

# **Modélisation hydrologique des petits bassins versants en milieu rural**

## **Objectifs**

L'objectif principal de ce projet de recherche portait sur la modélisation hydrologique des petits bassins versants ruraux au Québec, tant en volume qu'en qualité. Cet objectif était toutefois modulé en fonction de la réalité québécoise, la plupart des bassins versants de petite taille (1 à 100 km<sup>2</sup>) ne faisant l'objet d'aucun suivi hydrologique, et de la réalité budgétaire du programme. Néanmoins, deux des défis principaux de ce projet consistaient en la détermination du niveau minimal de connaissances nécessaires à une modélisation hydrologique utile à la gestion de la ressource et du territoire et en le renforcement d'observations sur les pesticides. Notons que l'essentiel des données historiques exploitées dans le cadre de ce projet ont été fournies par le CEHQ (Centre d'expertise hydrique du Québec) et le MDDEP (Ministère du développement durable, de l'environnement et des parcs). Une base de données de l'IRDA (Institut de recherche et de développement en agroenvironnement) et une seconde du Cemagref (France) ont également été explorées.

Le projet était divisé en trois volets portant respectivement sur les débits, la qualité de l'eau et les pesticides. L'avancement des connaissances et la disponibilité des données n'étant toutefois pas uniforme pour ces trois secteurs, les objectifs et les retombées attendues ont été modulés en conséquence. Ainsi, le premier volet portait sur la simulation de la lame d'eau de fonte et sur l'estimation et la simulation des débits de bassins versants non jaugés, en ciblant plus spécifiquement le territoire de la vallée du Saint-Laurent. Le second volet portait sur l'évaluation du modèle journalier de qualité de l'eau SWAT dans le contexte de données disponibles au CEHQ et au MDDEP pour de petits bassins versants agricoles. Finalement, le troisième volet consistait en une campagne de mesures permettant d'accroître les connaissances sur la présence de pesticides dans l'eau dans un contexte de cultures maraîchères en terres noires.

## **Méthodologie et résultats obtenus**

Une synthèse de la méthodologie ainsi que des résultats obtenus sont maintenant présentés pour chacun des trois volets de l'étude.

### **Estimation et simulation des débits**

Ce premier volet ciblait trois sous-objectifs spécifiques dans le contexte de petits bassins versants non jaugés et à usage principalement agricole : (1) l'estimation de la crue moyenne, (2) la simulation de la lame d'eau de fonte et (3) la simulation des débits.

(1) La Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables a été mise en place par le gouvernement du Québec afin d'accorder aux rives, au littoral et aux plaines inondables, une protection adéquate en raison à leur importance dans la survie des composantes écologiques et biologiques des plans d'eau. Cette politique régit les interventions touchant cette partie des terres riveraines délimitées par la ligne des hautes eaux. Pour les petits cours d'eau non instrumentés, il n'existe aucune méthode à la fois simple, expéditive et réellement accessible pour déterminer cette ligne des hautes eaux. Une relation hydrologique adaptée aux petits cours d'eau de la plaine du Saint-Laurent a d'abord été établie pour l'estimation de la crue moyenne à partir de la superficie du bassin versant, à l'aide d'une base de données constituée des observations de 37 rivières naturelles drainant moins de 360 km<sup>2</sup> et s'écoulant sur le territoire de la province de Québec (Messier et al. 2007). Cette dernière a ensuite été combinée

à des équations hydrauliques existantes et à des observations d'indicateurs botaniques, morphologiques et physiques au sein d'une toute nouvelle approche mixte s'appuyant sur la double nature de la limite recherchée. Il a été démontré que l'utilisation de ces relations, de concert avec l'approche mixte, permet une réduction supplémentaire du domaine d'incertitude.

