

Méthodologie pour l'adaptation de données physiographiques canadiennes au modèle de qualité de l'eau SWAT « soil water assessment tool »

Étienne Lévesque, Luc Lamontagne, Ann Van Griensven, Peter A. Vanrolleghem et François Anctil

Résumé : La modélisation hydrologique est un outil d'aide à la décision de premier plan à considérer dans un contexte de gestion intégrée de l'eau par bassin versant au Canada. Un protocole de mise en place unique et largement transférable de ces modèles est à privilégier pour faciliter la gestion de l'eau des bassins versants prioritaires. L'objectif des présents travaux est de proposer une approche visant à adapter les formats des données physiographiques actuellement disponibles aux formats exigés par le modèle de qualité de l'eau SWAT « soil water assessment tool ». Les critères de sélection d'un modèle numérique de terrain, d'un réseau hydrographique numérisé, de cartes d'occupations du territoire et des sols sont présentés. Des correspondances entre des classes d'occupations du territoire d'usage courant au Canada et celles requises dans la base de données de SWAT sont proposées. La méthodologie pour établir une typologie des sols est explicitée. La subjectivité inhérente dans la subdivision du bassin versant en sous-bassins, puis dans la distribution des unités de réponse hydrologique et la sensibilité des sorties du modèle au niveau de détail des produits cartographiques utilisés est discutée.

Mots-clés : bassin versant, gestion intégrée de l'eau, « soil water assessment tool » (SWAT), données physiographiques, cartes, unités de réponse hydrologique, modèle numérique de terrain, carte d'occupations du territoire, carte de sols, propriétés de sols.

Abstract: Use of dynamic models supports recent efforts to introduce integrated watershed management policies in Canada. A unique and largely transferable implementation of these models is needed to facilitate water management of priority watersheds. The objective of the current work is to adapt physiographic data to the water quality model SWAT (soil water assessment tool). Selection of a digital elevation model, a digitized stream network, land use and soil maps is required. An association between common land use classification in Canada and those defined in the SWAT database is proposed. A methodology to classify soil types is defined. The inherent subjectivity in the subdivision of the watershed into sub-basins, and in the hydrologic response unit distribution, and the sensitivity of the model's outputs to the level of detail of cartographic products used, are addressed.

Key words: watershed, integrated water management, soil water assessment tool (SWAT), physiographic data, maps, hydrologic response units, digital elevation model, land use map, soil map, soils properties.

Introduction

Des efforts importants sont actuellement consentis au Québec et dans plusieurs autres provinces canadiennes en vue de mettre en place la gestion intégrée de l'eau par bassin versant (Baril et al. 2006; Berzins et al. 2006; Gangbazo 2006). Cette approche intègre l'ensemble des activités et usages qui ont lieu à l'intérieur d'un bassin versant afin de gérer efficacement la ressource en eau tant en quantité

qu'en qualité. La mise en place de modèles de gestion des activités pour protéger la ressource en eau à l'échelle du bassin versant est nécessaire pour évaluer ces récents efforts. Le « soil water assessment tool » (SWAT) est un modèle capable de gérer efficacement la ressource en eau, en regard principalement à des problématiques de pollution diffuse en milieu agricole. Une comparaison de la structure des modèles continus AnnAGNPS, HSPF, MIKE SHE et SWAT, effectuée par Borah et Bera (2003), classe ce dernier comme

Reçu le 1 juin 2007. Révision acceptée le 10 juin 2008. Publié sur le site Web des Presses scientifiques du CNRC, à rgse.cnr.ca le 9 juillet 2008.

É. Lévesque, P.A. Vanrolleghem et F. Anctil.¹ Groupe de recherche en génie des eaux, Département de Génie Civil, Pavillon Adrien-Pouliot, Université Laval, Québec, QC G1K 7P4, Canada.

L. Lamontagne. Laboratoires de pédologie et d'agriculture de précision, Agriculture et Agroalimentaire Canada, 979 avenue Bourgogne, bureau 140, Québec, QC G1W 2L4, Canada.

A. Van Griensven. Department of Hydroinformatics and Knowledge Management, UNESCO-IHE, P.O. Box 3015, 2601 da Delft, The Netherlands.

Les commentaires sur le contenu de cet article doivent être envoyés au directeur scientifique de la revue avant le 31 janvier 2009.

1. Auteur correspondant (courriel : francois.anctil@gci.ulaval.ca).

un modèle prometteur pour des bassins versants majoritairement agricoles. Ces modèles avaient tous en commun la capacité de modéliser le fonctionnement hydrologique, les flux de sédiments et d'éléments chimiques à l'échelle du bassin versant. La comparaison des modèles HSPF et SWAT sur un bassin versant majoritairement agricole a montré que les deux modèles avaient la capacité de simuler adéquatement les débits et les charges en sédiments journaliers, cependant le paramétrage et la calibration du modèle HSPF se sont avérés plus ardues (Saleh et Du 2004). Une meilleure capacité du modèle SWAT à simuler les charges journalières et mensuelles de nutriments est également soulignée.

Le modèle SWAT nécessite la caractérisation de la topographie, de l'occupation du territoire et des pratiques de gestion des terres, ainsi que des propriétés de sols. L'intégration des données cartographiques est largement facilitée par l'interface du système d'information géographique dont SWAT est munie. Ce modèle nécessite l'adaptation des données physiographiques, l'interface acceptant directement les données physiographiques standardisées pour l'ensemble du territoire américain. Cette adaptation porte sur la nature des données disponibles, l'intégration de ces dernières dans l'interface SWAT, en faisant l'hypothèse que les processus hydrologiques sont adéquatement représentés en sol canadien. Les applications canadiennes ont principalement porté sur un bassin versant spécifique (Chanasyk et al. 2003; Mapfumo et al. 2004; Deslandes et al. 2007; Michaud et al. 2007). Appliquer le modèle sur différents bassins versants jugés prioritaires par les acteurs de l'eau nécessite une méthodologie unique et aussi générale que possible. Cette méthodologie doit de plus ne pas être trop lourde et utiliser une information précise et fiable. La couverture spatiale de cette information doit également être disponible à l'échelle désirée. L'objectif de ce texte est de proposer une méthodologie pour adapter les données physiographiques les plus couramment disponibles, dans le contexte québécois et canadien, à l'utilisation du modèle SWAT.

