

## INFO-Crue : PRÉVISION SPATIALISÉE DES INONDATIONS AU QUÉBEC

**Auteurs :** LAVOIE Audrey<sup>1\*</sup>, LACHANCE-CLOUTIER Simon<sup>1</sup>, TURCOTTE, Richard<sup>1</sup>

*\* auteur correspondant*

<sup>1</sup>Ministère de l’environnement, de la lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs du Gouvernement du Québec, Canada, email :

[audrey.lavoie@environnement.gouv.qc.ca](mailto:audrey.lavoie@environnement.gouv.qc.ca)

### Résumé :

En 2017 et 2019, le Québec a vécu deux des plus grandes inondations de son histoire. Afin d’améliorer la gestion des crues, le gouvernement du Québec a mis en branle le projet INFO-Crue dont l’un des deux principaux objectifs est de fournir des prévisions cartographiques des étendues et profondeurs d’inondation dans une portion significative du Québec habité. Ceci implique de fournir des prévisions hydrologiques et hydrauliques dans plusieurs secteurs où peu ou pas de données hydrométriques sont disponibles. Pour ce faire, le gouvernement du Québec a développé une approche de prévision hydrologique en milieu non jaugé. Cette approche combine les prévisions *open-loop* (sans assimilation) issues d’une modélisation hydrologique distribuée couvrant la totalité du Québec méridional et des prévisions expertisées par une équipe de prévisionnistes à des sites jaugés. La combinaison est produite via la méthode d’interpolation optimale. La performance de l’approche non jaugée a été évaluée à partir de reprévisions effectuées sur une période de cinq ans à un total de 87 sites. Les résultats obtenus en validation croisée de type « leave-one-out » montrent que l’utilisation de cette approche est préférable à l’utilisation de la prévision *open-loop* dans la quasi-totalité des cas pour les jours de prévisions 1 et 2. Le résultat offre aussi l’avantage d’être spatialement cohérent avec la prévision expertisée. L’approche est maintenant implantée aux opérations et permet que soient réalisées quotidiennement des prévisions de débits pour environ 5000 tronçons de rivière. Elle alimentera un produit de cartographies prévisionnelles dont la diffusion publique débutera progressivement dès 2024.

**Mots-clefs :** Prévision des inondations, prévision en milieux non jaugés, hydrologie.

### 1. Le projet INFO-Crue et les objectifs de prévision cartographique

En 2017 et 2019, le Québec a vécu deux des plus grandes inondations de son histoire. Ces inondations ont affecté des milliers de personnes en endommageant des bâtiments et en perturbant de nombreuses activités critiques pour le Québec (transport, agriculture, commerce, etc.). Ces événements ont rappelé l’importance des risques liés aux inondations et mis en évidence l’importance d’en améliorer les outils permettant la gestion. Dans cette optique, le gouvernement du Québec a mis en branle le projet INFO-Crue dont l’un des deux principaux objectifs est de fournir des prévisions cartographiques des étendues et profondeurs d’inondation dans une portion significative du Québec habité. Le défi est grand puisque les Québécois habitent un territoire vaste où sont présents une multitude de rivières et de lacs. Il implique de fournir des prévisions hydrologiques et hydrauliques de plusieurs secteurs où peu ou pas de données sont disponibles. Il devient essentiel de développer des approches permettant de moduler les efforts en fonction des enjeux, notamment en limitant les besoins d’ajouter rapidement des stations hydrométriques, afin de couvrir un grand territoire dans des délais raisonnables.

Le projet INFO-Crue a une portée d'environ 15 000 kilomètres de cours d'eau. De ceux-là, les tronçons de rivières urbanisés (environ 5 000 km) font l'objet d'une approche d'analyse à « haute résolution », alors que les autres tronçons sont traités via une approche « large échelle ». Ces deux approches se distinguent principalement par la quantité de données d'observation requises et par le fait même, le type de modélisation numérique qui peut être appliqué.