(2) L'accumulation d'une importante couverture de neige au Québec a un impact marqué sur l'hydrologie de ce territoire. Or, les propriétés massiques et thermiques de cette couverture sont souvent peu documentées, ce qui limite la performance des modèles de fonte. Dans le contexte de la présente étude, une approche novatrice a été explorée. Ainsi, un modèle statistique de simulation de la fonte printanière a été mis au point. La structure du modèle s'apparente à celle d'un générateur stochastique de précipitation tel que WGEN développé par Richardson et Wright. Le modèle se base sur la génération de séries chronologiques d'apports de fonte journalière. On y simule l'occurrence (jour de fonte – jour sans fonte) ainsi que l'intensité de la fonte. Le modèle, fourni sous forme d'une application Excel par le CEHQ, a été calibré à partir de séries chronologiques de fonte printanière produites avec l'aide du module de fonte de neige du modèle HYDROTEL. Onze stations météorologiques localisées au sud du Québec entre les latitudes 45°N et 47°N et les longitudes 70°O et 72°O ont été employées pour la génération des apports de fonte. Le modèle statistique calibré a ensuite été employé pour simuler des séries chronologiques d'apports de fonte qui ont été comparés statistiquement avec les apports produits par HYDROTEL. L'analyse révèle une bonne concordance des durées de la période de fonte ainsi que sur des dates de début de la fonte. Une sous-estimation du volume total de fonte a cependant été notée.

(3) La simulation des débits de bassins versants non jaugés reste un défi majeur en sciences hydrologiques. Un hydrogramme unitaire géomorphologique a ainsi été développé et mis en œuvre dans un module événementiel de simulation des débits. Sa structure s'inspire du principe de Horton qui divise l'écoulement en deux parties. Les efforts ont ensuite principalement porté sur la mise en place d'un cadre opérationnel pour ce modèle événementiel. En effet, les petits bassins versants agricoles étant rarement munis de stations météorologiques, il faut mettre sur pied une procédure pour constituer une série de précipitations à partir des données disponibles dans les environs. Dans le cadre de ce projet, nous avons exploité la technique du krigeage pour générer plusieurs scénarios quasi équiprobables de précipitations, ce qui permet du coup d'apprécier l'incertitude de l'entrée « précipitation » du modèle. Nous sommes à terminer les essais sur ce nouveau cadre opérationnel, ce qui implique également la manipulation de score probabiliste pour apprécier la justesse de l'incertitude des scénarios ainsi générés. Des travaux sont encore requis pour la mise en œuvre d'un modèle continu et pour la régionalisation des paramètres du modèle.

### Simulation de la qualité de l'eau

L'objectif de ce second volet portait sur la simulation journalière de qualité de l'eau de petits bassins versants agricoles, notamment sur (4) l'évaluation de la performance du modèle de qualité de l'eau SWAT à simuler les débits journaliers, (5) l'évaluation de la performance de ce même modèle à simuler les charges et (6) la pertinence de réseaux de neurones pour la simulation des charges.

(4) Puisqu'il y a peu d'applications du modèle SWAT sous des conditions climatiques caractéristiques du sud-est du Canada, la performance des fonctions hydrologiques du modèle a fait l'objet d'une évaluation en distinguant notamment les saisons hydrologiques hiver et été (Lévesque et al. 2008a). Les sources d'incertitude dans les données de calibration pour la saison hiver et dans la structure du modèle de fonte de SWAT ont fait l'objet d'une analyse détaillée et des propositions d'améliorations ont d'ailleurs été formulées par Lévesque et al. (2007). La capacité des fonctions hydrologiques de SWAT à converger vers un jeu unique de paramètres et à assurer que les voies d'entraînement des indicateurs de la qualité des eaux sont adéquatement modélisées a aussi été abordée. Globalement, les résultats montrent que les modules hydrologiques du modèle SWAT sont performants bien qu'il soit difficile d'optimiser

simultanément la performance en présence et en absence de fonte. Il faut aussi mentionner que les grandes incertitudes dans l'observation des débits hivernaux pourraient en partie expliquer ces divergences. Cette étude a initialement requis le développement d'un protocole de mise en place du modèle SWAT au Québec (Lévesque et al. 2008b).

