

# Simulation du débit de la rivière Saint-Charles, première source d'eau potable de la ville de Québec

E. Gaborit, G. Pelletier, P.A. Vanrolleghem et F. Anctil

**Résumé :** Sur le bassin versant de la rivière Saint-Charles, il est nécessaire de mieux gérer l'eau, d'un point de vue quantitatif et qualitatif. Or la prise de décisions peut être aidée par la modélisation hydrologique. Ce travail porte sur la mise en place du modèle semi-distribué de qualité de l'eau SWAT (« soil and water assessment tool ») sur ce bassin versant urbain et relativement montagneux, et sur l'évaluation de sa capacité à simuler les débits. Cette première approche est comparée à deux autres, reposant pour l'une sur l'utilisation du modèle hydrologique global GR4J, et pour l'autre sur l'emploi d'un réseau de neurones. La quantité d'eau issue de la fonte de la neige, calculée ici par le module de fonte de SWAT, a été renseignée à ces deux autres modèles. Ce bassin présente par ailleurs de réelles difficultés pour ce type de modélisation, liées essentiellement au manque de données : quasi-absence d'information spatiale sur les précipitations et absence d'étude pédologique détaillée. Les résultats, globalement satisfaisants, montrent toutefois que la performance hydrologique résultant des trois approches est limitée par ces manques : celle utilisant SWAT davantage que les deux autres. Dans ce cas, les lacunes ne permettent pas d'utiliser le plein potentiel du modèle SWAT, dont la structure plus lourde devient un inconvénient dès que les données sont disponibles en quantité et en qualité insuffisantes pour en justifier l'exploitation, en opposition à GR4J et au réseau de neurones. Il semble donc incontournable, considérant l'importance stratégique du bassin versant de la rivière Saint-Charles pour l'approvisionnement en eau potable et le support aux activités récréatives et touristiques, que l'effort d'observation de ce territoire soit accru, afin d'y augmenter notamment les données climatologiques et pédologiques disponibles.

**Mots-clés :** modélisation hydrologique, simulation des débits, SWAT, GR4J, réseau de neurones artificiel.

**Abstract:** In the Saint-Charles River watershed, it is necessary to better manage water from both a qualitative and quantitative point of view. Hydrological modelling can help managers in their decision making regarding water. This work concerns the implementation of the semi-distributed water quality model soil and water assessment tool (SWAT) for the simulation of stream flows in this urbanized and relatively mountainous watershed. This first approach is compared with two others, one relying on the use of the GR4J global hydrological model, and the other relying on the use of an artificial neural network. The amount of water resulting from the melting of snow, here calculated by SWAT's snowmelt algorithm, has been provided to the models used in these other two approaches. The watershed offers an important challenge to hydrologists because of the scarcity of its database, namely the quasi absence of spatial information on precipitation and the absence of detailed pedological studies. Results show that the hydrological performance resulting from all three approaches is limited by the availability of data, but the performance of the approach using SWAT is more so than the other two. The lack of information hinders exploiting the full modelling capability of SWAT. Moreover, SWAT's complexity turns out to be disadvantageous when compared with the simpler model structures of GR4J and of the neural network. It thus appears essential, considering the Saint-Charles River watershed's strategic importance for water supply and touristic and recreational activities, that more effort should be spent in gaining climatological and pedological observations within the watershed.

**Key words:** hydrologic modelling, stream flow simulation, SWAT, GR4J, artificial neural network.

## 1. Introduction

La rivière Saint-Charles (fig. 1), qui traverse la ville de Québec de part en part, revêt un caractère important pour sa population. En premier lieu, ce bassin versant (BV) de 550 km<sup>2</sup>, qui prend sa source dans les montagnes au nord, four-

nit une part substantielle (56 % en 2007) de l'eau de consommation de la ville. L'actuel barrage Cyrille-Delage, reconstruit en 1948 à l'exutoire du lac-réservoir Saint-Charles, a d'ailleurs permis d'accroître la capacité de stockage en amont de la prise d'eau et ainsi de régulariser une partie du débit de la rivière. En revanche, le marnage du lac est im-

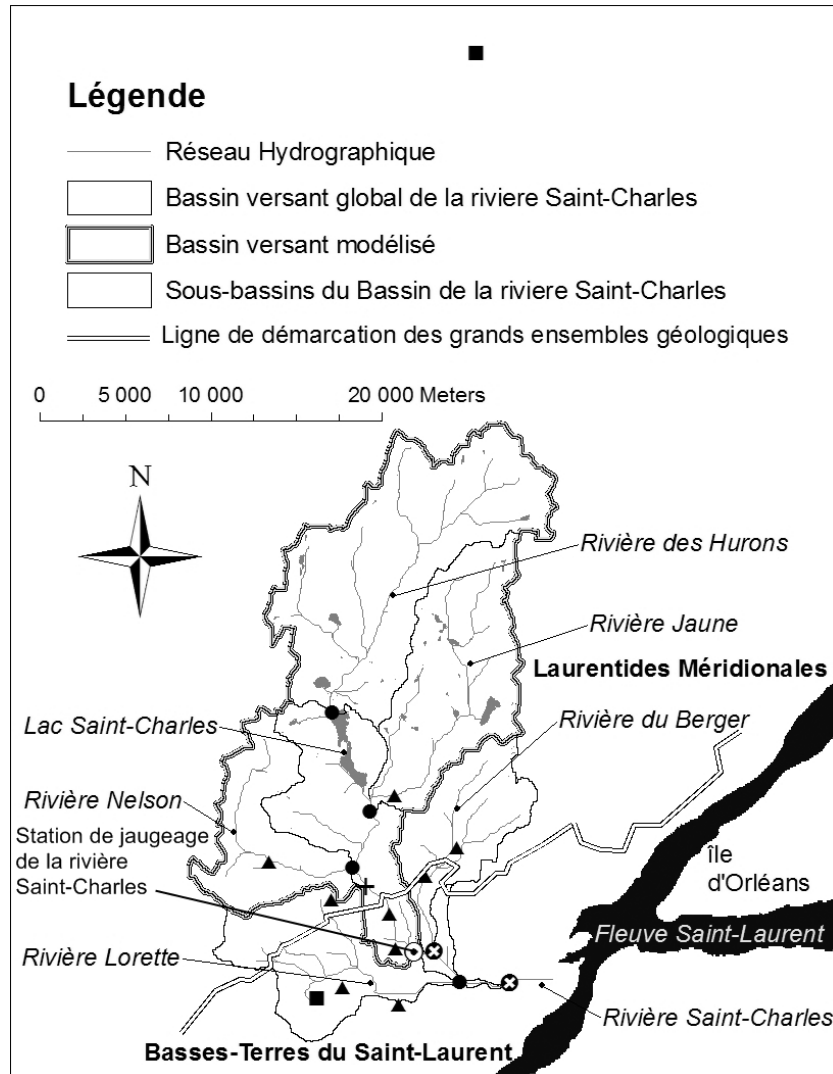
Reçu le 27 février 2009. Révision acceptée le 16 septembre 2009. Publié sur le site Web des Presses scientifiques du CNRC, au [rcgc.cnr.ca](http://rcgc.cnr.ca), le 20 février 2010.

E. Gaborit, G. Pelletier, P.A. Vanrolleghem et F. Anctil<sup>1</sup>. Département de génie civil, Pavillon Adrien-Pouliot, 1065, avenue de la Médecine, Université Laval, Québec, QC G1V 0A6, Canada.

Les commentaires sur le contenu de cet article doivent être envoyés au directeur scientifique de la revue avant le 30 juin 2010.