De façon simplifiée, on peut décrire l'approche d'analyse à « haute résolution » comme impliquant 1) l'opération d'une station hydrométrique à proximité sur le bassin versant, 2) une modélisation hydrologique dont les paramètres sont calés avec les données de cette station, 3) la collecte de données détaillées sur la bathymétrie du cours d'eau, 4) des campagnes de mesure spécifiques pour la prise de mesure de débits, niveaux et étendues d'eau lors des crues et 5) une modélisation hydraulique calée à l'aide de ces données. Par opposition, l'approche d'analyse à « large échelle » s'appuie principalement sur des modélisations hydrologiques et hydrauliques implantées à une échelle plus globale et conçues pour permettre des approximations sans recours à des informations hydrométriques et bathymétriques locales (ex. Ricard *et al*, 2012, Choné *et al*, 2021).

La figure 1 présente la couverture territoriale du projet et la répartition des tronçons à « haute résolution » et à « large échelle ». À noter que le fleuve Saint-Laurent, compte tenu de son étendue et de la nature spécifique des processus menant à des inondations, n'est pas couvert par INFO-Crue et est considéré dans d'autres actions gouvernementales.

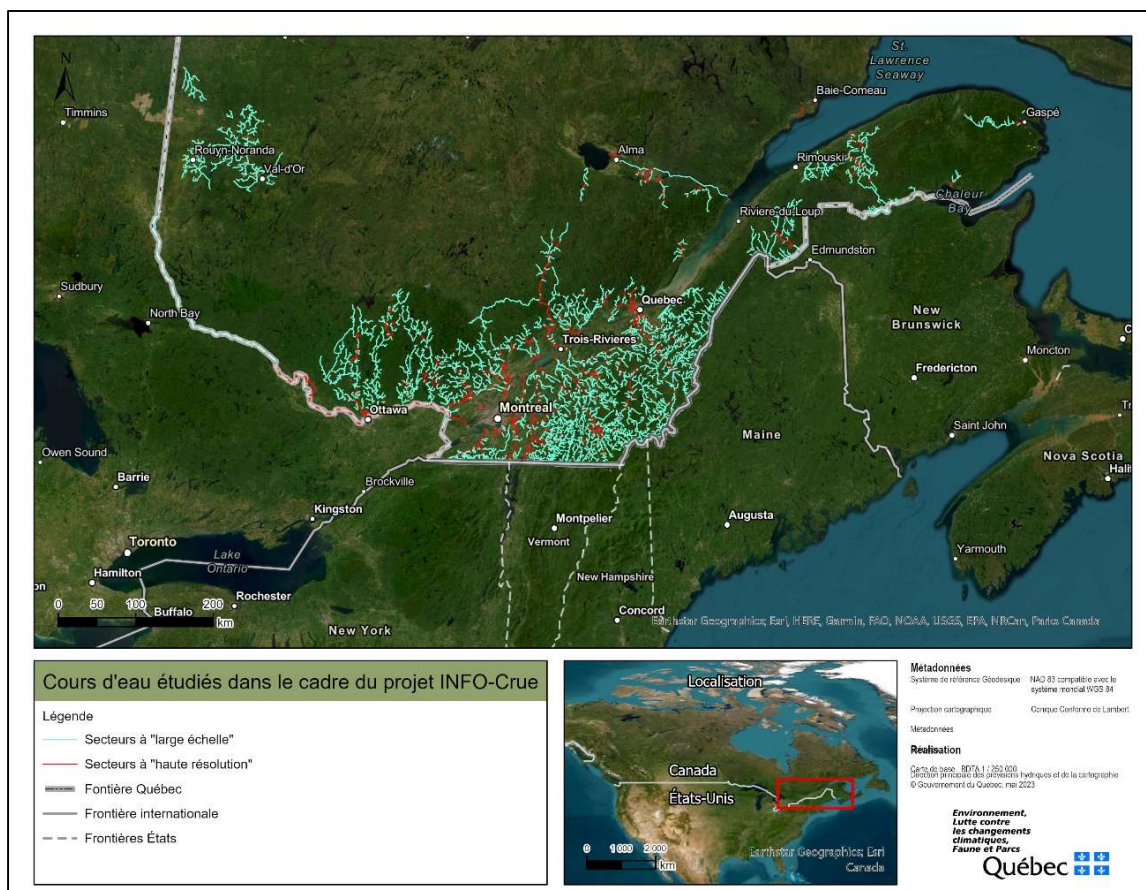
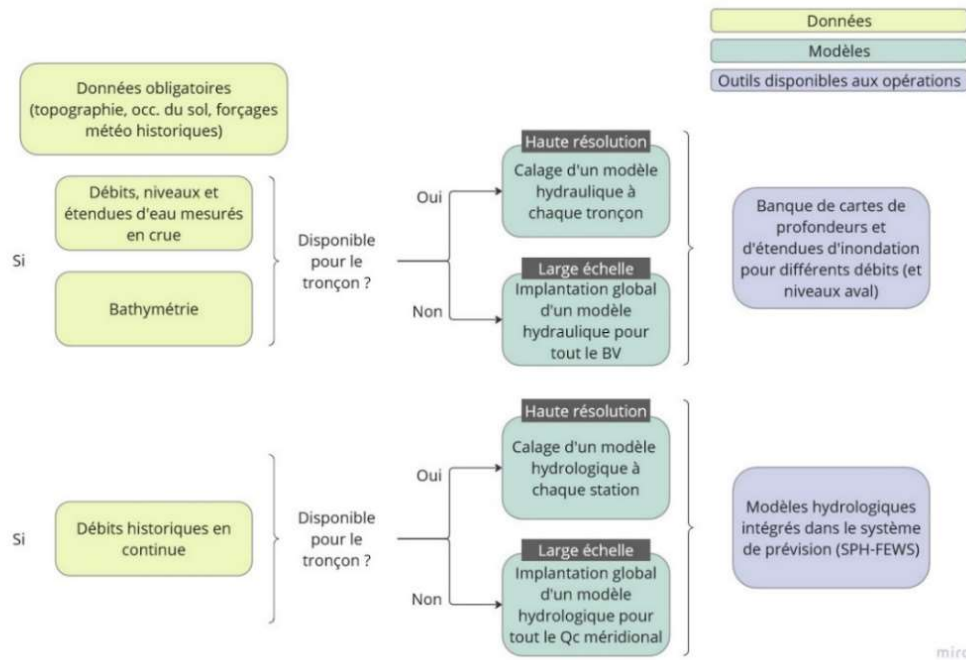