(5) Les travaux sur la simulation des charges particulières et dissoutes ont grandement porté sur l'amélioration de la méthodologie de calage des MES et du P, pour un pas de temps journalier. Selon la revue de littérature, le calage des variables de qualité de l'eau se fait en général au pas de temps mensuel ou annuel. Or, la méthode de conversion des données journalières en données mensuelles ou annuelles détériore énormément le réalisme des résultats malgré l'obtention de bonnes performances. Ainsi, même si l'obtention de bonnes performances journalières est rare, nos recherches consistent à améliorer la méthodologie de calage journalier des variables de qualité de l'eau, en se basant sur une méthodologie de calage mensuel. Trois principaux problèmes ont ainsi été résolus tout au long du calage des débits: une biomasse mal représentée, une absence d'eau dans les drains et un ruissellement de surface trop élevé. Quant au calage des MES, une très bonne performance a été obtenue mais la performance des débits a été grandement diminuée au détriment de celle des MES (Rasolomanana et al. 2007). Pour y remédier, la méthodologie usuelle de calage a été améliorée pour garder les deux performances et produire des résultats plus réalistes, par le biais d'une méthodologie de calage multi-objectifs, dont une fonction objectif pour les débits et une autre pour les MES et en apportant des modifications dans le code source du modèle. Tout au long des essais de calibration, après analyse des composantes internes du modèle, les problèmes suivant ont été résolus : (i) une trop grande augmentation de l'exportation de sédiments, du ruissellement et une diminution de l'écoulement souterrain au fur et à mesure que la performance des sédiments s'améliore, (ii) le sens de l'écoulement souterrain allant en premier lieu vers les écoulements latéraux avant les drains, (iii) l'inexistence d'eau dans les drains et une sur-exportation de sédiments après utilisation de plusieurs fonctions objectifs; (iv) le déséquilibre de poids affectés aux fonctions objectifs selon le nombre d'observations et (v) une grande perte de performance après remplacement des valeurs optimales dans le modèle. Ainsi, la méthodologie proposée a abouti à une très bonne performance journalière à la fois pour les débits et les MES. Par la suite, lors du calage du phosphore, il s'est avéré que l'auto calibration journalière n'arrivait pas à améliorer la performance du phosphore, même avec le calage multi-objectif. Le modèle a notamment du mal à simuler la concentration de P mesurée en période hivernale, en absence de ruissellement, même si ce problème a été corrigé au niveau des MES. Par conséquent, pour le moment, la recherche de solutions pour augmenter la performance du modèle, notamment le calage manuel, même s'il est laborieux, est en cours.

(6) En complément au modèle SWAT qui exige passablement de travail pour sa mise en œuvre, la potentialité des réseaux de neurones pour modéliser la qualité de l'eau sur un petit bassin versant agricole a été testée (Ancil et al. 2008 ; 2009). Ce type de modèle nécessite moins de temps de mise en œuvre que les modèles déterministes traditionnels et leur très grande flexibilité permet souvent d'arriver à de meilleures approximations. La base de données utilisées a été fournie par le Cemagref (France) et contient une trentaine d'années de données horaires et journalières de pluie, de débit et de flux de MES et de nitrate. La performance obtenue pour la simulation des nitrates est de près de 90 % selon le critère de Nash, alors qu'elle est d'un peu plus de 75 % pour les MES. Les flux de MES simulés ont aussi montré plus de dispersion (autant de valeurs surestimées que sous-estimées) que les flux de nitrates simulés. Ainsi, bien que le réseau soit moins performant pour la simulation de la matière en suspension, il n'en demeure pas moins que les performances obtenues pour les deux paramètres sont bonnes. Dans un objectif de développement d'un outil d'aide à la décision, un réseau de neurones est donc capable d'apporter suffisamment de précisions pour permettre aux gestionnaires de tester différents scénarios dans le but d'améliorer leurs pratiques agricoles, d'autant plus que les réseaux se montrent particulièrement performants pour des valeurs de contaminants élevées, celles qui sont d'ailleurs les plus problématiques.

