midi jusqu'à ce que le niveau du lac tombe sous la cote de crue.

Par ailleurs, le WFO de Burlington majore ses services d'aide à la décision tout de suite avant et pendant un épisode de débordement du lac en informant les décideurs de la situation par voie de courriel, c'est-à-dire en leur transmettant les prévisions déterministes sur trois jours, ainsi que les tendances et les impacts futurs possibles fondés sur les indications de probabilité et de dépassement. S'il est prévu que le niveau du lac va approcher ou dépasser le niveau de crue majeure (101,5 pi NGVD 29) et/ou que des vents forts risquent de causer une importante seiche ou de fortes vagues dommageables, un soutien additionnel est offert aux décideurs.