Figure 1 : Territoire qui sera potentiellement couvert par une cartographie prévisionnelle.

Les figures 2 et 3 schématisent le processus qui mène à la cartographie prévisionnelle en fonction des deux approches d’analyse. Le présent texte traite principalement de l’approche qui consiste à produire des prévisions hydrologiques dans les secteurs à « large échelle ».



## 2. Prévisions hydrologiques pour des tronçons non jaugés

La mise sur pied d'un système de prévision des débits pour des tronçons non jaugés a nécessité des changements importants au niveau de la prévision hydrologique du gouvernement du Québec qui se limitait, depuis ses origines (Turcotte *et al*, 2004), aux sites où des débits en temps réel sont disponibles par courbe de tarage ou par bilan hydrique. Au fil des ans, le nombre de sites, où une prévision de débit est émise opérationnellement a continuellement augmenté pour atteindre plus de 150 sites en 2023. La prévision à chacun de ces sites s'appuie sur une implantation locale d'un modèle hydrologique calé. En supplément, l'équipe de prévisionnistes joue un rôle important en effectuant interactivement l'assimilation des plus récentes observations et en ajustant/validant les débits issus des simulations hydrologiques. Ce mode de fonctionnement présente plusieurs avantages dont : une assimilation de grande qualité, la prise en compte de spécificités/contraintes locales ainsi qu'un plein contrôle sur la prévision qui est émise. Les prévisions aux sites jaugés sont identifiées dans le texte sous l'appellation « prévisions expertisées ».

Puisqu'il n'est pas réaliste d'augmenter le nombre de sites de prévisions expertisées jusqu'au niveau de couverture prévisionnelle visé par INFO-Crue, le développement d'une approche de prévisions de débits à large échelle applicable à un grand nombre de tronçons non jaugés a été nécessaire. L'un des principaux défis est de réaliser une prévision qui demeure spatialement cohérente avec les prévisions expertisées. De manière simplifiée, l'approche retenue fait la combinaison entre des prévisions *open-loop* (sans assimilation) issues d'un modèle hydrologique distribué calé globalement sur de grandes régions et les prévisions expertisées.