## Une nouvelle base de données sur les pesticides

Ce troisième et dernier volet avait pour objectif d'observer les concentrations en pesticides dans l'eau dans un petit bassin versant agricole caractérisé par les terres noires et les cultures maraîchères, où l'utilisation des pesticides est très importante et où peu d'information existe sur le contenu en pesticides des eaux de surface. Plus spécifiquement, nous souhaitons (7) évaluer la nature des pesticides présents et la fluctuation des concentrations au cours de l'été dans les eaux de surface ainsi que de certains autres paramètres de qualité de l'eau dans les eaux de surface. L'échantillonnage a été effectué par le consortium PRISME.

(7) Le ruisseau Gibeault-Delisle (bassin versant de la rivière des Anglais) a été échantillonné en 2005 (3 prélèvements), en 2006 (43 prélèvements) et en 2007 (36 prélèvements). En 2005, 10 herbicides, 7 insecticides et 1 fongicide ont été détectés au total dans les trois échantillons prélevés. Les critères de qualité de l'eau pour la protection de la vie aquatique ont été dépassés pour 2 herbicides (métribuzine et linuron), 4 insecticides (diazinon, malathion, chlorpyrifos et parathion) et le fongicide (chlorothalonil). L'échantillonnage plus fréquent en 2006 a permis d'obtenir un portrait plus détaillé de la situation. Dix-sept herbicides, 11 insecticides et 2 fongicides ont été détectés à un moment ou à un autre tout au long de la période d'échantillonnage. La métribuzine (herbicide) et le chlorpyrifos (insecticide) ont été détectés dans 100% des échantillons prélevés. Les critères de qualité de l'eau pour la protection de la vie aquatique ont été dépassés pour 4 herbicides (métribuzine, linuron, diuron et trifluraline), 4 insecticides (diazinon, malathion, chlorpyrifos et diazinon) et un fongicide (chlorothalonil). À noter que le dépassement du critère de qualité de l'eau pour la protection de la vie aquatique a été observé dans 100% des échantillons pour le chlorpyrifos. En plus de l'analyse des pesticides, la concentration des particules en suspension, le carbone organique dissout, le pH, la conductivité électrique spécifique, et la concentration en phosphore réactif soluble ont été analysés dans tous les échantillons prélevés en 2006. Dix herbicides, 8 insecticides et 2 fongicides ont été détectés à un moment ou à un autre tout au long de la période d'échantillonnage de 2007. Parmi les herbicides, la métribuzine, le linuron, le diuron et le diméthénamide ont été détectés dans près de 100% des échantillons analysés. Comme c'était le cas en 2006, le chlorpyrifos est le seul insecticide détecté dans 100% des échantillons analysés en 2007, avec un dépassement du critère de qualité de l'eau pour la protection de la vie aquatique dépassé dans chaque échantillon. De façon générale, les concentrations maximales observées étaient plus élevées en 2007 qu'en 2006.

En accord avec la littérature existante, les pics de concentration des herbicides détectés apparaissent suite à une pluie, tendance qui n'est pas observée de façon consistante avec les insecticides et les fongicides détectés. Les herbicides détectés sont tous des produits appliqués au sol, ce qui pourrait impliquer un transport vers le cours d'eau par ruissellement et érosion. Les pics de concentration des particules en suspension dans l'eau suivent aussi les événements de pluie, alors qu'une relation inverse existe entre la conductivité électrique spécifique mesurée dans les échantillons non-filtrés et les événements de pluie. Une pluie résulte en une diminution de la conductivité électrique spécifique de l'échantillon, en raison de la dilution des sels par l'eau apportée par l'orage. Les concentrations en phosphore réactif soluble mesurées varient de 0,5 à 6,59 mg L<sup>-1</sup>, ce qui dépasse le critère pour les risques d'eutrophisation des cours d'eau, lequel a été établi pour le phosphore total à 0,03 mg L<sup>-1</sup>.