Le modèle « soil water assessment tool » (SWAT)

Le modèle SWAT est le fruit de près de 18 années de développement initié par le United States Department of Agriculture (USDA) Agricultural Research Service (Arnold et Fohrer 2005). Il est utilisé par une imposante communauté internationale. SWAT est un modèle distribué semi-physique et semi-empirique qui fonctionne au pas de temps journalier. Le bassin versant est discrétisé en sous-bassins contenant chacun un bief principal. À l'intérieur des sous-bassins, une combinaison unique d'occupations du territoire, de pratiques culturales, de types de sols forment des unités homogènes nommées unités de réponse hydrologique (URH). C'est à cette échelle spatiale que sont calculés les bilans en eau, en sédiments et en nutriments : la modélisation des processus terrestres. Les apports de chacune de ces URH sont ensuite acheminés au bief principal. Par la suite, entrent en jeu les processus dans le cours d'eau qui complètent le transport jusqu'à l'exutoire principal du bassin versant. Neitsch et al. (2005a) proposent une description détaillée de la modélisation de ces processus terrestres et dans le cours d'eau. Les étapes clefs de la caractérisation de la physiographie sont : la délimitation du bassin versant, la caractérisation de l'oc-

cupation du territoire et des pédo-paysages, puis le découpage du bassin et des sous-bassins en URH.

Méthodologie

Description des sites à l'étude

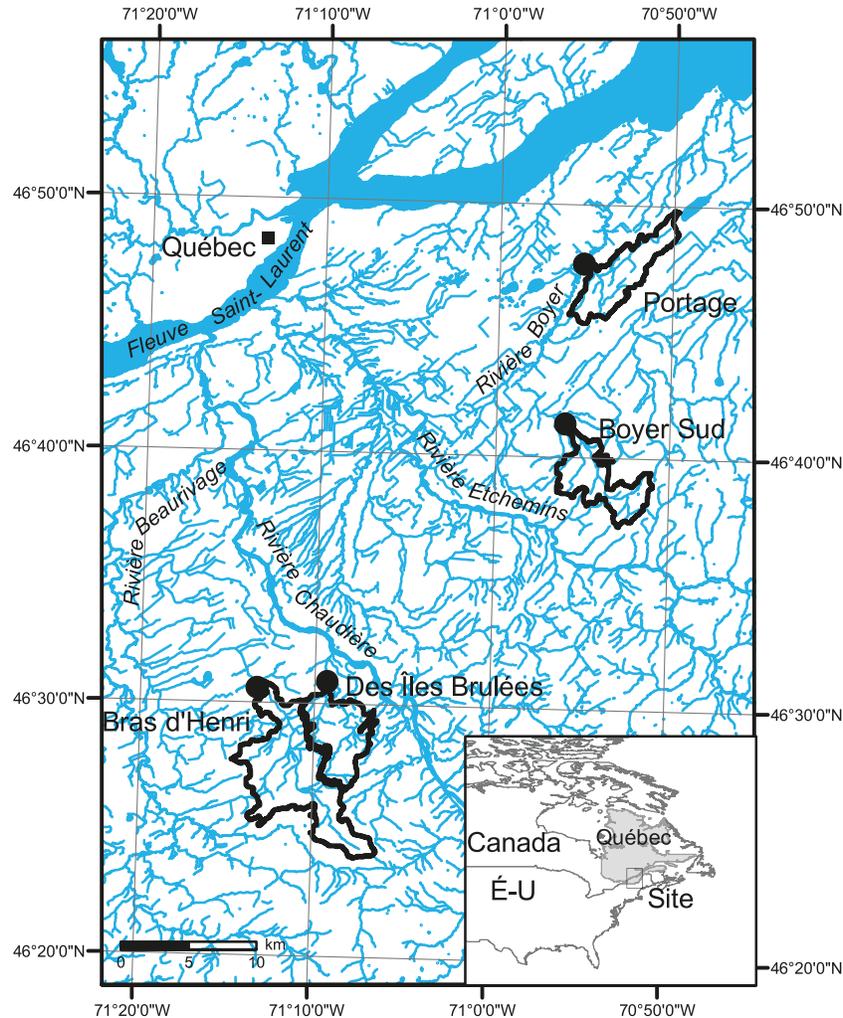
Des bassins versants étudiés (fig. 1), les bassins versants Portage (21,41 km², 46°47'34,0"N; 70°54'42,0"O) et Boyer Sud (20,62 km², 46°41'13,2"N; 70°55'51,6"O) sont des affluents de la rivière Boyer. Pour leur part, les eaux du bassin versant Bras d'Henri (49,13 km², 46°30'28,8"N; 71°12'54,0"O) rejoignent la rivière Beauvillage avant de venir alimenter la rivière Chaudière, et celles Des Iles Brulées (23,14 km², 46°30'28,4"N; 71°9'10,4"O) se jettent directement dans la rivière Chaudière. Ces écoulements de surface rejoignent le fleuve Saint-Laurent à la hauteur des municipalités de Saint-Michel (Boyer) et de Saint-Romuald (Chaudière).

Le bassin versant Portage est localisé dans la région physiographique des basses-terres du Saint-Laurent dans le secteur des hautes-terrasses du Saint-Laurent (60–180 m), tandis que le bassin versant de la Boyer Sud est situé dans la zone de transition entre cette dernière région physiographique et la région des Appalaches dans le secteur des basses et moyennes collines des Appalaches orientales (180–500 m) (Lamontagne et Nolin 1997a). Les bassins versants Bras d'Henri et des Iles Brulées sont situés dans la région des Appalaches dans le secteur des basses et moyennes collines des Appalaches orientales (180–500 m). La distribution des élévations exprimées en référence au niveau moyen de la mer à l'intérieur des bassins versants est illustrée à la figure 2.

Les occupations du territoire pâturage, forêts et agriculture dominent le territoire de chacun des bassins versants à l'étude (tableau 1). Les principales séries de sols de ces bassins versants varient selon l'aire occupée, la texture de la couche de surface, les propriétés de drainage, le mode de déposition et le modelé (tableau 2). Une description complète des principales séries de sols est donnée dans les études pédologiques du comté de Beauce (Ouellet et al. 1995), des comtés de Bellechasse et de Montmagny (Marcoux 1966), du comté de Dorchester (Pageau 1976) et du comté de Lotbinière (Baril et Rochefort 1957).