1. Auteur correspondant (courriel : [Francois.Anctil@gci.ulaval.ca](mailto:Francois.Anctil@gci.ulaval.ca)).

**Fig. 1.** Localisation du bassin versant de la rivière Saint-Charles : cercles pleins, exutoires de sous-bassins avec stations de jaugeage; cercles pleins avec croix blanche, exutoires sans station; cercle vide avec rond noir, station de jaugeage de la rivière Saint-Charles et exutoire du bassin versant modélisé (340 km<sup>2</sup>); carrés pleins, thermomètres et pluviomètres d'Environnement Canada; triangles pleins, pluviomètres de la ville de Québec.



portant, ce qui crée souvent un stress sur les marais du nord. L'usine d'alimentation en eau potable (AEP) en aval du barrage produit actuellement  $150\,000\text{ m}^3\cdot\text{j}^{-1}$ . Cette ponction a notamment pour effet de grandement réduire l'écoulement au sein du bief en aval de la prise d'eau, causant des stress à l'écosystème aquatique en période d'étiage. La courte sécheresse au cours de l'été 2005 a d'ailleurs démontré que cette source d'eau de consommation ne pouvait guère être exploitée davantage. Ainsi, une meilleure gestion du débit du lac Saint-Charles pourrait diminuer les stress aquatiques des marais du nord et de la rivière en aval.

Aujourd'hui, la partie aval du bassin versant de la rivière Saint-Charles (BVRSC) est fortement urbanisée. Le Conseil du bassin de la rivière Saint-Charles (2007) y dénombre en effet 350 000 habitants. Bien que les eaux usées domestiques soient collectées et acheminées vers une usine de traitement depuis 1992 (dont le rejet se situe à l'extérieur du BV), il s'agit dans les anciens quartiers d'un réseau de conduites unitaires d'égouts qui recueille également le ruis-

sellement. Ainsi, la capacité de transport vers l'usine de traitement est rapidement dépassée en temps de pluie, et des eaux usées domestiques diluées en conduites sont alors rejetées à la rivière Saint-Charles; dans les faits, la rivière est dans sa partie aval (6 km) une constituante du réseau d'égouts de la ville. Pour pallier ce problème qui restreint tout usage récréatif, la ville a récemment fait construire plusieurs bassins souterrains de rétention des eaux usées afin de limiter considérablement les débordements du réseau vers la rivière (Pleau et al. 2005). Dans les secteurs plus récents, les eaux de pluie sont collectées séparément et rejetées telles quelles à la rivière (après un court passage par des bassins de rétention), ce qui n'est pas non plus sans conséquence sur le débit et la qualité des eaux. Une meilleure gestion du débit sortant des bassins de rétention permettrait d'améliorer la qualité de l'eau rendue à la rivière. Or l'optimisation de la gestion de l'eau nécessite la mise en place de modèles, pour étudier différents scénarios (Carpenter et al. 2008).

Ce travail a pour objectif de mettre en place le modèle de

qualité de l'eau SWAT (« soil and water assessment tool ») sur le BVRSC et d'en évaluer la performance à simuler les débits observés. Une fois la performance hydrologique de SWAT jugée satisfaisante (par calages), il sera alors envisageable de procéder à la simulation de la qualité de l'eau. Des comparaisons avec des modèles alternatifs tels que AGNPS et HSPF ont été favorables à SWAT (Borah et Bera 2003; Saleh et Du 2004), qui a déjà été exploité avec succès dans un environnement apparenté (Lemonds et McCray 2007). De plus, SWAT est largement utilisé dans le monde — Gassman et al. (2007) rapportent quelque 250 publications sur ce modèle — et adapté au Québec (Lévesque et al. 2008a).

La performance obtenue avec le modèle semi-distribué SWAT sera comparée à celles obtenues en utilisant le modèle hydrologique global GR4J et un réseau de neurones (RN). Le modèle GR4J s'est favorablement classé lors d'une comparaison reposant sur 429 BV (Perrin et al. 2003), tandis que Nour et al. (2006) et Parent et al. (2008) ont montré que des RN performants pouvaient être montés en milieu nordique.

Nous verrons, dans un premier temps, les grandes caractéristiques climatiques et géomorphologiques de la zone à l'étude, et les moyens opérationnels dont nous disposons. Dans un deuxième temps, les principales manipulations effectuées avec SWAT pour augmenter le réalisme de la zone modélisée seront décrites, ainsi que celles relatives à la mise en œuvre des deux autres modèles, avant de présenter enfin les résultats et interprétations découlant de ce travail.

## 2. Données et méthodes

### 2.1. Description du territoire et données utilisées

Le BVRSC chevauche deux grands ensembles climatiques et géomorphologiques (fig. 1). Au nord, les montagnes Laurentides méridionales, qui décrivent un relief assez important (altitude entre 200 et 800 m, pentes d'environ 25 % et taux de ruissellement entre 1 % et 30 %), sont composées de granite et parfois de gneiss et sont couvertes par la forêt boréale soumise à un climat de type subpolaire humide avec une pluviométrie annuelle comprise entre 1200 et 1750 mm en fonction de l'altitude. Au sud, les Basses-Terres du Saint-Laurent possèdent une topographie beaucoup plus plane (altitude entre 50 et 200 m, pente inférieure à 10 %, mais taux de ruissellement compris entre 35 % et 90 % suite à l'urbanisation). Le climat y est tempéré subhumide avec une pluviométrie annuelle entre 1000 et 1150 mm. Le réseau hydrographique du BVRSC est très dense : 800 km de cours d'eau et 317 lacs, dont le plus volumineux est le lac-réservoir Saint-Charles ( $15 \times 10^6 \text{ m}^3$ ). Le débit moyen annuel est de  $8,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , soit 794 mm en lame d'eau moyenne annuelle évacuée au niveau de la station de jaugeage de la rivière Saint-Charles (fig. 1).

L'information sur les données disponibles pour la mise en œuvre du modèle SWAT est compilée au tableau 1. La carte d'occupation du sol, obtenue à partir d'images Landsat-7, révèle 11 classes d'occupation différentes pour le BVRSC, dont trois types de forêts, trois types de milieux urbains, des milieux humides et des lacs, des pâturages et quelques terres agricoles. En l'absence d'études pédologiques, la série de sol Sainte-Agathe (Canada Soil Survey Committee 1978)

a été retenue pour tout le territoire du bassin. Il s'agit d'un podzol d'1 m d'épaisseur, formé à partir de matériel déposé par les glaciers, typique aux forêts de ce secteur.

Toutes les données climatiques et hydrologiques compilées au tableau 2 sont au pas de temps journalier (elles y ont été converties lorsque le rythme d'échantillonnage était plus rapide). Les débits des rivières des Hurons, Nelson et Lorette n'ont pas été utilisés pour des calages automatiques, car ils ne sont disponibles que depuis peu de temps, ce qui laisse supposer que les paramètres qui auraient été fixés sur ces sous-bassins (par calage automatique avec au maximum 2 années de débits observés) auraient limité les performances du modèle à l'exutoire global, car ils auraient probablement été inappropriés aux périodes de calage et de validation sur l'exutoire global. Le bassin versant modélisé a pour exutoire la station de jaugeage de la rivière Saint-Charles (fig. 1), et exclut donc les rivières Lorette et du Berger. Sa surface est de  $340 \text{ km}^2$  (contre  $550 \text{ km}^2$  pour le bassin total). La station météorologique de l'aéroport Jean-Lesage est située à environ 7 km au sud-ouest du BVRSC modélisé, alors que celle de la forêt Montmorency se situe à environ 20 km au nord du BVRSC (fig. 1, carrés pleins). Les données pluviométriques des stations de la ville de Québec n'ont pas été utilisées, car elles sont disponibles depuis peu de temps et jamais en hiver. Ainsi, la variabilité spatiale et la précision des valeurs de précipitations sur le BVRSC sont très mal renseignées dans les modèles. De plus, les débits sortant du lac Saint-Charles sont contrôlés par l'homme au moyen du barrage Cyril-Delage. Leurs valeurs n'ont pas été archivées et sont difficilement estimables. Par conséquent, ce lac est modélisé dans SWAT comme un lac naturel (non contrôlé par un barrage à la sortie). Finalement, dans SWAT, le débit pompé dans une rivière dépend seulement du mois considéré (variables WURCH 1 à 12), et ne varie ni selon le jour d'un même mois simulé ni selon l'année simulée pour un même jour donné. Ainsi, des moyennes mensuelles interannuelles ont été calculées pour le débit extrait de la rivière Saint-Charles pour l'AEP. Rapportées en  $\text{m}^3 \cdot \text{j}^{-1}$ , ces valeurs s'étendent de  $13,5 \times 10^4$  à  $17 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{j}^{-1}$ .