### 2.1 Modélisation hydrologique

Le modèle hydrologique utilisé pour produire la prévision *open-loop* s'appuie sur une implantation du modèle Hydrotel (Fortin *et al*, 2001) couvrant le Québec méridional. Le modèle hydrologique Hydrotel est un modèle distribué permettant de simuler les principaux processus hydrologiques à l'échelle du bassin versant. Les données physiographiques utilisées en intrant sont un modèle numérique d'altitude, une carte d'occupation du sol, une carte du type de sol et un réseau hydrographique des lacs et rivières. Le territoire couvert par cette implantation a une superficie totale de 771 403 km<sup>2</sup> (MELCCFP, 2023) découpés en plus de 72 000 unités hydrologiques. Pour faciliter la parallélisation des calculs, le territoire a été divisé virtuellement en 12 projets Hydrotel indépendants (Figure 4). Au total, le modèle produit des résultats distribués sur 28 035 tronçons liés à des lacs ou des rivières. Les paramètres du modèle hydrologique sont calés de façon globale, en considérant simultanément plusieurs stations hydrométriques (Ricard *et al*, 2012, Gaborit *et al*, 2015). Deux jeux de paramètres distincts sont retenus suite à ce calage : chacun s'appliquant selon que le bassin versant d'intérêt se trouve au sud ou au nord du fleuve St-Laurent.



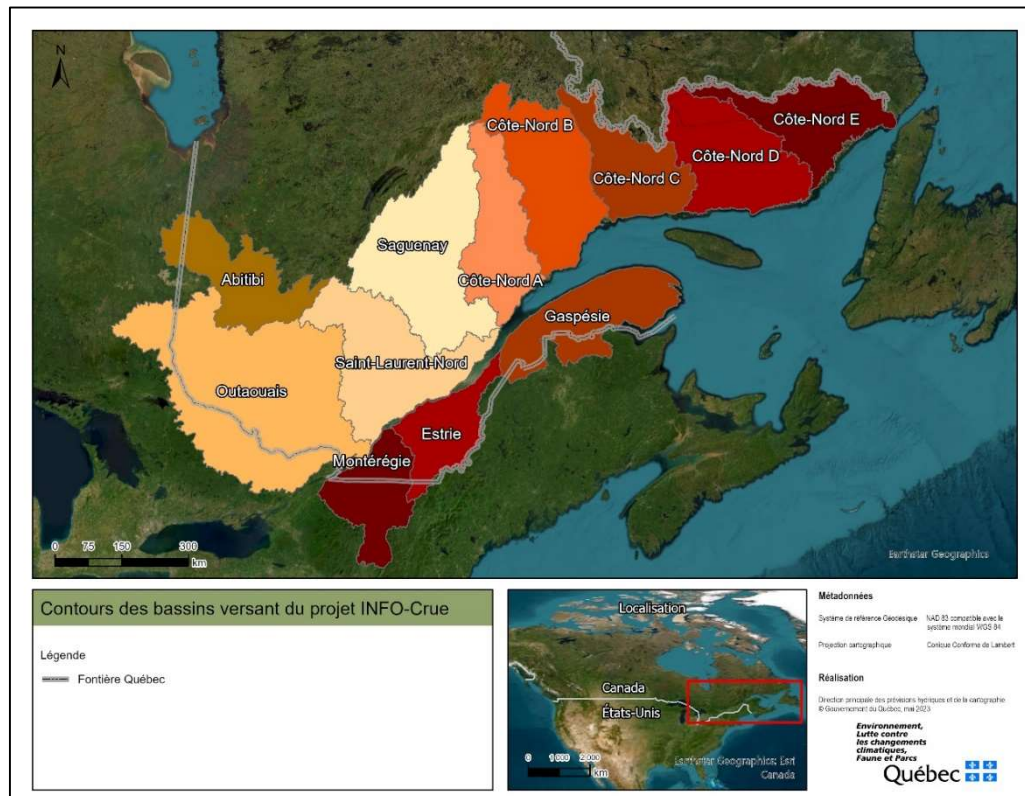


Figure 4 : Territoire couvert et découpage de la plateforme de modélisation hydrologique utilisée pour la prévision en milieu non jaugé.