Ces quatre bassins versants situés en sol québécois ont servi au développement de la méthodologie de mise en place du modèle de qualité de l'eau SWAT. L'objectif poursuivi est de rendre ce protocole applicable sur la totalité du territoire canadien habité. À cet effet, un format unique des entrées requises au modèle SWAT est disponible à l'échelle du Canada pour le modèle numérique de terrain, le réseau hydrographique et la carte des sols. Aucune carte de l'occupation du territoire et de la classification correspondante n'existe à l'échelle canadienne. Il est donc requis de se tourner vers les produits offerts par les instances provinciales.

Dans un premier temps, il incombe de saisir l'implication de chacune des cartes requises à la mise en place du modèle de qualité de l'eau SWAT et les correspondances de ces dernières avec des bases de données. Dans un deuxième temps, il est requis de sélectionner des cartes, de définir une association cohérente avec les bases de données et de créer ces dernières au besoin.

Fig. 1. Localisation des bassins versants à l'étude.

Choix du modèle numérique de terrain (MNT)

Le choix d'un modèle numérique de terrain (MNT) est lié au niveau de détail associé. Un MNT est d'abord caractérisé par sa résolution, laquelle peut varier en direction ouest-est et présente en général une grille régulière comme SWAT le requiert.

Plusieurs études ont présenté des analyses de la variabilité de diverses propriétés géomorphologiques et de l'aire du bassin versant en soulignant toutefois la difficulté de généraliser ces résultats, ceux-ci étant notamment influencés par la climatologie, la taille du bassin versant et les caractéristiques physiques dominantes du bassin versant à l'étude (Yair et Raz-Yassif 2004; Chaplot 2005; Di Luzio et al. 2005; Hancock 2005; Shrestha et al. 2006). De plus, le choix de la résolution du MNT doit être cohérent avec les données d'entrée (réseau hydrographique numérisé, carte des sols et de l'occupation du territoire), ces cartes redéfinies sur la base de la résolution et la localisation des cellules du MNT.

Délimitation du bassin versant

SWAT utilise l'algorithme D8 de Jenson et Domingue (1988) pour la délimitation automatique des bassins versants à partir d'un MNT et d'un réseau hydrographique numérisé. Les étapes de la méthode sont : (i) le comblement des points

bas, (ii) l'évaluation des pentes, (iii) l'évaluation des directions d'écoulement, (iv) la création de la matrice d'écoulement, puis (v) l'extraction du réseau de drainage.

L'évaluation des directions d'écoulement de chacune des cellules du MNT permet d'identifier les lieux de convergence de l'eau et donc d'en extraire le réseau hydrographique. Pour ce faire, il s'agit, pour chaque cellule du MNT, de compter le nombre de cellules en amont qui y convergent, puis de choisir un nombre seuil nécessaire (A_s) à l'initiation d'une branche du réseau hydrographique. Plus ce nombre est faible, plus le réseau hydrographique est détaillé. Ce choix repose sur la comparaison du réseau hydrographique généré et du réseau hydrographique numérisé (Lin et al. 2006). Il dépend aussi du niveau de détails recherché par l'utilisateur dans la subdivision du bassin versant. À ce sujet, Tripathi et al. (2006) notent des variations importantes des simulations d'évapotranspiration, de la percolation et du contenu en eau des sols lorsque le schéma de discrétisation du bassin versant est raffiné, alors que les simulations annuelles du ruissellement de surface ne sont pas affectées.

L'utilisation d'un réseau hydrographique numérisé permet de creuser le MNT aux endroits où une branche du réseau est présente forçant l'algorithme D8 à le représenter. Diverses sources suggèrent fortement l'utilisation de cette infor-

Fig. 2. Distribution discrète (axe des Y de gauche) et cumulative (axe des Y de droite) des élévations discrètes pour les quatre bassins versants à l'étude. La ligne verticale en tirets donne l'élévation moyenne.

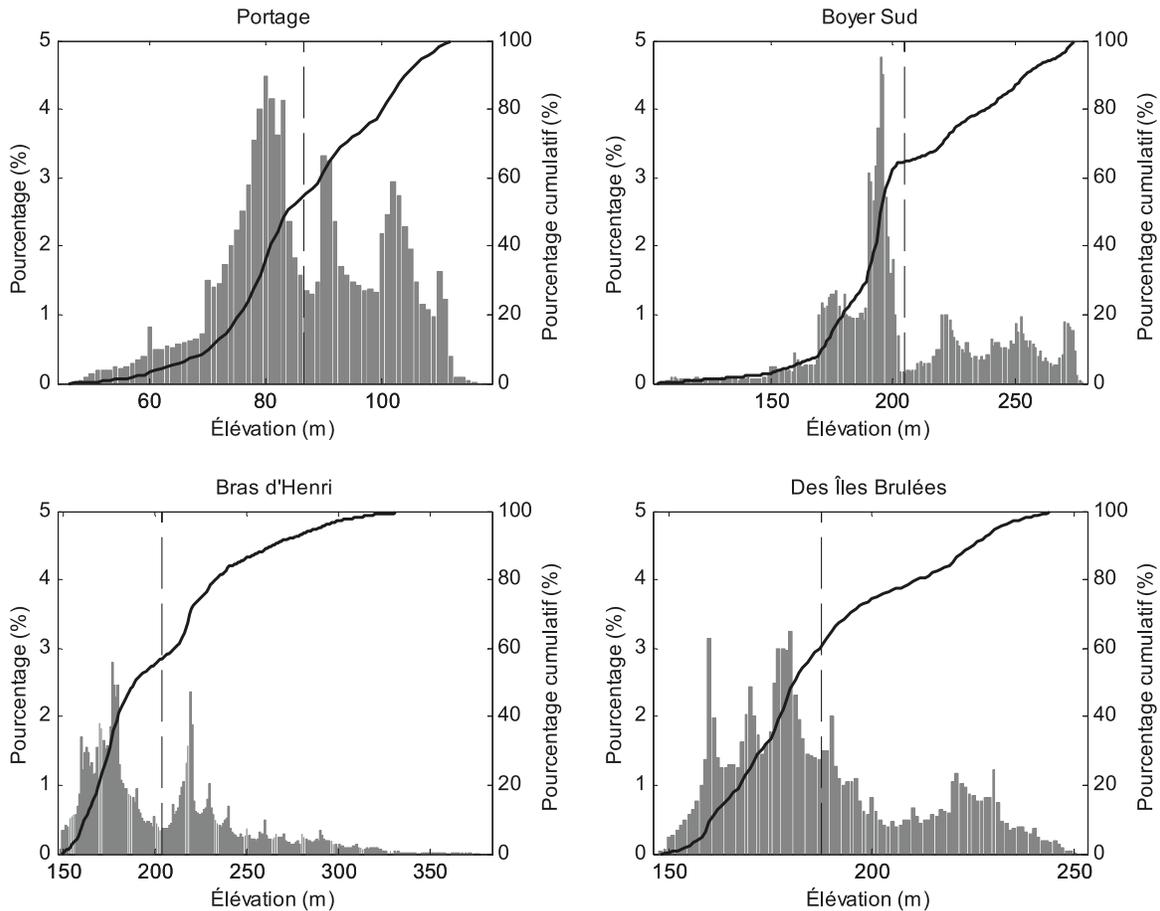


Tableau 1. Occupations du territoire dominantes sur les bassins versants.