### 2.2. Les modèles hydrologiques

SWAT est un modèle continu et semi-distribué, basé sur la physique et sur des équations empiriques (Gassman et al. 2007). Il a été développé pour étudier les effets de l'utilisation humaine du territoire, de l'eau et (ou) des changements climatiques, sur l'hydrologie quantitative et qualitative. Lemonds et McCray (2007) proposent un résumé des processus hydrologiques simulés par SWAT. Neitsch et al. (2004) décrivent les données du modèle (entrées requises, sorties disponibles), Di Luzio et al. (2002) présentent sa mise en œuvre au moyen de l'interface AVSWAT 2000, utilisée ici, et Neitsch et al. (2005) détaillent les équations du modèle SWAT. Dans ce modèle, le bilan hydrologique est calculé à l'échelle des unités de réponse hydrologique (URHs), caractérisées par une combinaison unique du type de sol et du type d'occupation du sol, à l'intérieur de chaque sous-bassin. L'eau ruisselant en surface est ensuite acheminée vers l'aval le long du cours d'eau principal du sous-bassin considéré.

Le modèle GR4J vise à modéliser le comportement global

**Tableau 1.** Données disponibles au modèle SWAT.

Type de données	Source	Échelle ou résolution	Description ou propriétés
Topographie	Ressources naturelles Canada	23 m	Modèle numérique de terrain
Hydrographie	Base de données topographique du Québec	1 : 20 000	Réseau des cours d'eau
Territoire	Canards illimités Canada	25 m	Occupation du territoire
Hydrologie	Centre d'expertise hydrique du Québec	–	Débit
Climat	Service météorologique du Canada Ville de Québec	–	Précipitation, température

**Tableau 2.** Données hydrologiques et climatiques disponibles.

Lieu	Type de variable	Période (mois/année)	Données (%)	Source
Aéroport Jean-Lesage	Pluviométrie	01/1985 à actuel	97,5	Environnement Canada
	Température		98,3	
Forêt Montmorency	Pluviométrie	08/1965 à actuel	97	Environnement Canada
	Température		96,5	
Pluviomètres de la ville	Pluviométrie	05/2006 à actuel	98,9	Ville de Québec
Rivière Saint-Charles	Débit	01/1969 à actuel	100	Centre d'expertise hydrique du Québec
Rivière Jaune	Débit	01/1985 à 12/1994	45	Centre d'expertise hydrique du Québec
Rivière Nelson	Débit	06/2006 à actuel	100	Centre d'expertise hydrique du Québec
Rivière des Hurons	Débit	12/2007 à actuel	100	Centre d'expertise hydrique du Québec
Rivière Lorette	Débit	05/2006 à actuel	100	Centre d'expertise hydrique du Québec
Usine d'AEP	Débit pompé	11/1999 à 05/2007	100	Ville de Québec

**Nota :** Les stations pluviométriques de la ville de Québec ne rapportent pas les précipitations solides. Le terme « actuel » signifie que les stations de mesure sont encore actives. Il désignait plus précisément le 12 décembre 2008 lorsqu'a été terminé le travail présenté ici. AEP, usine d'alimentation en eau potable.

d'un bassin — donc de type « top-down » contrairement à SWAT qui cherche à représenter l'ensemble des processus à une échelle beaucoup plus fine et est donc de type « bottom-up » (Young 2003) — au moyen de deux réservoirs symbolisant chacun le sol et l'aquifère. La version utilisée ici est celle présentée par Perrin (2002) et Perrin et al. (2003). Ce modèle ne nécessite que la connaissance de l'évapotranspiration potentielle (ETP), de la pluviométrie, de l'aire du bassin et du débit observé. De plus, les paramètres à caler étant au nombre de quatre, sa mise en œuvre est donc simple. Son principal défaut, pour une simulation sur un bassin soumis à ce type de climat, est qu'il ne prend pas en compte la rétention des précipitations sous forme de neige, car il n'est pas équipé d'un module de fonte. Le modèle GR4J sera donc exploité ici avec comme entrée pluviométrique la somme des précipitations liquides simulées et de la lame d'eau de fonte simulée par SWAT, ce qui est décrit plus en détail dans la partie 3.2.

Les réseaux de neurones (RN) sont des régresseurs multivariés non linéaires. Ce modèle est de type « boîte noire » et cherche à modifier les entrées fournies afin de produire la meilleure sortie possible, soit ici le débit de la rivière Saint-Charles au site de jaugeage. Leur structure est détaillée dans de nombreuses publications dont celles du *ASCE Task Committee on Application of Artificial Neural Networks in Hydrology* (ASCE 2000a, 2000b). Plus spécifiquement, l'étude recourt à un RN ayant une seule couche cachée, au sein de laquelle chaque neurone possède une fonction de transfert sigmoïdale, et une couche de sortie possédant un seul neurone avec une fonction de transfert linéaire, à la manière

de, par exemple, Shamseldin (1997). Le fait que ce type de modèle ne repose pas sur des équations représentant les processus physiques réels lui confère à la fois son avantage et son défaut principaux, soit respectivement qu'il ne nécessite aucune information sur les processus reliant les entrées aux sorties, mais qu'aucune information sur les processus réels reliant les précipitations au débit ne peut en être extraite.

### 3. Mise en œuvre et résultats

#### 3.1. Mise en œuvre du modèle SWAT

La configuration initiale de SWAT a été effectuée en suivant les directives émises par Di Luzio et al. (2002) et Neitsch et al. (2004, 2005). Nous avons aussi bénéficié des recommandations de Lemonds et McCray (2007), qui ont implanté SWAT sur de petits bassins montagneux montrant une grande variabilité climatique spatiale, et de Lévesque et al. (2008a), qui ont proposé une méthodologie globale pour la mise en place du modèle SWAT sur des BV québécois.

Le BVRSC a été divisé en 18 sous-bassins. Aussi, puisqu'un seul type de sol sur l'ensemble du BVRSC a été considéré, la complexité maximale proposée par la carte d'occupation du sol a été retenue lors de la distribution des URHs, sans dépasser 10 URHs par sous-bassin. Toutes les simulations ont été effectuées au pas de temps journalier, le ruissellement au sein d'une URH a été calculé par la méthode SCS (« Soil Conservation Service »), et l'ETP a été calculée par l'équation de Penman-Monteith. Enfin, les périodes de calage et de validation comprennent chacune une année de chauffe (1985 et 1995) et s'étendent respective-

ment de 1986 à 1995 et de 1996 à 2005, périodes présentant des caractéristiques de pluviométrie sensiblement identiques mais des débits plus importants pour la seconde.

Autant que possible, il a été choisi de fixer dans SWAT la valeur de certains paramètres à l'aide de leur signification physique ou d'information présente dans la littérature, afin de respecter le plus possible le réalisme physique du bassin.

Par exemple, les paramètres liés aux lacs et aux zones humides, tels que les surfaces, volumes et pourcentage du sous-bassin alimentant le lac par ruissellement, ont été pour la plupart fixés à partir des informations présentes dans le portrait du bassin versant de la rivière Saint-Charles, effectué par le Conseil du bassin de la rivière Saint-Charles (2007). IFLOD1 et IFLOD2, respectivement les mois de début et de fin de la période d'étiage, ont été fixés à juillet et septembre. La profondeur des zones humides n'étant pas répertoriée, elle a arbitrairement été choisie égale à 1 m. Le marnage entre périodes normale et de crue a été fixé à 1 m (avec les données de hauteur d'eau du lac Saint-Charles) et à 0,5 m (arbitrairement), pour les lacs et zones humides, respectivement.

Le nombre CN2 (tableau 5) a été défini pour chaque type d'occupation du sol (Neitsch et al. 2004) en tenant compte que la pente moyenne du BVRSC est de l'ordre de 10 %. La même source a permis de fixer le coefficient de Manning pour le ruissellement de surface (OV\_N) à des valeurs entre 0,01 et 0,3 en fonction de la surface considérée, ainsi que le coefficient de Manning pour les cours d'eau secondaires (CH\_N(1)) à 0,085. Tous les types de végétation sont supposés avoir des racines descendant au-delà d'1 m de profondeur (SOL\_ZMX et RDMX > 1000), sauf les pâturages pour lesquels ce paramètre a été fixé à 200 mm. La seconde moitié du tableau 3 regroupe les valeurs attribuées à d'autres paramètres relatifs à la végétation.