## 2.2 Prévision hydrologique open-loop

La prévision hydrologique distribuée *open-loop* sert de champ d'essai à l'analyse en milieu non jaugé. Elle s'effectue à partir de données spatialisées de précipitations et de température. Pour la portion rétrospective (période « observée » antérieure à l'émission de la prévision) les données de températures spatialisées sont obtenues en interpolant les températures minimales et maximales mesurées à plus de 200 stations météorologiques. Les observations spatialisées de précipitation proviennent quant à elle de l'analyse régionale déterministe de précipitation (ARDP) produite par Environnement et changement climatique Canada (ECCC) à laquelle s'ajoute les données d'observations de quelques stations du réseau météorologique québécois. L'analyse ARDP intègre des données issues de capteurs de précipitations, de radar météorologique et du modèle régional déterministe d'ECCC afin de produire une estimation quantitative des précipitations en temps quasi-réel à une résolution d'environ 10 km. Les données d'observations de la période rétrospective sont ensuite concaténées aux données de prévisions météorologiques produites par Environnement et changement climatique Canada.

Ces prévisions sont issues du système régional de prévision déterministe (SRPD) pour les premiers trois jours de prévisions et du système global de prévision déterministe (SGPD) pour les jours suivants (figure 5). La simulation débute à partir des plus récents états disponibles pour le modèle distribué (période de recherche de -18 à -1 jours). Seule exception à une approche *open-loop* pure, des analyses de neige au sol sur grille (Grilles É.E.N), qui elles-mêmes assimilent automatiquement des observations nivométriques (Turcotte et al, 2007, Odry et al., 2022), sont insérées directement à tous les 15 jours comme états de neige initiaux.

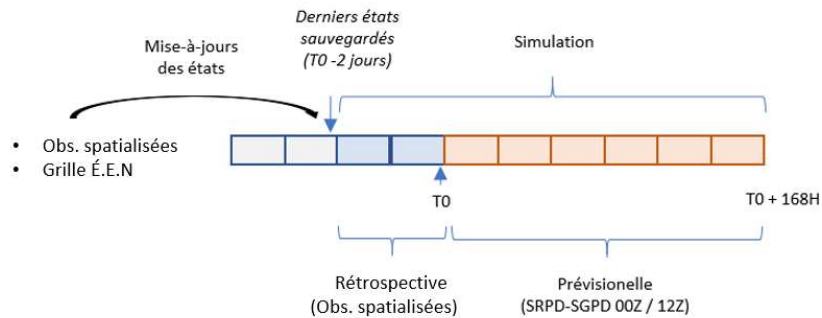


Figure 5 : Schématisation de la production d'une prévision hydrologique «open-loop»

## 2.3 Prévision aux sites non jaugés

La combinaison de la prévision *open-loop* avec les prévisions expertisées est produite via la méthode d'interpolation optimale qui est une méthode d'interpolation numérique permettant de combiner des données disponibles localement avec des données issues d'un champ d'essai distribué spatialement. Cette méthode est utilisée principalement dans le domaine de la météorologie (Fortin *et al*, 2015). L'approche utilisée en prévision s'inspire directement de l'approche de Lachance-Cloutier *et al* (2017) qui est utilisée en reconstruction des débits historiques au Québec ([www.cehq.gouv.qc.ca/atlas-hydroclimatique](http://www.cehq.gouv.qc.ca/atlas-hydroclimatique)). Elle vise à produire une prévision distribuée qui soit spatialement cohérente avec les prévisions expertisées disponibles localement aux sites de stations hydrométriques. En contexte opérationnel, l'analyse en milieu non jaugée est produite deux fois par jour soit à 11H00 et 17H00 EST. La Figure 6 suivante présente le résultat de l'analyse du 8 avril 2022 pour un tronçon non-jaugée du modèle distribué qui est situé à mi-chemin entre deux sites de prévisions jaugés et expertises.

