

# Plate-forme de modélisation hydrologique PHYSITEL/HYDROTEL unique et uniformisée appliquée au bassin versant de la rivière Saint-Charles

Par Stéphane Savary, Marianne Blanchette, Alain Rousseau

## Contexte

Pour les besoins de l'étude nous nous sommes dotés d'une plate-forme commune de modélisation PHYSITEL-HYDROTEL basée sur les travaux de Spolidorio (2019). (Voir fiche synthèse correspondante).

À ces travaux s'ajoutent l'utilisation de l'occupation du territoire basée sur une cartographie récente fournie par la Ville de Québec datant de 2017.

Dans le cadre des travaux de modélisation hydrologique sur le bassin versant de la rivière Saint-Charles, nous avons utilisé les données spatiales requises qui comportent : un modèle numérique d'altitude, le réseau hydrographique détaillé en format vectoriel, une carte d'occupation du sol et une carte des types/textures du sol. Le Tableau 1 offre une description détaillée des données spatiales utilisées pour le montage de la plate-forme de modélisation hydrologique pour le bassin versant de la rivière Saint-Charles.

Tableau 1 Données spatiales utilisées pour la mise en place de la modélisation hydrologique sur le bassin de la rivière Saint-Charles.

Données	Description
Modèle numérique d'altitude (MNA)	5 m de résolution horizontale (issue du rééchantillonnage du modèle Lidar (Ville de Québec, 2017) d'une résolution initiale de 50 cm et d'une précision altimétrique de 25 cm)
Réseau hydrographique vectoriel	Réseau hydrographique naturel Échelle 1:20 000; (Géogratias, Ressources Naturelles Canada) Ajout des conduites principales du réseau pluvial de la Ville de Québec.
Occupation du sol	Mise à jour de la carte de référence à l'aide d'une cartographie 2017 fournie par la Ville de Québec. Carte de référence : Classification d'un assemblage de 650 orthophotographies prises en 2014 (Raimbault et coll., 2016), combinée à la cartographie détaillée des milieux humides de la Communauté métropolitaine de Québec (Beaulieu et coll., 2014) ainsi qu'aux réseaux hydrographique et routier vectoriels et à une cartographie forestière (forêts de conifères ou de feuillus ou mixtes) sur la base du quatrième inventaire écoforestier décennal (Ministère des Ressources naturelles et Faune, 2014)
Type de sol (Texture)	Montage d'une carte des types de sol à partir des études de cartographie écologique (Audet et coll., 1997, Gerardin et Lachance, 1997)

Dans la modélisation hydrologique, le bassin versant de la rivière Saint-Charles est représenté par un découpage en unités hydrologiques relativement homogènes (UHRH) de types versants qui alimentent le réseau hydrographique intégrant les conduites principales du réseau de conduite pluviale de la ville (SDU). Dans le modèle, ces conduites principales se comportent alors comme

des éléments du réseau hydrographique. Le Tableau 2 présente les caractéristiques générales du bassin versant de la rivière Saint-Charles pour la modélisation hydrologique.

Tableau 2 Caractéristiques du bassin versant de la rivière Saint-Charles pour la modélisation hydrologique.

UHRH		Réseau hydrographique	
Nombre	Superficie moyenne (km <sup>2</sup> )	Nombre de tronçons	Longueur moyenne (m)
4567	0.118	1923	453

En complément, la Figure 1 offre une représentation simplifiée du bassin versant de la rivière Saint-Charles incluant les sous-bassins d'importance, la localisation des stations hydrométrique (points ronds noirs à la Figure 1) et certains exutoires clés pour l'interprétation des résultats (étoiles noires à la Figure 1). Il est important de mentionner que certaines des stations hydrométriques appartenant originellement au Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP; Direction de l'expertise hydrique du Québec) identifiées sur la Figure 1 n'existent plus (Nelson 1, Jaune, Du Berger et Lorette)