Le programme « Baseflow Filter » (Arnold et al. 1995) a permis de restreindre à  $0,0316 \pm 0,03$  j la gamme de variation du paramètre ALPHA\_BF, qui contrôle la rapidité de réponse de l'aquifère superficiel à la recharge et qui est à l'origine de l'allure de la courbe de décroissance du débit en période d'étiage. Toutefois, sa variation sur l'intégralité de la gamme possible a été autorisée dans le modèle 2 (voir plus bas).

Les paramètres Epc0, Esco et Canmx (voir tableau 4) ont initialement été respectivement fixés à 0, à 1 et à 0 pour les zones urbaines à moyenne et forte densités, et pour les lacs. Canmx a de plus été fixé à 0 pour les pâturages. Ailleurs, ces trois paramètres ont chacun une valeur unique (obtenue par calage automatique) au sein d'un même secteur (bassin de la rivière Jaune ou ailleurs sur le BVRSC). L'ensemble des valeurs ainsi initialement attribuées à ces trois paramètres varie ensuite par pourcentage lors des calages automatiques (voir tableau 4).

Pour augmenter le réalisme de la pluviométrie sur le BVRSC, une variation de cette dernière avec l'altitude a été évaluée. Pour cela, le coefficient Plaps (qui régit l'augmentation de pluviométrie par kilomètre d'élévation et par jour pluvieux) a été estimé en simulant la pluviométrie de la station Montmorency (673 m d'altitude) en augmentant celle de la station Jean-Lesage (74 m d'altitude) à l'aide de ce coefficient. Sa valeur a ensuite été optimisée pour minimiser la somme des erreurs en valeur absolue entre les pluviométries

observée et simulée de la station Montmorency. La valeur retenue pour ce coefficient est de  $3,5 \text{ mm}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{j}^{-1}$  pluvieux. Étant donné qu'il pleut environ un jour sur trois à Québec, cela signifie qu'il pleut environ 425 mm de plus par an et par kilomètre d'élévation. Ces valeurs sont en accord avec celles obtenues par Lemonds et McCray (2007) pour un bassin montagneux des États-Unis d'Amérique ( $500 \text{ mm}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ ). Une seule bande d'élévation par sous-bassin (ELEVB\_FR1 = 1) a été définie, avec comme altitude associée celle moyenne du sous-bassin. De plus, chaque fixation de paramètre comme précédemment décrite a été accompagnée soit d'une simulation pour vérifier que la valeur retenue conduisait bien à une amélioration des performances du modèle, soit d'une perturbation autour de la valeur initialement choisie pour vérifier qu'aucune optimisation (intéressante du point de vue des performances) n'était possible pour ce paramètre.

Les paramètres restants ont d'abord été ajustés manuellement (en ne modifiant qu'un seul type de paramètre à chaque fois, et en évaluant la pertinence de la modification à l'aide des quatre critères de performance présentés dans la figure 2), ce qui a permis de restreindre la gamme de variation des paramètres calés par la suite automatiquement (tous ceux du tableau 4) et de fixer ceux non automatiquement calables (tableau 3; les paramètres calables automatiquement sont par défaut prédéfinis dans SWAT) à des valeurs optimisant ces critères de performance. Les valeurs finalement retenues ont été obtenues à l'issue de 7 calages automatiques utilisant l'algorithme SCE-UA (Shuffled complex evolution-uncertainty analysis; voir van Griensven et Meixner 2007; Green et van Griensven 2008) et environ 150 calages manuels — une alternance de calages automatiques et manuels augmente en effet les chances de converger vers des valeurs optimales et réalistes pour les paramètres du modèle.

Les coefficients RFINC (voir tableau 3) ont par exemple été établis de manière à augmenter les performances du modèle du point de vue du critère de bilan. Leur valeur repose sur l'hypothèse d'une sous-estimation des précipitations neigeuses à cause du vent. Cette augmentation de 10 % des précipitations solides concordent avec les travaux de Fortin et al. (2008).

Enfin, deux modèles ont été construits avec SWAT, se distinguant surtout par la nature de leur calage. En effet, le BVRSC présentant une importante variabilité spatiale du point de vue géomorphologique, et puisque des données de débits sont disponibles pour l'exutoire de la rivière Jaune, un calage automatique a été effectué de 1985 à 1994 pour ce bassin montagneux seul, qui est inclus dans le BVRSC global. Les performances alors obtenues sont Nash = 0,67, Nash<sub>rc</sub> = 0,71 et Bilan = 0,99, ce qui est assez satisfaisant (la description mathématique de ces critères est donnée à la fig. 2). Ce calage n'a pas été soumis à une période de validation, puisque les paramètres ainsi obtenus sont ensuite utilisés dans les modèles globaux du BVRSC, qui eux sont soumis à la validation avec les données de l'exutoire du BV modélisé. De plus, scinder en deux les données de débits disponibles à l'exutoire de la rivière Jaune pour conserver une période de validation aurait conféré à la période d'observations disponibles une longueur totale d'environ 2,5 ans (puisque cette base est complète à seulement 45 %, voir tableau 2), ce qui nous aurait ramené au problème des don-

**Tableau 3.** Valeurs attribuées à des paramètres du modèle SWAT non calables automatiquement.

Paramètre	Description	Valeur
RFINC (1–12)	% d'ajustement des précipitations pour le mois considéré	+10 % (mois 1, 2, 3, 11 et 12)
NDTARG	Temps pour un lac à atteindre le volume cible calculé (j)	15 pour le lac Saint-Charles
PND_K	Perméabilité du fond d'un lac (mm·h <sup>-1</sup> )	0,1
SNOCOV_MX	Hauteur de neige pour une couverture totale (mm)	40
SNO50COV	Fraction de la valeur précédente pour couverture à 50 %	0,7
CH_K1	Perméabilité du fond des cours d'eau secondaires (mm·h <sup>-1</sup> )	0,2
CURYR_MAT	Âge des arbres lors de leur plantation (années)	30
MAT_YRS	Âge pour un développement maximal des arbres (années)	30
BIO_INIT	Densité de biomasse lors de la plantation (t·ha <sup>-1</sup> )	30 pour les arbres, 0 sinon
PHU_PLT	Unités de chaleur pour amener le végétal à maturité	300 à 1200 selon l'espèce
MGT_OP	Codes des opérations relatives aux végétaux et appliquées ici chaque année de la simulation	1 (plantation) le jour 1, et 5 (récolte) le jour 365
HVSTI	Indice de récolte en conditions de croissance optimales	1 (récolte totale)

**Nota :** Seuls les paramètres liés à la végétation (seconde moitié du tableau) n'ont pas été fixés suite aux ajustements manuels mais à l'aide de la pertinence de leur signification physique.