Bassin	Pâturage (%)	Forêts (%)	Agricole (%)
Portage	27	42	16
Boyer Sud	35	23	38
Bras d'Henri	38	32	23
Des Îles Brulées	51	17	25

mation, afin d'améliorer la délimitation du bassin versant (Biesbrouck et al. 2002; Di Luzio et al. 2002; Renaud 2004; Srinivasan et al. 2004). L'inclusion ou non des branches du réseau hydrographique anthropique fait encore l'objet de débats. La présence de branches anthropiques a comme incidence de réduire le temps de montée de l'hydrogramme en plus d'augmenter le débit de pointe et le volume d'écoulement (Merot 2003). Il est suggéré d'inclure ces branches anthropiques. Dépendamment de la finalité du réseau hydrographique extrait recherchée, ces branches contribuent à représenter adéquatement les principaux cheminements de l'eau à l'intérieur du bassin versant. Pour vérifier l'adéquation entre le réseau hydrographique extrait et celui numérisé fourni en entrée, Lin et al. (2006) proposent un indice d'ajustement (F) évalué à partir de l'équation suivante :

$$[1] \quad F = \frac{\sum_{s=1}^{n_i} (L_i)_s + \sum_{s=1}^{n_r} (L_r)_s}{L_T}$$

où L_i est la longueur des n_i branches qui n'ont pas été représentées par le réseau hydrographique extrait, L_r est la longueur des n_r branches extraites superflues par rapport au réseau hydrographique numérisé et L_T est la longueur totale des branches du réseau hydrographique numérisé. Une adéquation parfaite entre le réseau extrait et celui fourni en entrée n'est toutefois pas possible, puisque chaque branche du réseau hydrographique possède une valeur unique du nombre seuil nécessaire (A_s) à l'initiation d'une branche du réseau hydrographique.

Pour délimiter le bassin versant, l'utilisateur identifie l'emplacement de l'exutoire. L'algorithme D8 procède alors de l'amont vers l'aval, en incluant les cellules qui convergent vers l'exutoire selon la matrice des directions d'écoulement.

Caractérisation de l'occupation du territoire

Les étapes nécessaires à la caractérisation de l'occupation du territoire sont dans l'ordre : (i) l'obtention d'une carte d'occupations du territoire et sa classification, (ii) la liaison de cette classification à la classification de SWAT et, finalement, (iii) l'ajout au besoin d'un ou de plusieurs types d'oc-

Tableau 2. Principales séries de sols sur les bassins versants à l'étude.

Principales séries de sols	Code SIS-Can ^a	Texture de la couche de surface	Classe de drainage ^b	Mode de déposition	Modèle de terrain ^{b, c}	Aire occupée selon le site
Beaurivage	BRV	Loam sableux graveleux	Bien à très rapidement	Fluviatile	Plat	[1] BH : 22 %; [2] IB : 20 %
Des Originaux	DGX	Loam à loam sableux très fin	Modérément bien	Alluvion	Vallonné	[4] IB : 7 %
Des Pins	DSP	Loam sableux pierreux	Imparfaitement	Till	Ondulé	[5] BH : 7 %
Dessaint	DSS	Loam sableux pierreux	Imparfaitement à mal	Till	Ondulé	[4] BS : 7 %
Dosquet	DQT	Loam sableux pierreux	Bien	Till	Vallonné	[2] BH : 16 %; [1] IB : 32 %
Du Creux	DUX	Loam	Imparfaitement	Fluvio-lacustre	Plat	[3] BS : 14 %
Leeds	LED	Loam pierreux	Bien	Till	Vallonné	[3] BH : 14 %
Mawcook	MWO	Loam sableux pierreux	Mal	Till	Plat	[3] RP : 8 %; [4] BH : 9 %
Neubois	NUB	Loam à loam sableux	Modérément bien	Fluvio-lacustre sur lacustre	Vallonné	[3] IB : 10 %
Rivière-du-Loup	RVO	Loam sableux graveleux	Bien	Till	Ondulé	[1] BS : 57 %
Saint-André	SDR	Loam sableux graveleux	Bien à très rapidement	Marin	Incliné	[2] RP : 29 %; [2] BS : 19 %
Saint-Nicolas	SCS	Loam graveleux	Bien à très rapidement	Sol résiduel	Incliné	[1] RP : 39 %

^aNota : RP, Portage; BS, Boyer Sud; BH, Bras d'Henri; et IB, Des Îles Brulées. Le nombre entre crochets donne l'importance de la série de sols pour un site donné.

^bVoir Day et McMenamin (1983).

^cTiré de Lamontagne et Nolin (1997b).

^dModèle : Description du terrain en tenant compte de la forme de la pente, du pourcentage de déclivité et de sa longueur.

cupations du territoire à la base de données de SWAT. Les paramètres dictant les propriétés influençant le ruissellement de surface et l'occupation du territoire sont définis, pour un nombre important de classes d'occupations du territoire, dans une base de données incluse dans SWAT. Au besoin, l'utilisateur peut ajouter une occupation du territoire et les nombreux paramètres inhérents à la caractérisation de cette dernière.

Caractérisation des sols et de leurs propriétés

Le point de départ de la caractérisation de la pédologie est une carte des sols du bassin versant. Dans un deuxième temps, chaque unité cartographique de sols est associée à un type de sols (unité simple) ou à plusieurs types de sols (unité composée). Pour les types de sol retenus, il est nécessaire de définir des propriétés du profil et celles spécifiques à chaque horizon.