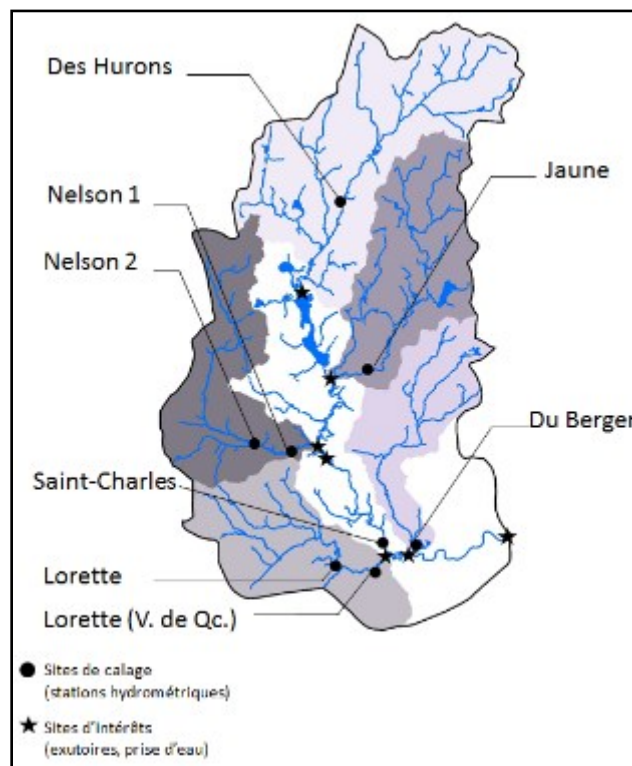


Figure 1 Bassin versant de la rivière Saint-Charles incluant les sous-bassins d'importance, les stations hydrométriques et certains exutoires clés.

## Représentation des milieux humides dans la modélisation hydrologique

La plate-forme de modélisation PHYSITEL-HYDROTEL permet de définir les classes d'occupation du sol représentant les différents types de milieux humides et de déterminer leurs superficies et leurs aires de drainages (superficies drainées par les milieux humides sur la base des orientations d'écoulement). Ces étapes sont des prérequis à l'intégration des milieux humides à la modélisation hydrologique. En complément, certains ajustements peuvent être apportés aux fichiers textes décrivant les milieux humides dans la modélisation hydrologique tel l'ajustement des paramètres descriptifs ou l'ajustement des aires drainées afin de prévenir l'inclusion aux aires drainées de classes d'occupation du sol inappropriées telles les milieux urbains et les routes voir même les autres classes présentes dans l'aire de drainage mais s'écoulant vers de telles classes d'occupation.

Le Tableau 3 résume les superficies des milieux humides et leurs aires drainées à l'échelle du bassin versant de la rivière Saint-Charles mais aussi à l'échelle de ses sous-bassins versants.

Tableau 3 Distribution des superficies et proportions de milieux humides à l'échelle de sous-bassins versants de la Saint-Charles.

	Total	Des Hurons	Jaune	Nelson	Lorette	Du Berger	Saint-Charles
MH km <sup>2</sup> (%)	32.9 (6.1)	5.0 (3.7)	3.3 (4.0)	6.6 (9.8)	4.6 (6.6)	4.3 (6.7)	9.0 (7.6)
Aire de drainage km <sup>2</sup> (%)	129.1 (23.9)	31.2 (22.7)	28.3 (34.2)	31.2 (46.1)	10.3 (14.8)	10.8 (16.7)	17.4 (14.7)

## Données climatiques

Les simulations hydrologiques ont été supportées par différents données climatiques actuelles et futures/simulées dont : (i) des données de précipitation et de température relevées à certaines stations d'Environnement Canada (ii) des précipitations enregistrées dans le réseau de pluviomètres de la Ville de Québec à un pas de temps de 24hr, (iii) des précipitations sur grille à des pas de temps de 6hr et 24hr (système Canadien d'Analyse de Précipitation (CaPA)) (iv) des scénarios de changements climatiques transmis pas Ouranos.

Aussi afin de faciliter la prise en compte des scénarios de changements climatiques dans la plate-forme de modélisation PHYSITEL/HYDROTEL, un outil connexe a été utilisé. Cet outil se veut une simple interface qui permet d'abord de pointer sur le projet HYDROTEL à prendre en compte dans la modélisation hydrologique et ensuite de pointer sur l'emplacement des séquences météorologiques relatives aux scénarios de changements climatiques afin d'effectuer l'ensembles des simulations hydrologiques en rafales dans une perspectives plus automatisées et accélérées.

## Calibration de la plate-forme de modélisation HYDROTEL

Lors de la modélisation hydrologique en climat actuel, les débits simulés peuvent être comparés aux débits mesurés aux stations hydrométriques. Suite à la mise en forme des données hydrométriques, il est nécessaire de procéder au calage du modèle hydrologique HYDROTEL afin de bien représenter les débits mesurés sur le territoire. Ainsi le calage permet essentiellement de modifier les valeurs des paramètres du modèle afin d'optimiser la performance du modèle à simuler

les débits mesurés en divers points du réseau hydrographique. Le calage vise à minimiser l'erreur dans la représentation des débits mesurés sur une période définie.