**Tableau 4.** Gammes de variation retenues pour les paramètres du modèle SWAT calables automatiquement.

Paramètre	Description	Gamme
CN2	Nombre utilisé dans le calcul du ruissellement par la méthode SCS	50–90 (%)
SURLAG	Définit la rapidité de l'écoulement de surface	0,3–0,6
SMFMN	Facteur minimal de fonte de la neige (mm·°C <sup>-1</sup> ·j <sup>-1</sup> )	1,8–2,7
TIMP	Poids de la température du jour actuel pour fonte de la neige	0,6–0,9
SMFMX	Facteur maximal de fonte de la neige	2–4
SMTMP	Température à laquelle fond la neige (°C)	1–2,5
CANMX	Hauteur maximale de pluie interceptée par la végétation (mm)	0–8 (%)
SOL_Z	Profondeur d'une couche de sol par rapport à la surface (mm)	40–1000 (%)
SFTMP	Température sous laquelle tombe de la neige (°C)	–1 à –4
ALPHA_BF	Constante de récession de l'écoulement de base (j)	0,02–1
SLOPE	Pente (identique pour toutes les unités de réponse hydrologique (URHs) d'un même bassin) (m·m <sup>-1</sup> )	0,02–0,35(%)
SOL_K	Perméabilité du sol à saturation (mm·h <sup>-1</sup> )	10–100 (%)
SOL_AWC	Eau disponible = porosité totale – celle de drainage (mm·mm <sup>-1</sup> )	0,05–0,5 (%)
ESCO	Facteur limitant la reprise par évaporation dans le sol	0,1–1 (%)
SLSUBBSN	Longueur maximale des ruisseaux pendant la pluie (m)	10–125 (%)
GWQMN	Hauteur minimale d'eau dans l'aquifère pour retour à la rivière (mm)	100–3000
RCHRG_DP	% d'eau de l'aquifère superficiel qui percole vers le profond	0,1–0,9
CH_K2	Perméabilité du fond du cours d'eau principal (mm·h <sup>-1</sup> )	1–149
SOL_ALB	Albédo de la surface du sol	0,01–0,15
GW_DELAY	Variable relative à l'écoulement dans l'aquifère superficiel (j)	0–50
GW_REVAP	Variable limitant la migration d'eau de l'aquifère vers la ZNS	0,02–0,2
CH_N	Coefficient de rugosité du cours d'eau principal du sous-bassin	0,01–0,3
REVAP_MN	Hauteur minimale d'eau dans l'aquifère pour reprise par évaporation (mm)	0,1–800
EPCO	Facteur limitant la reprise d'eau du sol par les plantes	0–0,5 (%)
TLAPS	Perte de température par km d'élévation (°C·km <sup>-1</sup> )	–12 à –4
BLAI	Développement foliaire maximal (m <sup>2</sup> ·m <sup>-2</sup> )	0–9 (%)
BIOMIX	Efficacité de l'homogénéisation annuelle du sol	0,25–1 (%)

**Nota :** Le symbole (%) signifie que le paramètre a varié par pourcentage lors du calage, bien qu'on renseigne ici les gammes de variation permises par valeurs. Dans le cas du modèle 2, en plus de ceux indiqués ci-dessus, les paramètres suivants ont varié par pourcentage : Alpha\_Bf, Ch\_k2, et Ch\_N. Les paramètres sont classés par ordre d'importance décroissante (obtenu par analyse de sensibilité). SCS, Soil Conservation Service; ZNS, zone non saturée.

**Fig. 2.** Critères d'efficacité ici utilisés. Ils obéissent tous à la même loi : plus le critère est proche de 1, meilleure est la simulation. S'il est négatif, alors on simule mieux en prenant la moyenne des débits observés pour simuler le débit à chaque pas de temps qu'avec la simulation issue du modèle.  $Q_{obs}$  et  $Q_{sim}$  sont les valeurs journalières des chroniques de débit observés et simulés, et  $\varepsilon$  est la moyenne des débits observés divisée par 40.  $Nash_{in}$  et  $Nash_{rc}$  sont des critères basés davantage sur les très faibles (étiages) et faibles débits, respectivement, alors que le critère de Nash « classique » est plus influencé par les forts débits.

$$Nash = 1 - \frac{\sum (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad Nash_{rc} = 1 - \frac{\sum (\sqrt{Q_{obs}} - \sqrt{Q_{sim}})^2}{\sum (\sqrt{Q_{obs}} - \sqrt{\bar{Q}_{obs}})^2}$$

$$Nash_{in} = 1 - \frac{\sum [\ln(Q_{obs} + \varepsilon) - \ln(Q_{sim} + \varepsilon)]^2}{\sum (\ln(Q_{obs} + \varepsilon) - \ln(\bar{Q}_{obs} + \varepsilon))^2} \quad Bilan = 1 - \left| \sqrt{\frac{\sum Q_{sim}}{\sum Q_{obs}}} - \sqrt{\frac{\sum Q_{obs}}{\sum Q_{sim}}} \right|$$

nées de débits des autres sous-bassins, comme expliqué plus haut. Ainsi, on obtient un jeu de paramètres optimal pour le BV de la rivière Jaune (voir tableau 5), qui y est fixé dans un premier temps.

Certains paramètres affectent l'ensemble du bassin modélisé, lesquels varient donc pour le bassin de la rivière Jaune lorsque l'on effectue un calage automatique sur l'ensemble du BVRSC. Dès lors, il a été choisi d'envisager deux options : soit trouver un compromis pour les valeurs des paramètres à l'échelle du bassin entier, avec pour but d'optimiser simultanément les performances sur le bassin global et celui de la rivière Jaune (modèle 1, construit en optimisant la simulation aux deux exutoires en même temps), soit de ne tenir compte que des performances sur l'exutoire global (modèle 2), auquel cas on autorise la variation de tous les paramètres obtenus pour le bassin de la rivière Jaune, mais en faisant varier par pourcentage ceux pour lesquels une hétérogénéité spatiale entre les deux secteurs voulait être conservée (voir tableau 4).

### 3.2. Mise en œuvre des autres modèles

La mise en œuvre du modèle GR4J demande l'optimisation de ses quatre paramètres (Perrin et al. 2003). Dans notre cas, l'algorithme d'optimisation utilisé est celui du solveur du logiciel EXCEL 2007, et la fonction coût retenue est le critère de Nash. L'ETP fournie au modèle est une ETP moyenne interannuelle calculée à partir des valeurs de température et de radiations solaires moyennes interannuelles, ce qui donne généralement d'aussi bons résultats qu'un autre type d'ETP (Oudin et al. 2005). Les précipitations fournies ont été obtenues en ajoutant à des précipitations uniquement liquides, les hauteurs d'eau issues de la fonte de la neige calculées par SWAT. Les valeurs de la pluviométrie liquide observée n'étant disponibles que sur une partie de la période entre 1985 et 2005 (pour les deux stations d'Environnement Canada utilisées dans SWAT), alors que la pluviométrie totale était toujours disponible sur cette période, les données manquantes de précipitations liquides ont été simulées à l'aide d'un coefficient correspondant au paramètre SFTMP de SWAT (température sous laquelle tombe de la neige), optimisé pour chacune des deux stations de manière à minimiser l'écart entre pluviométrie liquide observée

et simulée. Le coefficient de corrélation entre ces deux pluviométries est de 0,94 pour l'aéroport Jean-Lesage et de 0,95 pour la station de la forêt Montmorency, avec des valeurs optimales retenues pour le coefficient SFTMP égales respectivement à  $-0,7$  et  $-0,13$  °C. Finalement, une pondération à partir de la surface du BVRSC affectée par SWAT à chacune des stations d'Environnement Canada a été employée pour retenir la pluviométrie uniquement liquide finale. La hauteur de neige fondue calculée par SWAT (dans le modèle 1) pour chaque sous-bassin a été soumise au même type de pondération (soit en fonction du pourcentage de la surface totale que représentait chaque sous-bassin de SWAT) pour le calcul d'une hauteur fondue moyenne sur le BVRSC modélisé. Ces deux types de valeurs ont ensuite été sommées pour fournir ce que l'on appellera des « précipitations totales liquides » aux modèles GR4J et du RN.

Tel que mentionné précédemment, les RN utilisés sont des perceptrons multicouches. Leur mise en œuvre dans le cadre de cette étude suit exactement Anctil et al. (2009) : standardisation préalable des entrées (les valeurs sont ajustées pour suivre une loi Gaussienne de moyenne 0 et de variance 1) et rétropropagation Levenberg–Marquardt avec régulation Bayésienne (MacKay 1992; Foresee et Hagan 1997), ce qui signifie que la fonction objectif optimisée lors de la calibration est une pondération entre la moyenne des erreurs au carré entre débits observés et simulés, et entre la somme des poids au carré des neurones de la couche cachée. Dans chaque cas, 25 RN sont alors entraînés, et la simulation à chaque pas de temps est la valeur moyenne des 25 simulations ainsi produites (Wolpert 1992). Le jeu d'entrées optimal est établi de manière constructiviste à partir d'une liste de 40 variables candidates, alors que le nombre de neurones cachés est fixé à 5. Finalement, une fois les entrées établies, le nombre de nœuds cachés est optimisé par essai et erreur. Parmi les 40 entrées candidates, on trouve 6 variables liées au débit moyen interannuel de la rivière Saint-Charles, 10 variables liées à la température, des valeurs de précipitations pour le jour actuel et jusqu'au 3<sup>e</sup> jour précédent, dont les précipitations de la station Jean-Lesage, celles moyennes issues de SWAT, et les « précipitations totales liquides » décrites précédemment. Parmi ces 40 entrées candidates, on trouve également quatre types d'ETP, le débit pompé pour l'AEP, cinq indices de la teneur en eau du sol pour des épaisseurs de sol comprises entre 100 et 1200 mm (Anctil et al. 2004), et un indice de saison caractérisé par la combinaison de deux variables :  $\cos(2\pi(t-1)/T)$ , et  $\sin(2\pi(t-1)/T)$ , avec  $t$  le jour actuel au cours de l'année de simulation considérée et  $T$  égal à 365. Parmi ces entrées, les 8 variables suivantes ont été retenues : le débit journalier moyen interannuel de la rivière Saint-Charles pour le jour actuel, les « précipitations totales liquides » pour les 3 jours précédant celui simulé, les indices de teneur en eau du sol pour des épaisseurs de 200 et 800 mm, et les variables caractérisant l'indice de saison. Le nombre de nœuds cachés finalement retenu après sélection de ces 8 entrées est de 4.