La caractérisation des sols intervient à différents niveaux. Le tableau 3 présente l'ensemble des propriétés morphologiques et physico-chimiques à définir pour chaque couche de chaque type de sols. Parmi les propriétés des sols, le groupe hydrologique (Soil Survey Staff 2001) influence le ruissellement de surface, alors que la profondeur maximale de la zone exploitable des racines influence la croissance de la plante.

Agrégation des diverses cartes

L'utilisation de cartes d'occupations du territoire et de sols de résolution plus grossière que la résolution du MNT limite la perte d'informations contenues dans ces cartes (Shrestha et al. 2006). Dans ce cas, l'information plus grossière est redistribuée en relation avec la résolution plus fine du MNT. Une information cartographique plus grossière ne permet pas de prendre en compte les spécificités de la classification de l'occupation du territoire et des types de sols présents dans le bassin versant. Il apparaît valable, sinon plus judicieux, de viser l'utilisation de cartes d'occupations du territoire et de sols de résolutions plus fines que celle du MNT.

L'influence de l'échelle et (ou) de la résolution des cartes à fournir en entrée sur les prédictions des volumes et de la qualité de l'eau a été évaluée par Chaplot (2005) et par Di Luzio et al. (2005). Chaplot (2005) a montré que les simulations du ruissellement sont peu affectées lorsque la résolution du MNT est plus grossière, alors que les simulations de flux de sédiments et NO₃-N sont substantiellement affectées. Une carte de sols d'échelle plus fine (1 : 25 000) a permis l'obtention de simulations de ruissellement, de sédiments et de NO₃-N plus précises que lorsqu'une échelle plus grossière (1 : 250 000 ou 1 : 500 000) était utilisée. À petite échelle, Di Luzio et al. 2005 ont montré que l'utilisation d'un MNT plus grossier affecte les résultats de la délimitation du bassin versant influençant ainsi fortement les simulations de ruissellement et de sédiments. L'utilisation de cartes d'occupations du territoire moins détaillées conduit à des variations significatives des simulations de ruissellement et de sédiments, alors que l'utilisation de cartes de sols moins détaillées n'a pas montré d'influences importantes sur les simulations SWAT. Tester tous les schémas de discrétisation spatiale possibles obtenus de combinaisons de MNT, carte d'occupations du territoire et de sols avec des résolutions di-

Tableau 3. Propriétés morphologiques et physico-chimiques par couches ou horizons de profils sols.

Paramètre	Description	Unité	Processus
SOL_Z	Profondeur de la fin de la couche	mm	Hydrologie
SOL_BD	Masse volumique apparente	g·cm ⁻³	Hydrologie
SOL_AWC	Quantité d'eau disponible pour les plantes ^a	mm H ₂ O·mm ⁻¹ sol	Hydrologie
SOL_K	Conductivité hydraulique à saturation	mm·h ⁻¹	Hydrologie
SOL_CBN	Teneur en carbone organique	% du poids du sol	Chimique
CLAY	Teneur en argile	% du poids du sol	Sédiments
SILT	Teneur en limon	% du poids du sol	Sédiments
SAND	Teneur en sable	% du poids du sol	Sédiments
ROCK	Teneur en fragments grossiers (>2 mm)	% du poids total	Sédiments
SOL_ALB	Albedo du sol humide	—	Hydrologie
USLE_K	Facteur d'érodabilité du sol USLE	0,013 t m ² ·h m ⁻³ ·tonne métrique·cm ⁻¹	Sédiments
SOL_EC	Conductivité électrique	dS·m ⁻¹	Physico-chimique

^aDifférence entre la capacité au champ (KP33) et le point de flétrissement (KP1500).

verses demeure une tâche fastidieuse et ne permet pas de généraliser les conclusions obtenues sur un bassin versant. Romanowicz et al. (2005) ont d'ailleurs noté le manque d'analyse de la robustesse, la sensibilité et la validation de ce modèle à différents schémas de discrétisation spatiale.

Recommandations quant aux choix des cartes

La documentation de SWAT ne fait pas explicitement de recommandations quant au choix du MNT, de la carte d'occupations du territoire et de la carte pédologique à utiliser (Srinivasan et al. 2004; Di Luzio et al. 2005). Idéalement, la résolution du MNT recherchée devrait permettre de représenter de manière pertinente les fonctions d'écoulement et la forme du bassin versant à l'étude. Hancock (2005) recommande d'utiliser une résolution plus fine que la longueur moyenne des versants, critère difficilement applicable. L'information topographique sert à la délimitation du bassin versant et de ces sous-bassins, à la caractérisation du réseau de drainage et à l'attribution d'une pente moyenne d'écoulement à chaque sous-bassin et URH caractérisant la réponse hydrologique du bassin. Le niveau de finalité de l'information topographique disponible ne permet pas de caractériser adéquatement la pente d'écoulement de la URH, cette dernière étant généralement prise équivalente à celle du sous-bassin qui la contient. Dans le cas où les objectifs de modélisation nécessitent une représentation précise de la pente d'écoulement des URH, celles-ci devront être obtenues à partir d'informations topographiques plus fines développées spécifiquement sur le secteur à l'étude.

Il va de soi qu'il est préférable d'obtenir une carte d'occupations du territoire dont la classification correspond à celle adoptée pour SWAT. De même, il est judicieux d'obtenir une carte pédologique qui permet d'associer un type de sol à des unités cartographiques au niveau de détails requis.

Découpage du bassin et des sous-bassins en unités de réponse hydrologique (URH)

Les types d'occupations du territoire et les types de sols dominants contrôlent la réponse du bassin versant. Il est donc judicieux d'inclure uniquement ceux-ci lors de la distribution des URH. En procédant ainsi, l'interprétation des résultats est facilitée, et le temps de simulation est considérablement réduit. Pour ce faire, deux paramètres doivent être

fournis, soit un pourcentage d'occupations du territoire seuil (pctSeuilTerre) et un pourcentage de sol seuil (pctSeuilSol). À l'intérieur d'un sous-bassin, les occupations du territoire sous le pourcentage seuil d'occupations pctSeuilTerre sont négligées, puis l'aire laissée vacante est redistribuée au prorata des proportions des occupations du territoire conservées. Pour une occupation du territoire donnée, les types de sols occupant moins que le pourcentage seuil de sol pctSeuilSol sont à leur tour négligés, puis l'aire laissée vacante est comblée d'une façon similaire à l'aide des types de sols restants.