De façon générale, le calage du modèle HYDROTEL est guidé par les travaux de Fortin et coll. (2001b), Turcotte et coll. (2003) et Blanchette et coll. (2022). Plus spécifiquement, nous avons utilisé un algorithme automatique d'optimisation multi-objectifs asynchrone de recherche dimensionnelle dynamique de type Pareto (ParaPADDS; Asadzaded and Tolson, 2009, Tolson et coll., 2014) intégré à l'outil OSTRICH v17.12.19 (Matott, 2017). Le processus de calage a donc été effectué automatiquement en changeant les paramètres des modèles. Les travaux courants adoptent une stratégie unique de calage afin de minimiser l'erreur sur les débits modélisés pour la période d'analyse. Dans le cas présent, l'objectif de la modélisation est avant tout de minimiser l'erreur dans la représentation des débits mesurés et non d'évaluer la performance générale d'un modèle hydrologique dans un contexte de validation. Ainsi, une stratégie limitée au calage sur une période spécifique aura pour effet de diminuer l'incertitude sur les débits simulés. Lors du calage, nous avons utilisé une année de chauffe afin d'obtenir des états initiaux adéquats et nous avons exclu les débits mesurés sous couvert de glace (de Novembre à Mars). Pour le modèle HYDROTEL, les paramètres ont été changés afin de satisfaire les fonctions objectifs basées sur le critère *Kling-Gupta efficiency criterion* (KGE; Gupta et coll., 2009) et le critère de *Nash-Sutcliffe* (Nash and Sutcliffe, 1970) appliqué au logarithme des valeurs de débits (NSE-LOG; Oudin et coll., 2006). À ces critères de performances s'ajoutent le pourcentage de biais (PBIAS; Yapo et coll., 1996) et la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE; Singh et coll., 2005). Le Tableau 4 résume les résultats de calage du modèle hydrologique HYDROTEL aux stations hydrométriques.

Tableau 4 Performance lors de la calibration du modèle HYDROTEL.

Station hydrométrique	Période	KGE	NSE-LOG	PBIAS	RMSE
Des Hurons (050916)	2009-2021	0.81	0.77	3.0	2.48
Jaune (050906)	1983-1995	0.79	0.66	5.1	1.83
Nelson (050915)	2009-2021	0.86	0.74	7.3	1.05
Lorette (050914)	2006-2010	0.86	0.78	1.1	1.52
Du Berger (050907)	1983-1996	0.54	0.31	31.8	1.39
St. Charles (050904)	2009-2021	0.91	0.78	2.8	5.56
Saint-Charles (050904) (6hr)	2013-2018	0.90	0.79	7.2	4.90
Saint-Charles (050904) (24hr)	2013-2018	0.92	0.84	3.7	5.21

Dans l'ensemble les résultats de la calibration du modèle HYDROTEL sont jugés très bons sauf pour la station Du Berger où la forte anthropisation de la portion sud du bassin versant rend plus complexe la bonne représentation des débits. Plus spécifiquement, des valeurs de KGE essentiellement supérieures à 0.8, des valeurs de NSE-LOG essentiellement supérieures à 0.7 avec des valeurs de PBIAS inférieures à 10% et des valeurs de RMSE avoisinant au maximum des valeurs de 5 m<sup>3</sup>/s témoignent d'une très bonne représentation des débits mesurés aux stations hydrométrique sauf pour les débits mesurés à la station Du Berger. Aussi la performance du modèle est quelque peu diminuée dans la représentation des débits observés à la station Jaune, ce qui peut être lié à la période temporelle qui s'éloigne de la période liée à la carte d'occupation du sol. De plus, on note une performance élevée du modèle dans la représentation des débits à la station Saint-

Charles à l'aide des données de précipitations Capa intra-journalières (6hr) ou journalières correspondantes (24hr) ce qui renforce la robustesse de la plate-forme de modélisation dans son usage potentiel pour des applications s'appuyant sur des résultats à un pas de temps intra-journalier de 6hr.

## Références

Audet G., Bérubé D., Ducruc J.-P. & Gerardin V. (1997) Les cartes écologiques du bassin versant de la rivière Saint-Charles, Québec - Notice explicative. (Direction de la conservation et du patrimoine écologique - Ministère de l'Environnement et de la Faune), 110 p.

Asadzadeh, M., and B. A. Tolson. 2009. A new multi-objective algorithm, pareto archived DDS. Édité par G. et al. Raidl. 11th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO 2009). New York, NY: Association for Computing Machinery. pp.1963-1966.

Beaulieu J., Dulude P., Falardeau I., Murray S. & Villeneuve C. (2014) Cartographie détaillée des milieux humides du territoire de la Communauté métropolitaine de Québec (mise à jour 2013). (Canards Illimités Canada et le Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs, Direction du patrimoine écologique et des parcs, Québec).

Blanchette, M., A. N. Rousseau, S. Savary, and E. Foulon. 2022. Are spatial distribution and aggregation of wetlands reliable indicators of stream flow mitigation? *Journal of Hydrology* 608 p.