### 3.3. Performances des modèles

On constate au tableau 6 et à la figure 3 que les résultats des différents modèles sont globalement satisfaisants. En effet, les valeurs obtenues pour le critère de Nash calculé sur les débits sont supérieures à 0,5, ce que Moriasi et al. (2007)

**Tableau 5.** Valeurs retenues pour les 13 principaux paramètres (décrits au Tableau 4) à l'issue des calages automatiques de SWAT, pour la rivière Jaune (rj) et pour les modèles 1 et 2 (mod1 et mod2) du bassin versant de la rivière Saint-Charles (BVRSC), en distinguant dans ce cas les valeurs sur le bassin de la rivière Jaune (rj) de celles partout ailleurs sur le BVRSC (pa).

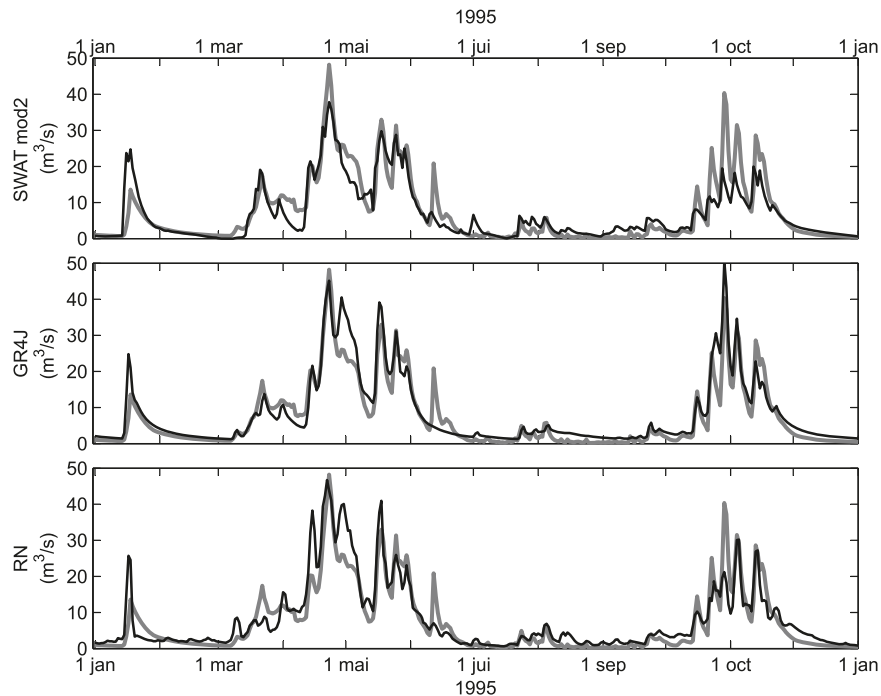
Paramètre	rj	mod1_rj	mod1_pa	mod2_rj	mod2_pa
CN2	63–96	63–96	52–80	50–77	52–80
SURLAG	0,5	0,41	0,41	0,32	0,32
SMFMN	1,92	2,10	2,10	2,66	2,66
TIMP	0,7	0,8	0,8	0,7	0,7
SMFMX	2,69	3	3	2	2
SMTMP	2,16	1,80	1,80	1,14	1,14
CANMX	3,9	3,9	4,4	0–5,8	0–6,5
SOL_Z	50–200	50–200	47–189	50–200	46–185
SFTMP	0,59	0,50	0,50	–0,65	–0,65
ALPHA_BF	0,3	0,3	0,06	1,0	0,3
SLOPE	0,07–0,24	0,07–0,24	0,04–0,25	0,07–0,25	0,03–0,23
SOL_K	31–65	31–65	12–25	45–92	17–35
SOL_AWC	0,05–0,25	0,05–0,25	0,07–0,35	0,07–0,35	0,10–0,50

**Tableau 6.** Performances des différents modèles.

Modèle	Calage BVRSC (1986–1995)				Validation BVRSC (1996–2005)				Valeurs rivière Jaune (1986–1994)		
	Nash	Nash <sub>rc</sub>	Nash <sub>ln</sub>	Bilan	Nash	Nash <sub>rc</sub>	Nash <sub>ln</sub>	Bilan	Nash	Nash <sub>rc</sub>	Bilan
mod1	0,65	0,67	0,57	0,95	0,62	0,53	0,06	0,85	0,6	0,67	0,96
mod2	0,72	0,73	0,61	0,91	0,66	0,56	0,12	0,86	0,47	0,52	0,91
GR4J	0,78	0,80	0,72	0,95	0,67	0,68	0,62	0,97			
RN	0,79	0,79	0,70	0,97	0,67	0,65	0,55	0,98			

**Nota :** Les critères sont décrits à la figure 2. BVRSC, bassin versant de la rivière Saint-Charles.

**Fig. 3.** Hydrogrammes simulés (en noir) et observés (en gris) avec les trois différents modèles, pour la dernière année de la période de calage (1995). L'hydrogramme obtenu avec le modèle 1 de SWAT n'est pas présenté car il est très similaire à celui du modèle 2, et moins bon que ce dernier.



qualifient de « satisfaisant » pour des simulations de débits au pas de temps mensuel, alors que nous simulons ici au pas de temps journalier, ce qui est plus délicat. Le modèle 2 de

SWAT est meilleur que le modèle 1 pour la simulation à l'exutoire global, mais logiquement moins bon que le modèle 1 pour l'exutoire de la rivière Jaune. Par ailleurs, les



étiages sont mieux simulés par GR4J et le RN que par SWAT, surtout pour la période de validation (voir les valeurs de  $Nash_{in}$  au tableau 6). Les trois modèles ayant été calés en maximisant le critère de Nash sur les débits, leur capacité à simuler les faibles débits pourrait probablement être améliorée, notamment en utilisant le critère de Nash sur les racines ou logarithmes népériens des débits lors des calages, mais cela réduirait sans doute leur capacité à simuler les forts débits. En général, les approches utilisant le RN et GR4J donnent ici des résultats assez proches, et meilleurs que ceux de l'approche employant SWAT.

Plusieurs causes limitent la performance des trois modèles. Tout d'abord, un manque de données au niveau de la pluviométrie est l'une des limitations les plus évidentes qui se manifeste notamment par des crues non simulées (fig. 3) hors de la période de fonte de la neige. Idéalement, il faudrait un pluviomètre par sous-bassin. Ici, on ne dispose que de deux stations pluviométriques situées à l'extérieur du BVRSC modélisé, ce qui réduit la confiance dans la série de précipitations moyennes (GR4J et RN) et empêche une description réaliste de l'hétérogénéité spatiale des pluies (SWAT), ce qui a été confirmé en comparant les pluviométries des stations d'environnement Canada et celles des stations de la ville de Québec (voir tableau 2 et fig. 1). Le climat local est également délicat à modéliser, à cause de la complexité des processus réels liés à la neige et aux erreurs de mesure probables au niveau du débit lorsque l'eau est sous pression sous la glace, tel que discuté par Lévesque et al. (2008b). En revanche, le fait que GR4J et le RN reposent tous deux sur la série de lame d'eau de fonte simulée par le modèle SWAT confirme que ce module performe convenablement.