La distribution des URH a été effectuée en limitant à 10 le nombre de URH par sous-bassin, tel que suggéré dans Neitsch et al. (2005b). Une subdivision plus fine du bassin versant accroît, si jugé nécessaire, la complexité de la modélisation. Cette règle de bonne pratique permet de minimiser les effets négatifs de l'agrégation des contributions de chaque URH au bilan en eau, en sédiments et en nutriments à l'intérieur d'un sous-bassin, les URH ne communiquant pas entre elles.

Mise en place du protocole expérimental du modèle « soil water assessment tool » (SWAT)

Choix de la carte du modèle numérique de terrain

La principale contrainte à l'application de SWAT est la disponibilité des données émises par les organismes provinciaux et fédéraux. Parmi les MNT recensés, les données numériques d'élévation du Canada à l'échelle 1 : 50 000 se démarquent notamment par l'étendue de la couverture cartographique offerte, la méthodologie de création similaire à celle du United States Geological Survey, des contrôles qualité assurant que l'écoulement de l'eau s'effectue correctement, une résolution acceptable et une distribution et un support gratuit en ligne. Une fois projetée à la latitude des bassins versants étudiés, la résolution du MNT est de 23,17 m. Pour la carte du réseau hydrographique numérisée, les deux options disponibles sont les réseaux hydrographiques issus de la base de données topographique du Québec (BDTQ) fournis à l'échelle 1 : 20 000 et ceux issus de la base nationale de données topographiques (BNDT) à l'échelle 1 : 50000. La carte de la BDTQ a été retenue, étant

Tableau 4. Correspondance des classes d'occupations du territoire.

N°	Classe de canards illimités		Classe SWAT « soil water assessment tool »	
	Principale	Secondaire	Code	Nom
1	Non classifié	Non classifié	NCLA	Non classifié
2	Eau non définie	Eau	WATR	Eau
3	Eau turbide	Eau	WATR	Eau
4	Urbain	Anthropique	URHD	Zone résidentielle – haute densité
			URMD	Zone résidentielle – moyenne densité
			URML	Zone résidentielle – moyenne à faible densité
			URLD	Zone résidentielle – faible densité
5	Route	Anthropique	UTRN	Transport
6	Autre sol nu : gravière, carrière, etc.	Anthropique	NDEF	Non défini
7	Autre : golf, parc, aéroport, lac industriel, piste de ski, etc.	Anthropique	NDEF	Non défini
8	Agricole non défini	Agricole	NDEF	Non défini
			AGRC	Terre agricole – céréale cultivée en lignes rapprochées
			AGRL	Terre agricole – générique ^a
			AGRR	Terre agricole – culture en rang ^b
9	Cultures pérennes	Agricole	CPER	Fourrages pérennes
10	Cultures annuelles	Agricole	AGRR	Terre agricole – culture en rang
11	Forêt non définie	Forêt	NDEF	Non défini
12	Feuillus	Forêt	FRSD	Forêt à feuillages caduques
13	Mélangés	Forêt	FRST	Forêts mélangées
14	Résineux	Forêt	FRSE	Forêt à feuillages persistants
15	Régénération	Forêt	REGE	Régénération
16	Humide non défini	Terres humides	NDEF	Non défini
17	Tourbière	Terres humides	WETN	Zone humide non boisée
18	Tourbière exploitée	Terres humides	NDEF	Non défini
19	Marais et prairie humide	Terres humides	WETN	Zone humide non boisée
20	Marécage	Terres humides	WETN	Zone humide non boisée
21	Herbier	Terres humides	WETL	Zone humide boisée et non boisée
22	Terre agricole inondée	Terres humides	NDEF	Non défini
23	Eau peu profonde	Terres humides	WATR	Eau
24	Coupe non définie	Coupe ou brûlis	NDEF	Non défini
25	Brûlis	Coupe ou brûlis	NDEF	Non défini

Nota : L'utilisateur sélectionne la classe la plus appropriée pour les classes 4 et 8 selon le secteur à l'étude.

^aMarque sémantique identifiant un terme qui englobe plusieurs espèces différentes (source AAC).

^bTechnique d'implantation de semis direct des céréales (source AAC).

plus complète, du fait de l'inclusion du réseau anthropique et naturel et de son caractère récent.

Choix de la carte d'occupations du territoire

Aucun des produits cartographiques des agences gouvernementales n'a permis de fournir une carte d'occupation du territoire. Il a été nécessaire de recourir à une carte produite par Canards Illimités Canada, un organisme de conservation privé sans but lucratif. Elle découle du traitement d'images Landsat-7. Cette carte possède une résolution de 25 m et couvre une importante bande riveraine aux abords du fleuve Saint-Laurent. Elle a été produite au cours de la période de 1999 à 2003 grâce à la participation des partenaires suivants : Service Canadien de la Faune, Faune Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, ministère de l'Agriculture des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ), Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC) et le Centre

Saint-Laurent. Le tableau 4 propose une association entre les classes définies par la carte d'occupations du territoire de Canards Illimités Canada et celles définies par SWAT. La classe générale CPER a été créée afin de définir les cultures pérennes. En première approximation, les paramètres de la classe d'occupation du territoire pâturage ont été associés à cette classe. Lors de la définition des pratiques culturales, le tableau 5 permet de lier une culture à une typologie (tableau 4). À cette étape-ci, des informations additionnelles sur l'occupation du sol est disponible auprès de la MAPAQ via le programme GIRMA et de La Financière.

L'ajout de la classe régénération (REGE) a été nécessaire, puisque ce type d'occupation du territoire occupait une forte proportion du territoire des bassins versants. Cette classe d'occupation du territoire correspond à des zones de renouvellement naturel ou de renouvellement artificiel d'un peuplement forestier. Les portions de territoire où

Tableau 5. Cultures associées aux classes agricoles plus générales de la classification québécoise.

Classe	Type	Exemple
Cultures pérennes	—	Les pâturages, le foin, le brome, les « grass », les gazons et les trèfles
Cultures annuelles	Grandes cultures	Céréales (blé, seigle, mil, avoine, orge, lin, chiendent, luzerne, canola) Grains (maïs, soya, sorgho, pois, lentilles)
	Cultures maraîchères	Tous les petits fruits et légumes
	Autres	Patates et tournesol

Tableau 6. Combinaison possible et pourcentage d'occupations des noms de sols à l'intérieur du polygone.