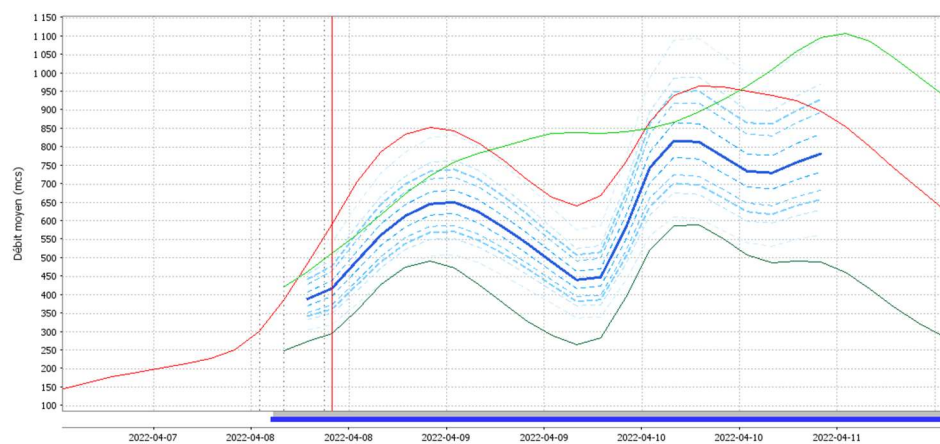


Figure 6 :Prévision champ d'essai (rouge) et résultats de l'analyse (bleu) au tronçon SLSO00138 situé à St-François-de-Beauce à mi-chemin entre les points de prévisions expertisés 023429 – Sartigan (vert foncé) en amont et 023402 – St-Lambert (vert lime) en aval

Les performances de l’analyse en milieu non jaugé ont été évaluées à l’aide de reprévisions effectuées sur une période allant du 2018-10-01 au 2022-03-01. Le scénario SRPD-SGPD 00Z et un début de simulation à T0 moins 6H ont été utilisés afin de produire ces reprévisions. L’insertion directe d’information sur la neige au sol n’a pas été effectuée. Un total de 87 sites de prévision a été retenu pour l’évaluation de la performance. Ces sites correspondent aux endroits pour lesquels des prévisions expertisées ont été émises et archivées au cours de la période d’intérêt. Les résultats de l’approche proposée sont présentés en validation croisée *leave-one-out* (Analyse-L1O) et comparés à la prévision expertisée et à la prévision *open-loop*. Ce type de validation a été employée pour émuler le contexte de prévisions à des sites non jaugés. Les Figures 5 à 7 présentent la distribution du KGE obtenue respectivement pour les horizons de prévision des jours 1, 2 et 5. Le KGE est une métrique de performance couramment utilisée en hydrologie afin de comparer un débit simulé à un débit observé. Ce métrique pondère de façon égale, le coefficient de corrélation, le ratio du biais et le ratio de variabilité.

Le KGE est calculé ainsi :

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\beta - 1)^2 + (\gamma - 1)^2} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{\mu_s}{\mu_o}$$

$$\gamma = \frac{\sigma_s/\mu_s}{\sigma_o/\mu_o}$$

où  $r$  est le coefficient de corrélation,  $\beta$  le ratio du biais,  $\gamma$  le ratio de la variabilité,  $\mu_s$  la moyenne des débits simulés ( $\overline{Q_s}$ ),  $\mu_o$  la moyenne des débits observés ( $\overline{Q_o}$ ),  $\sigma_s$  l’écart-type des débits simulés et  $\sigma_o$  l’écart-type des débits observés.

Le KGE est bornée entre -infini et 1. Une valeur de 1 signifie une adéquation parfaite entre l’observation et la simulation.

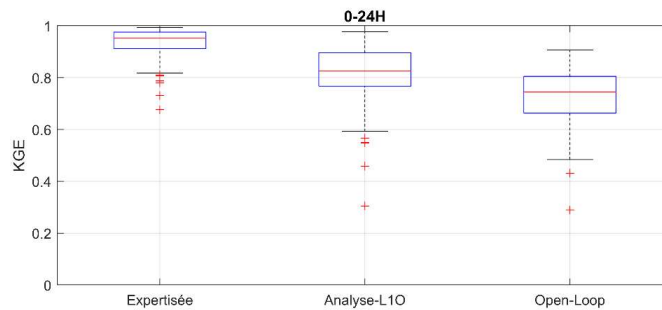


Figure 7 : Distribution du KGE obtenu aux 87 sites de prévisions pour le premier jour de prévision (0-24H).

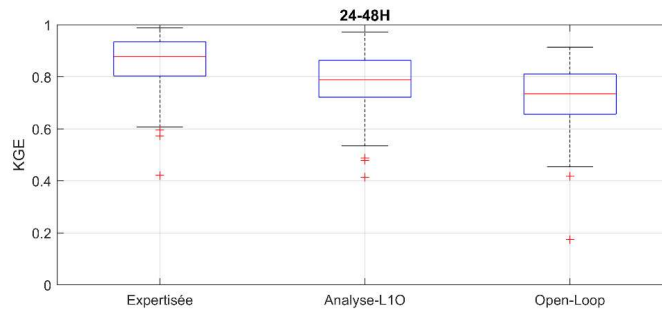


Figure 8 : Distribution du KGE obtenu aux 87 sites de prévisions pour le deuxième jour de prévision (24-48H).