## Conclusion

Ce projet de recherche portait sur les nombreuses facettes de la modélisation hydrologiques des petits bassins versants agricoles au Québec, en s'intéressant à la fois aux débits, aux charges particulières et dissoutes, ainsi qu'aux pesticides. Parmi les nombreuses retombées de ce projet mentionnons : (i) une relation statistique pour l'estimation de la crue moyenne de débits, (ii) une méthode mixte pour la détermination de la ligne des hautes eaux, (iii) un nouveau simulateur de climat qui calcule les apports en eau provenant de la fonte de la neige, (iv) un module événementiel de simulation des débits, adapté aux petits bassins versants non jaugés et

reposant sur un nouvel hydrogramme unitaire géomorphologique, (v) une méthode de scénarisation des précipitations permettant de tenir compte de l'incertitude des observations, (vi) une procédure de mise en œuvre du modèle de qualité de l'eau SWAT, adaptée au Québec, (vii) l'évaluation de la performance du modèle SWAT à simuler les débits dans le contexte climatique québécois, (viii) une nouvelle procédure de calage du modèle SWAT optimisant à la fois les débits et les charges, (ix) une étude de la potentialité des réseaux de neurones à simuler les charges, (x) la constitution d'une base de données à fréquence d'échantillonnage élevée des pesticides dans les eaux de surface d'un territoire dominé par des terres noires et des cultures maraîchères, et (xi) une appréciation des mécanismes de transport des pesticides vers les eaux de surface de ces petits bassins versants.

Malgré tous ces efforts, beaucoup reste à faire en modélisation des petits bassins versants agricoles. En particulier, la question difficile des bassins non jaugés n'a pas encore été abordée pour les charges et les pesticides.

À rebours, la principale difficulté que nous avons encourue tout au long de ce projet concerne l'accès ou l'inexistence de données en quantité et en qualité suffisante. Si des bases de données journalières existent pour les débits de bassins versants de grandes tailles, celles-ci sont déjà passablement moins nombreuses pour les petits bassins versants. Quant aux charges et aux pesticides, les données accessibles au projet étaient contraignantes à la fois par leur rythme d'échantillonnage et par leur durée. Nous croyons donc qu'il est grandement temps de suivre la mouvance européenne et américaine, et que le Québec se dote d'un ou de plusieurs bassins versants expérimentaux dont les données seraient partagées par toute la communauté des chercheurs québécois.

## Références

Anctil, F., Lauzon, N. et Fillion, M. 2008. Added gains of soil moisture content observations for streamflow predictions using neural networks. *Journal of Hydrology*, 359, 225-234.

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, 879-887.

Lévesque, É., Anctil, F., van Griensven, A. et Beauchamp, N. 2008a. Evaluation of streamflow simulation by SWAT model for two small watersheds under snowmelt and rainfall. *Hydrological Sciences Journal*, 53(5), 961-976.

Lévesque, É., Lamontagne, L., van Griensven, A., Vanrolleghem P.A. et Anctil, F. 2008b. 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, E., Anctil, F. et van Griensven, A. 2007. Toward an improvement of the hydrological performance of the SWAT model under snow cover and during snowmelt. 4e Conférence Internationale sur SWAT, UNESCO-IHE. Delft, Pays-Bas. Juillet 2-6, 2007.

Messier, F., Anctil, F. et Beaulieu, B. 2007. Échelonnage de la crue journalière moyenne pour des bassins versants de superficie entre 10 et 360 km<sup>2</sup> au Québec. *Revue canadienne de génie civil* 34, 631-636.

Rasolomanana S.D., Lessard P. et Vanrolleghem P.A. 2007. Évaluation du modèle SWAT pour la simulation des matières en suspension. 23e conférence de l'Est du Canada sur la qualité de l'eau. Recueil de résumés. Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 26 octobre 2007, p. 18.