Nombre de noms de sol dans le polygone	Pourcentage occupé par chaque nom de sols à l'intérieur du polygone			
	Sol1	Sol2	Sol3	Sol4
1	100	NA	NA	NA
2	60	40	NA	NA
3	50	30	20	NA
4	40	30	20	10

Nota : NA, ne s'applique pas.

l'interprétation des images Landsat-7 n'a pas permis de définir l'occupation du territoire ont été associées à la classe « non classifié » (NCLA). Par ailleurs, les occupations du territoire, dont l'association n'était pas directe avec une classe prédéfinie dans la base de données de SWAT, ont été regroupées sous la classe « non défini » (NDEF). Pour les quatre bassins versants, la classe non défini représente entre 0,96 % à 2,80 % de la superficie totale du bassin versant et couvre entre 0 % et 4,15 % de la superficie des sous-bassins. Cette association a peu de répercussions, puisque ces faibles superficies sont négligées à l'étape de la distribution des URH. Cette association n'est pas statique en ce sens que des classes de la base de données québécoise associées à la classe NDEF doivent être définies si le fait de les négliger rend impossible une distribution des URH jugée acceptable.

Certains des paramètres présents dans la base de données de SWAT influencent l'hydrologie, la croissance du type d'occupation du territoire et la caractérisation de la qualité des eaux (p. ex. : sédiments, phosphore, nitrite et nitrate, etc.). Une analyse détaillée de chacune de ces fonctions du modèle SWAT permettrait de valider la pertinence des paramètres présents dans la base de données de SWAT pour les classes canadiennes.

Choix de la carte des sols

La couverture pédologique en format numérique à l'échelle du 1 : 20 000 produite par l'Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement (IRDA) permet l'accès à l'ensemble des cartes de sols du Québec habité. Ces cartes sont le fruit de l'uniformisation et de la compilation de plus de 50 études pédologiques réalisées de 1943 à 2005 par des équipes fédérales (AAC) et provinciales (MAPAQ, IRDA). La couverture pédologique est fournie à l'échelle 1 : 20 000, bien que la donnée de sols d'origine utilisée pour produire ces cartes provient de cartographie

des sols effectuée à différentes échelles (1 : 126 720, 1 : 63 360, 1 : 50 000, 1 : 40 000 ou 1 : 20 000).

La couverture spatiale présente des unités cartographiques de sols délimitées sur la carte par des polygones. Un polygone peut être désigné par un seul nom de sols (c.-à-d. séries de sols, types de terrain et non-sols), ou par une séquence de plusieurs noms de sols (maximum quatre); ces noms sont alors inscrits dans le polygone en ordre suivant leur dominance décroissante (tableau 6).

Le nom de sols défini par la série de sols est une classe conceptuelle qui repose sur la généralisation des propriétés d'un grand nombre de pédons observés au champ et possède donc des limites déterminées (CSSC 2002). Elles constituent le niveau hiérarchique le plus détaillé du système de taxonomie des sols canadien : (i) ordre, (ii) grand groupe, (iii) famille et (iv) série de sols (CSSC 2002). Sur les feuillets numériques de sols, chacune des séries de sols, des types de terrain (i.e., ravins) ou des non sols (c.-à-d. affleurement rocheux) a été désignée par un code de trois lettres unique suivant le Système d'information sur les sols du Canada (SISCan) (Day et McMenamin 1983). Au milieu des années 1990, Lamontagne et Nolin (1997b) répertoriaient 531 noms de sols sur le territoire cartographié de la province de Québec, dont 518 désignaient des séries de sols, et le reste étaient soit des complexes de sols ou des types de terrain. En 2007, ce nombre de séries de sols cartographiées et reconnues atteint un total de 692.

Le niveau d'information fourni par la série de sols a été jugé satisfaisant pour servir de base à la création d'une base de données définissant les propriétés des profils types à fournir en entrée à SWAT. De plus, plusieurs propriétés morphologiques et physico-chimiques à définir pour chaque couche ou horizon des profils types étaient colligés sur la base de cette classification dans divers rapports pédologiques, ce qui facilitait grandement le travail de création de la base de données des sols.

L'ensemble des séries de sols et autres types de terrain présents à l'intérieur du bassin versant a été repéré, identifié, dénombré puis classifié selon leur importance en terme de superficie couverte. À cette étape, les séries de sols parfois avec leurs phases (c.-à-d. phase lithique mince) ont été identifiés. Pour chacune des séries de sols retenues, il a été nécessaire de déterminer la profondeur des différentes couches de références qui les composent. À défaut d'avoir une description pédologique des sols très détaillée, il a été choisi d'opter pour une description synthétique ou généralisée. Celle-ci se résume à la description de quatre couches de références soit : la couche de surface (horizon Ap d'un profil cultivé ou les horizons L-F-H, Ah, Ahe ou Ae d'un profil

Tableau 7. Sources des informations priorisées pour la création de la base de données des sols par profils types et couche ou horizons de sol.

Paramètre	[1] ID	[2] EP	[3] R_QC	[4] VT	[5] FPT	[6] VD
SOL_Z	X	X				
SOL_BD	X			X		
SOL_AWC			X			
SOL_K	X			X		
SOL_CBN	X ^a	X				
CLAY	X	X				
SILT	X	X				
SAND	X	X				
ROCK		X ^b				
SOL_ALB					X	
USLE_K			X	X	X	
SOL_EC						X

Nota : Voir le tableau 3, pour la description des paramètres. ID, inventaire de dégradation; EP, étude pédologique québécoise; R_QC, référence québécoise; VT, valeurs types (références multiples); FPT, fonction de pédo-transfert; et VD, valeur par défaut.

^aCette référence fournit le pourcentage de matière organique (MO). Pour convertir ce pourcentage de matière organique en pourcentage de carbone organique (SOL_CBN), la relation suivante a été utilisée : $SOL_CBN = MO/1,72$.

^bLorsque la description faisait mention que l'horizon était pierreux (ROCK entre 15 % et 35 %), très pierreux (ROCK entre 35 % et 60 %) ou extrêmement pierreux (ROCK entre 60 % et 80 %), le pourcentage était pris respectivement pour 25 %, 47,5 % et 70 %. Sinon, la valeur par défaut était 0.

forestier), les couches du sous-sol ou horizon génétique d'un sol (partie supérieure B1 et inférieure de l'horizon B2) et la couche du substratum (horizon C ou roche-mère d'origine du sol). Cette approche synthèse en quatre zones de référence peut s'appliquer à la fois à des profils cultivés ou forestiers. La zone 0–200 mm correspond à la couche de surface ou horizon Ap de sols cultivés, la zone 200–400 mm correspond à la partie supérieure du sous-sol ou l'horizon B1, la zone 400–600 mm correspond à la partie inférieure du sous-sol ou l'horizon B2. L'absence de données pour le substratum ou l'horizon couche au-delà de 600 mm dans les données d'inventaire a nécessité d'étendre les données physico-chimiques observées entre 400 et 600 mm jusqu'à 1 m (600–1000 mm). Suite à cette stratification du profil de sols, les différentes propriétés physico-chimiques de ces couches ont été définies en plus les propriétés générales du profil (c.-à-d. profondeur optimum, zone racinaire, etc.).