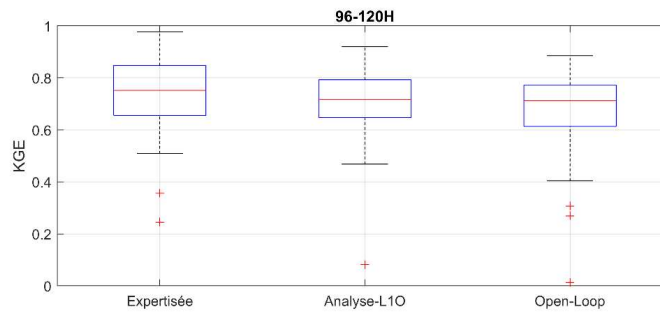


Figure 9 : Distribution du KGE obtenu aux 87 sites de prévisions pour le deuxième jour de prévision (96-120H).

Pour les trois horizons, on constate également que les KGE obtenus pour l’analyse en validation croisée se situent entre la prévision expertisée et la prévision *open-loop*. Ceci confirme l’intérêt de l’approche proposée par rapport à la prévision *open-loop* et justifie de lui ajouter une étape d’interpolation optimale prenant en compte les prévisions expertisées. Autrement, l’écart entre les différents types de prévision s’estompe au fur et à mesure que l’horizon prévisionnel augmente. Au jour 5, la performance de la prévision expertisée est très semblable à la performance de la prévision *open-loop* ce qui suggère que l’assimilation manuelle réalisée par les prévisionnistes est surtout bénéfique pour les premiers jours de l’horizon prévisionnel qui correspondent à l’horizon temporel visé par INFO-Crue.

Enfin, l’approche a été comparée, dans une étude distincte (Fontaine et al., 2023), avec une méthode de prévision basée sur une chaîne de modélisation atmosphérique, de surface et hydrologique. Ce type de prévision de plus en plus répandue (ex. GloFAS ou US-HEFS) est généralement présenté comme une stratégie émergente pour la prévision en milieu non jaugé. La comparaison avec la première génération du système de prévision hydrologique global canadien (NSRPS; Gaborit et al., 2017, Durnford et al., 2021) a clairement montré qu’à ce jour, l’approche proposée est significativement supérieure pour les horizons visés.

### 3. La cartographie prévisionnelle

Vu la nature des prévisions aux sites non jaugés, il a été choisi de ne pas diffuser les débits directement. Ceux-ci sont considérés comme des résultats intermédiaires qui soutiennent la production de cartographies prévisionnelles qui seront quant à elles disponibles publiquement. Les cartes prévisionnelles des inondations permettront aux clientèles de visualiser les étendues et les profondeurs d’eau maximales qui sont prévues être inondées dans les deux prochains jours. Le visuel cartographique, présenté à la figure 8, a été travaillé en étroite collaboration avec le ministère de la Sécurité publique qui est responsable de la diffusion de la prévision sur la plateforme gouvernementale sur les bases d’une étude de Frini *et al* (2022).





Figure 10 : Visuel du produit cartographique prévisionnel

## 4. Conclusion

La disponibilité d'outils tels que ceux développés dans le cadre du projet INFO-Crue sur une grande partie du Québec habité est l'une des fondations sur lesquelles s'appuiera la gestion des inondations dans le futur. Une approche permettant de réaliser des prévisions de débits en milieu non jaugeé a été développée et s'est avérée performante. Elle est maintenant utilisée opérationnellement pour plus de 5000 tronçons de rivière. La diffusion publique de cartographie prévisionnelle des inondations s'appuyant sur ces débits est prévue débuter en 2024.