Bouda, M., A. N. Rousseau, S. J. Gumiere, P. Gagnon, B. Konan, and R. Moussa. 2014. Implementation of an automatic calibration procedure for HYDROTEL based on prior OAT sensitivity and complementary identifiability analysis. *Hydrological Processes* 28:3947-3961.

Bouda, M., A. N. Rousseau, B. Konan, P. Gagnon, and S. J. Gumiere. 2012. Bayesian Uncertainty Analysis of the Distributed Hydrological Model HYDROTEL. *Journal of Hydrologic Engineering* 17:1021-1032.

Fortin, J.-P., R. Turcotte, S. Massicotte, R. Moussa, J. Fitzback, and J.-P. Villeneuve. 2001a. Distributed Watershed Model Compatible with Remote Sensing and GIS Data. I: Description of Model. *Journal of Hydrologic Engineering* 6:91-99.

Fortin, J.-P., Turcotte, R., Massicotte, S., Moussa, R., Fitzback, J., Villeneuve, J.-P., 2001b. Distributed watershed model compatible with remote sensing and GIS Data. II: Application to Chaudière watershed. *J. Hydrol. Eng.* 6 (2):100–108.

Gerardin, V. et Y. Lachance, 1997. Vers une gestion intégrée des bassins versants. Atlas du cadre écologique de référence du bassin versant de la rivière Saint-Charles, Québec, Canada. Min. de l'Environnement et de la Faune du Québec - Min. de l'Environnement du Canada; 58 p.

Gupta, H. V., H. Kling, K. K. Yilmaz, and G. F. Martinez. 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology* 377:80-91.

- Matott, S. L. 2017. OSTRICH – An Optimization Software Toolkit for Research Involving Computational Heuristics Documentation and User’s Guide Version 17.12.19. University at Buffalo Center for Computational Research.
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I — a discussion of principles. *J. Hydrol.* 10 (3): 282–290.
- Noël, P., A. N. Rousseau, C. Paniconi, and D. F. Nadeau. 2014. Algorithm for Delineating and Extracting Hillslopes and Hillslope Width Functions from Gridded Elevation Data. *Journal of Hydrologic Engineering* 19:366-374.
- Oudin, L., V. Andréassian, T. Mathevet, C. Perrin, and C. Michel. 2006. Dynamic averaging of rainfall-runoff model simulations from complementary model parameterizations. *Water Resources Research* 42.p...
- Raimbault A., Poulin M. & Cimon-Morin J. (2016) Carte d'occupation du sol du bassin versant de la rivière Saint-Charles pour l'année 2014. Université Laval, Québec, Canada.
- Rousseau, A. N., J. P. Fortin, R. Turcotte, A. Royer, S. Savary, F. Quévy, P. Noël, and C. Paniconi. 2011. PHYSITEL, a specialized GIS for supporting the implementation of distributed hydrological models. *Water News - Official Magazine of the Canadian Water Resources Association* 31:18-20.
- Scarpari Spolidorio Junior, Eduardo (2019). Évaluation de la valeur ajoutée des données physiographiques à haute résolution dans la modélisation hydrologique distribuée: cas d’application de la plateforme physitel-hydrotel sur le bassin de la rivière St-Charles, Québec, Canada. Mémoire. Québec, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, Maîtrise en sciences de l'eau, 152 p.
- Singh, J., H. V. Knapp, J. G. Arnold, and M. Demissie. 2005. Hydrologic modeling of the Iroquois river watershed using HSPF and SWAT. *Journal of the American Water Resources Association*:343–360.
- Tolson, B. A., V. Sharma, and D. A. Swayne. 2014. Parallel Implementations of the Dynamically Dimensioned Search (DDS) Algorithm. Pages 573-582 in *Environmental Software Systems*, Prague, Czech Republic.
- Turcotte, R., L. G. Fortin, V. Fortin, J. P. Fortin, and J. P. Villeneuve. 2007. Operational analysis of the spatial distribution and the temporal evolution of the snowpack water equivalent in southern Québec, Canada. *Hydrology Research* 38:211-234.
- Turcotte, R., A. N. Rousseau, J.-P. Fortin, and J.-P. Villeneuve. 2003. A Process-Oriented, Multiple-Objective Calibration Strategy Accounting for Model Structure. Page 345 in Q. Duan, H. V. Gupta, S. Sorooshian, A. N. Rousseau, and R. Turcotte, editors. *Calibration of Watershed Models*. American Geophysical Union, Washington, D. C.
- Turcotte, R., J. P. Fortin, A. N. Rousseau, S. Massicotte, and J. P. Villeneuve. 2001. Determination of the drainage structure of a watershed using a digital elevation model and a digital river and lake network. *Journal of Hydrology* 240:225-242.
- Yapo, P. O., H. V. Gupta, and S. Sorooshian. 1996. Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: sensitivity to calibration data. *Journal of Hydrology* 181:23-48.