Une question demeure toutefois : pourquoi les approches employant le modèle global GR4J et le RN donnent-elles de meilleurs résultats que celle utilisant le modèle distribué SWAT? En principe, la modélisation plus respectueuse des processus hydrologiques des modèles distribués devrait avantager SWAT au détriment des modèles globaux. Mais, dans cette étude, les lacunes dans la description spatiale des entrées du modèle SWAT viennent fort probablement limiter son utilité. En effet, la quasi-absence d'information spatiale sur les précipitations, l'absence d'étude pédologique détaillée et de débits observés à l'exutoire du lac Saint-Charles ne permettent certainement pas au modèle SWAT d'exploiter son plein potentiel (voir Moon et al. 2004; Geza et McCray 2008, pour l'influence respective de la résolution spatiale des données de précipitations, et de sol, sur les performances du modèle). Les résultats tendent à montrer que ces lacunes avantagent la performance des modèles globaux (GR4J et RN) au détriment du modèle distribué SWAT. En d'autres mots, la structure plus lourde de SWAT devient un inconvénient dès que les données sont disponibles en quantité et en qualité insuffisantes pour en justifier l'exploitation.

En conséquence des lacunes aux entrées de SWAT et du fait que seulement un ou deux sites avec des données de débits sont pris en compte lors des calages, celui-ci se comporte comme un modèle sur-paramétré (voir O'Connell et Todini 1996 : il n'y a pas assez d'information contenue dans les mesures disponibles pour identifier clairement les valeurs des paramètres). Il a en effet été constaté, lors des calages automatiques, une grande variabilité des paramètres

retenus pour une très faible différence au niveau des performances de simulation (voir par exemple la variable  $Alpha_{bf}$  dans le tableau 5), ce qui est un problème fréquent en modélisation hydrologique (voir, par exemple, Uhlenbrook et al. 1999). Autrement dit, un grand nombre de jeux de paramètres différents peut conduire à une efficacité de simulation similaire. Or, chaque jeu de paramètres correspond à des processus hydrologiques simulés différents. Néanmoins, son grand nombre de paramètres devrait conférer à SWAT une grande flexibilité lors des calages automatiques pour compenser les différentes sources d'erreur mentionnées plus haut. Mais étant donné que de nombreux paramètres sont définis de manière identique sur l'ensemble du bassin (comme ceux liés au sol) faute d'information sur la variabilité spatiale réelle de leurs valeurs, la modification de ces dernières lors des calages automatiques peut améliorer la simulation sur certains sous-bassins tout en la dégradant simultanément sur d'autres, ce qui limite l'augmentation des performances lors des calages automatiques et résulte probablement en l'obtention de jeux de paramètres représentant simplement un compromis à l'échelle du bassin entier permettant de compenser au maximum les différentes sources d'erreur dans les données fournies au modèle. En d'autres mots, les paramètres obtenus à l'issue des calages automatiques peuvent s'éloigner très nettement des valeurs réelles, comme c'est le cas pour l'épaisseur de sol (moins de 200 mm sur tout le bassin, alors qu'il dépasse souvent 1000 mm dans la réalité), tout en conduisant à des performances acceptables à l'exutoire global.

Il semble donc très délicat de simuler les bons processus hydrologiques sur le BVRSC, avec SWAT (compte tenu des données disponibles), ce qui est en contradiction avec le but de la modélisation hydrologique (Kirchner 2006). Dans notre cas, des critères de validation à l'intérieur du bassin versant modélisé (débits mesurés aux exutoires de sous-bassins) appuient cette affirmation. On dispose de données de débits aux exutoires de la rivière Nelson et de la rivière des Hurons (voir fig. 1 et tableau 2). La confrontation entre débits simulés par SWAT et observés à ces exutoires a conduit à des nombres de Nash (pour les modèles 1 et 2, respectivement) de 0,26 et 0,33 pour la rivière Nelson, et de 0,46 et 0,49 pour la rivière des Hurons, ce qui est insatisfaisant comparativement aux performances obtenues là où des données de débit ont servi à la calibration. Cela amène à la conclusion que les paramètres trouvés sont peu représentatifs de la réalité, ce qui laisse présager de réelles difficultés de simulation ultérieure de la qualité de l'eau, auquel cas la piste du calage successif par sous-bassin devra être investiguée pour tous ceux pour lesquels des données de débits existent. De plus, les débits de la rivière Jaune sont également utilisés comme critère de validation du modèle 2 monté avec SWAT. Les résultats sont présentés dans le tableau 6. Finalement, certaines pistes restent à explorer pour tenter d'améliorer les performances obtenues avec SWAT, comme utiliser le nouveau MNT disponible, les données radar pour la précipitation, les débits simulés à l'exutoire du lac Saint-Charles dans une autre étude, ou encore un modèle SWAT unique pour chaque sous-bassin pour lequel on dispose de données de débits (en couplant ensuite ces différents modèles pour résoudre le problème des paramètres définis à l'échelle du bassin entier).

#### 4. Conclusion

Une gestion plus attentive des volumes et de la qualité des eaux du bassin versant de la rivière Saint-Charles nécessite la mise en place de modèles de simulation permettant l'évaluation de divers scénarios de développement ou d'intervention. La performance du modèle de qualité de l'eau SWAT a été démontrée à plusieurs reprises (Gassman et al. 2007), bien que le modèle parfait n'existe pas. Dans le cadre du bassin versant de la rivière Saint-Charles, la simulation des débits par le modèle SWAT est globalement satisfaisante, mais limitée par les lacunes dans les données disponibles, notamment au niveau de l'observation des précipitations, de la description pédologique du territoire et de l'archivage des opérations au barrage Cyrille-Delage. Ces limites ont été confirmées par les performances supérieures obtenues avec les approches employant le modèle hydrologique plus simple GR4J et un réseau de neurones, ne requérant tous deux qu'une description grossière du territoire. Or, ces modèles ne disposent pas des atouts de SWAT pour la simulation de la qualité des eaux. Il semble donc incontournable, considérant l'importance stratégique du bassin versant de la rivière Saint-Charles pour l'approvisionnement en eau potable et le support aux activités récréatives et touristiques, que l'effort d'observation de ce territoire soit accru.

#### Remerciements

Merci à Boris I.G. Salou et Santatriniaina D. Rasolomanana pour leurs conseils sur l'utilisation de SWAT, à Geneviève Pelletier et William Larouche pour les données fournies et à Annie-Claude Parent pour l'aide à la réalisation de cartes. Peter A. Vanrolleghem est titulaire de la Chaire de recherche du Canada en modélisation de la qualité de l'eau. François Anctil est titulaire de la Chaire de recherche EDS en prévisions et actions hydrologiques.