Bien que le texte qui précède n'aborde pas le sujet, le système de prévision de débits produit actuellement de l'information sur les incertitudes de prévision. Ce modèle d'incertitude est pour le moment relativement simple et consiste à habiller la prévision à l'aide d'un modèle d'erreur centrée sur 0 et dont l'écart-type varie en fonction du débit prévu, de l'horizon de prévision, de la proximité d'un site de prévision expertisée et de la taille du bassin versant. Au cours des prochaines années, le Québec souhaite améliorer la description de l'incertitude dans son système de prévision des débits en quantifiant dynamiquement les principales sources d'incertitude dans la chaîne de modélisation hydrologique (états de départ, structure et paramètres du modèle hydrologique et prévisions météorologiques). L'incertitude étant inhérente à la prévision hydrologique, leur intégration jusqu'au produit cartographique finale est un sujet majeur tant pour l'amélioration de l'évaluation technique de celle-ci que sur sa représentation claire et intelligible pour les clientèles et les prises de décisions qui en découlent. Ce sujet est l'un des éléments sur lequel les équipes travaillent actuellement

## 5. REFERENCES

- Choné, G. Biron, P.M., Buffin-Bélanger, T., Mazgareanu, I., Neal, J.C., Sampson, C.C. (2021) An assessment of large-scale flood modelling based on LiDAR data. Hydrological processes. <https://doi.org/10.1002/hyp.14333>
- Durnford, D., Fortin, V., Smith, G., Carrera, M., Deacu, D., Dupont, F., Gaborit, E., Gauthier, N., Garnaud, C., Vionnet, V., Shin, Y. L., Lespinas, F., Bekcic, B., and Keita, S.(2021). “Hydrological prediction systems at environment and climate change Canada, <https://ams.confex.com/ams/101ANNUAL/meetingapp.cgi/Paper/383559j>. AMS 101st an589

nual meeting, January 9-15, 2021, virtual event. Poster presentation (586) and extended abstract.

Fontaine, N., Boucher, M.A., Anctil, F., Odry, J. Lachance-Cloutier, S., Fortin, V., Turcotte, R. (accepté pour publication 2023). Combining Global and Regional Hydrological Forecasts Using Simple Methods. Canadian water resources Journal.

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

Fortin, V., Roy, G., Donaldson, N., & Mahidjiba, A. (2015). Assimilation of radar quantitative precipitation estimations in the Canadian Precipitation Analysis (CaPA). *Journal of Hydrology*, 531(April 2011), 296–307. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.08.003>

Frini, A., Jean, V., Boucher, M.A., Mbaye, K., Desjardins, R. (2022). Compréhension des besoins et des mécanismes décisionnels des futurs utilisateurs de l’outil prévisionnel en temps réel des crues. Séries de documents disponibles sur: [https://www.ouranos.ca/fr/projets-publications?search\\_api\\_fulltext=frini](https://www.ouranos.ca/fr/projets-publications?search_api_fulltext=frini)

Gaborit, E., Fortin, V., Xu, X., Seglenieks, F., Tolson, B., Fry, L., Hunter, T., Anctil, F., and 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.” *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(9), 4825–4839.

Gaborit, E, Ricard, S. Lachance-Cloutier, S., Anctil, F. Turcotte, R. (2015). Comparing global and local calibration schemes from a differential split-sample test perspective. *Canadian Journal of Earth Sciences*. 10.1139/cjes-2015-0015.

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 Quebec (Canada). *Journal of Hydrology*, 550. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.05.011>

MELCCFP, Ministère de l’Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs, (2022). *Guide de l’Atlas hydroclimatique du Québec méridional*. <https://www.cehq.gouv.qc.ca/atlas-hydroclimatique/guide-atlas-hydroclimatique-2022.pdf>

Odry, J., Boucher M.A., Lachance-Cloutier, S., Turcotte, R., St-Louis, P.Y. (2022). Large-scale snow data assimilation using a spatialized particle filter: recovering the spatial structure of the particles. *The Cryosphere*. <https://doi.org/10.5194/tc-16-3489-2022>.

Ricard, S., Bourdillon, R., Roussel, D., Turcotte, R. (2012). Global calibration of distributed hydrological models for large scale applications. doi: 10.1061/(ASCE) Journal of Hydrological Engineering.1943-5584.0000665, 18(6), 719–721.

Turcotte, R., Lacombe, P., Dimnik, C., Villeneuve, J.P. (2004). Prévision hydrologique distribuée pour la gestion des barrages publics du Québec. *Revue canadienne de génie civil*. 31(2) : 308-320.

Turcotte, R., Fortin, L.G., Fortin, V., Fortin, J.P., Villeneuve, J.P (2007). Operational analysis of the spatial distribution and the temporal evolution of the snowpack water equivalent in southern Québec, Canada, *Nordic hydrology*. 38(3), 211-234.