#### Bibliographie

- Anctil, F., Michel, C., Perrin, C., et Andréassian, V. 2004. A soil moisture index as an auxiliary ANN input for streamflow forecasting. *Journal of Hydrology (Amsterdam)*, **286**(1-4) : 155–167. doi:10.1016/j.jhydrol.2003.09.006.
- Anctil, F., Fillion, M., et Tournebize, J. 2009. A neural network experiment on the simulation of daily nitrate-nitrogen and suspended sediment fluxes from a small agricultural catchment. *Ecological Modelling*, **220**(6) : 879–887. doi:10.1016/j.ecolmodel.2008.12.021.
- Arnold, J.G., Allen, P.M., Muttiah, R., et Bernhardt, G. 1995. Automated base flow separation and recession analysis techniques. *Ground Water*, **33**(6) : 1010–1018. doi:10.1111/j.1745-6584.1995.tb00046.x.
- ASCE. 2000a. Artificial neural networks in hydrology. I: Preliminary concepts. *Journal of Hydrologic Engineering*, **5**(2) : 115–123. doi:10.1061/(ASCE)1084-0699(2000)5:2(115).
- ASCE. 2000b. Artificial neural networks in hydrology. II: Hydrologic Applications. *Journal of Hydrologic Engineering*, **5**(2) : 124–137. doi:10.1061/(ASCE)1084-0699(2000)5:2(124).
- Borah, D.K., et Bera, M. 2003. Watershed-scale hydrologic and nonpoint-source pollution models: Review of mathematical bases. *Transactions of the ASAE. American Society of Agricultural Engineers*, **46** : 1553–1566.
- Canada Soil Survey Committee. 1978. *The Canadian System of Soil Classification*. Agriculture Canada Publ. No. 1646. Canadian Gov. Pub. Centre, Ottawa, Ont.
- Carpenter, J.F., Paré-Bourque, M., Pelletier, G., et Vanrolleghem, P.A. 2008. Reducing pollutant discharge into urban rivers by real-time control of a stormwater pond. *Dans Proceedings du 24<sup>e</sup> Congrès de l'Association Canadienne sur la Qualité de l'Eau*, 7 novembre 2008, Montréal, Qué. ACQE, Burlington.
- Conseil du bassin de la rivière Saint-Charles. 2007. *Portrait du bassin de la rivière Saint-Charles* (en ligne). Disponible à [www.rivierestcharles.org/pdf/portrait\\_2007.pdf](http://www.rivierestcharles.org/pdf/portrait_2007.pdf)
- Di Luzio, M., Srinivasan, R., Arnold, J.G., et Neitsch, S.L. 2002. Arcview interface for Swat 2000 user's guide, Blackland research and extension center. Temple, Texas. Rapp. BRC-02-07. [en ligne]. Disponible à [www.brc.tamus.edu/swat/downloads/doc/swatav2000.pdf](http://www.brc.tamus.edu/swat/downloads/doc/swatav2000.pdf).
- Foresee, F.D., et Hagan, M.T. 1997. Gauss-Newton approximation to Bayesian learning. *Dans Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Neural Networks*, Houston, Texas. Part 3 (of 4). IEEE, Piscataway. p. 1930–1935.
- Fortin, F., Therrien, C., et Anctil, F. 2008. Correcting wind-induced bias in solid precipitation measurements in case of limited and uncertain data. *Hydrological Processes*, **22**(17) : 3393–3402. doi:10.1002/hyp.6959.
- Gassman, P.W., Reyes, M.R., Green, C.H., et Arnold, J.G. 2007. The soil and water assessment tool: Historical development, applications, and future research directions. *Transactions of the ASABE*, **50**(4) : 1211–1250.
- Geza, M., et McCray, J.E. 2008. Effects of soil data resolution on SWAT model stream flow and water quality predictions. *Journal of Environmental Management*, **88**(3) : 393–406. doi:10.1016/j.jenvman.2007.03.016.
- Green, C.H., et van Griensven, A. 2008. Autocalibration in hydrologic modeling: Using SWAT2005 in small-scale watersheds. *Environmental Modelling & Software*, **23**(4) : 422–434. doi:10.1016/j.envsoft.2007.06.002.
- Kirchner, J.W. 2006. Getting the right answers for the right reasons: Linking measurements, analyses, and models to advance the science of hydrology. *Water Resources Research*, **42**(3) : W03S04. doi:10.1029/2005WR004362.
- Lemonds, P.J., et McCray, J.E. 2007. Modeling hydrology in a small rocky mountain watershed serving a large urban population. *Journal of the American Water Resources Association*, **43**(4) : 875–887. doi:10.1111/j.1752-1688.2007.00069.x.
- Lévesque, É., Lamontagne, L., van Griensven, A., Vanrolleghem, P.A., et Anctil, F. 2008a. Méthodologie pour l'adaptation de données physiographiques canadiennes au modèle de qualité de l'eau SWAT. *Journal of Environmental Engineering and Science*, **7** : 453–466.
- Lévesque, É., Anctil, F., van Griensven, A., et Beauchamp, N. 2008b. Evaluation of streamflow simulation by SWAT model for two small watersheds under snowmelt and rainfall. *Hydrological Sciences Journal*, **53**(5) : 961–976. doi:10.1623/hysj.53.5.961.
- MacKay, D.J.C. 1992. Bayesian interpolation. *Neural Computation*, **4**(3) : 415–447. doi:10.1162/neco.1992.4.3.415.
- Moon, J., Srinivasan, R., et Jacobs, J.H. 2004. Stream flow estimation using spatially distributed rainfall in the Trinity river basin, Texas. *American Society of Agricultural Engineers*, **47**(5): 1445–1451.
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., et Veith, T.L. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, **50**(3) : 885–900.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Srinivasan, R., et Wil-

- liams, J.R. 2004. Soil and water assessment tool input/output file documentation, version 2005 (en ligne). Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, Temple, Texas. Disponible à [www.brc.tamus.edu/swat/downloads/doc/swat2005/SWAT%202005%20io.pdf](http://www.brc.tamus.edu/swat/downloads/doc/swat2005/SWAT%202005%20io.pdf).
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., et Williams, J.R. 2005. Soil and water assessment tool theoretical documentation, version 2005 (en ligne). Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, Temple, Texas. Disponible à [www.brc.tamus.edu/swat/downloads/doc/swat2005/SWAT%202005%20theory%20final.pdf](http://www.brc.tamus.edu/swat/downloads/doc/swat2005/SWAT%202005%20theory%20final.pdf).
- Nour, M.H., Smith, D.W., Gamal El-Din, M., et Prepas, E.E. 2006. The application of artificial neural networks to flow and phosphorus dynamics in small streams on the Boreal Plain, with emphasis on the role of wetlands. *Ecological Modelling*, **191**(1) : 19–32. doi:10.1016/j.ecolmodel.2005.08.010.
- O'Connell, P.E., et Todini, E. 1996. Modelling of rainfall, flow and mass transport in hydrological systems: An overview. *Journal of Hydrology (Amsterdam)*, **175**(1-4) : 3–16. doi:10.1016/S0022-1694(96)80003-5.
- Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., et Loumagne, C. 2005. Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? Part 2— Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling. *Journal of Hydrology (Amsterdam)*, **303**(1-4) : 290–306. doi:10.1016/j.jhydrol.2004.08.026.
- Parent, A.-C., Anctil, F., Cantin, V., et Boucher, M.-A. 2008. Neural network input selection for hydrological forecasting affected by snowmelt. *Journal of the American Water Resources Association*, **44**(3) : 679–688. doi:10.1111/j.1752-1688.2008.00198.x.
- Perrin, C. 2002. Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. *Houille Blanche*, **6/7**(6-7) : 84–91. doi:10.1051/lhb/2002089.
- Perrin, C., Michel, C., et Andréassian, V. 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology (Amsterdam)*, **279**(1-4) : 275–289. doi:10.1016/S0022-1694(03)00225-7.
- Pleau, M., Colas, H., Lavallée, P., Pelletier, G., et Bonin, R. 2005. Global optimal real-time control of the Quebec urban drainage system. *Environmental Modelling & Software*, **20**(4) : 401–413. doi:10.1016/j.envsoft.2004.02.009.
- Saleh, A., et Du, B. 2004. Evaluation of SWAT and HSPF within BASINS program for the Upper North Bosque River Watershed in Central Texas. *Transactions of the ASAE. American Society of Agricultural Engineers*, **47** : 1039–1049.
- Shamseldin, A.Y. 1997. Application of a neural network technique to rainfall-runoff modelling. *Journal of Hydrology (Amsterdam)*, **199**(3-4) : 272–294. doi:10.1016/S0022-1694(96)03330-6.
- Uhlenbrook, S., Seibert, J., Leibundgut, C., et Rodhe, A. 1999. Prediction uncertainty of conceptual rainfall-runoff models caused by problems to identify model parameters and structure. *Hydrological Sciences Journal*, **44**(5) : 779–798.
- van Griensven, A., et Meixner, T. 2007. A global and efficient multi-objective auto-calibration and uncertainty estimation method for water quality catchment models. *Journal of Hydroinformatics*, **9**(4) : 277–291. doi:10.2166/hydro.2007.104.
- Wolpert, D.H. 1992. Stacked generalisation. *Neural Networks*, **5**(2) : 241–259. doi:10.1016/S0893-6080(05)80023-1.
- Young, P. 2003. Top-down and data-based mechanistic modelling of rainfall-flow dynamics at the catchment scale. *Hydrological Processes*, **17**(11) : 2195–2217. doi:10.1002/hyp.1328.