Profil des sols

Le tableau 7 présente en ordre de priorité les sources d'information qui ont été utilisées afin de définir le profil de sols et les différentes propriétés physico-chimiques menant à la création de la base de données sur les propriétés de sols. En premier lieu, le choix de l'information s'est porté sur les séries de sols ayant fait l'objet d'une caractérisation au cours du programme de l'Inventaire des problèmes de dégradation des sols du Québec (Tabi et al. 1990) réalisée pendant la période 1987 à 1990. Cette source de référence a été utilisée pour définir l'essentiel des propriétés attribuées à chaque couche, en retenant comme référentiel les paramètres physico-chimiques du profil de sols échantillonnés sous prairie. Dans les régions où une agriculture monoculture intensive est pratiquée, il est suggéré d'utiliser les paramètres physico-chimiques du profil de sols sous culture. Lors de cette vaste étude, les séries de sols ont été caractérisées par des échantillons pris sur le terrain en subdivisant la couche

superficielle du profil de sols en deux couches (0–200 mm et 200–400 mm) pour les sols à granulométrie grossière et ceux issus de dépôts de tills glaciaires ou en trois couches (0–200 mm, 200–400 mm et 400–600 mm) pour les autres.

Pour les séries de sols n'ayant pas été incluses dans cet inventaire et afin de compléter la base de données, il a été nécessaire d'utiliser les informations analytiques contenues dans les études pédologiques régionales (c.-à-d. comtés) en lien avec le secteur à l'étude. Ces études pédologiques subdivisent sur le plan vertical les séries de sols en différents horizons pédogénétiques, et pour chacune d'elle des informations sont fournies sur la composition du sol (pourcentage d'argile, de limon, de sable et de carbone organique), ce qui inclut une description qualitative de la présence de fragments grossiers. La profondeur du profil de sols caractérisé par les pédologues circonscrit normalement le premier mètre et est communément appelé la coupe témoin (CSSC 2002). C'est par ailleurs à ce premier mètre pédologique de référence et de profondeur qu'il a été décidé de limiter la caractérisation des profils de sols. Ce choix demeure arbitraire, tel que reconnu par Knisel (1980) dans la documentation du modèle CREAMS, de laquelle SWAT a emprunté la majeure partie de ses fonctions hydrologiques. Cependant, par souci de simplicité dans la description des profils de sols, l'essentiel de l'information pédologique disponible se limitant au premier mètre et du fait que près de 99 % de la plupart des polluants sont emmagasinés sous forme particulières dans les sédiments de la couche superficielle de sol (Novotny 2003), ce choix demeure acceptable.

Il en va de même pour ce qui est de la redistribution de l'eau dans le sol et des processus d'évapotranspiration qui sont généralement concentrés dans la couche superficielle de la pédosphère. La seule exception à la règle précédente a été la considération des phases lithologiques minces de sols, attribution donnée aux séries de sols dont le roc solide se trouve à une profondeur entre 500 et 1000 mm. Pour ces

cas, la profondeur limite du profil de sols a été décrite comme étant 750 mm.

Propriétés des sols

La quantité d'eau disponible a été définie à partir de Nolin et Lamontagne (1986) alors que le facteur d'érodabilité a été défini à partir de Bernard (1996) lorsque la série de sols était incluse puis convertie dans les unités appropriées suivant les travaux de Foster et al. (1981). Les valeurs de facteur d'érodabilité proposées dans Shelton et al. (1990) ont également été pris en considération. Le tableau 8 présente l'ordre de priorisation des références utilisées pour compléter la caractérisation des couches ou horizons de sols dans la base de données de sols. La plupart de ces références se basent sur la classe de texture des couches ou horizons de sols pour proposer des valeurs par défaut des différentes propriétés physico-chimiques.

L'évaluation de l'albédo humide du sol a posé un problème, ce paramètre n'étant pas systématiquement mesuré au Canada. Il a donc été nécessaire d'évaluer l'albedo à l'aide d'une fonction de pédo-transfert recommandée dans la documentation technique du USDA (Soil Survey Staff 2001) et élaborée à partir des travaux de Post et al. (2000). Cette relation lie l'albédo à la luminosité de la couleur de l'horizon humide à partir de :

$$[2] \quad \text{albédo} = 0,069 \times (\text{luminosité}) - 0,114$$

La luminosité est définie sur la base de la notation Munsell (1941) utilisée dans les études pédologiques entre autres pour décrire la couleur humide de l'horizon de surface des sols agricoles ou forestiers.

Une valeur par défaut de conductivité électrique de $0,5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ a été appliquée à l'ensemble des couches de sols à l'exception des horizons désignés (CSSC 2002) par Ap (couche de labour) et ceux désignés par le suffixe k (présences de carbonates), pour lesquels la conductivité électrique a été établie à $1,0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ (LPAP 2007).

Chaque profil de sols représentant une série de sols s'est vu attribué un nom de trois lettres référant au site à l'étude suivi d'un code numérique et un groupe hydrologique lui a été attribué suivant le MTQ (2004). La profondeur maximale de la zone d'extension des racines a été établie suivant la plus ou moins forte compacité attribuable à l'horizon C de la série de sols. Pour les séries de sols dont la compacité de l'horizon C était trop élevée (c.-à-d. till compact avec densité apparente $>1,80 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) pour permettre le développement des racines, la profondeur maximale de la zone des racines a été fixée à la profondeur du début de cet horizon, alors que si la compacité de l'horizon C était moindre, la profondeur maximale de la zone des racines a été prise comme équivalente à la profondeur du profil de sols, soit 1 m. Par souci de simplification, il n'y a pas eu de distinction des types d'occupation du territoire, à savoir d'étendre la profondeur maximale de la zone des racines lorsque le sol est en zone forestière comme observé normalement. De façon générale, ce paramètre n'est pas très sensible pour un sol agricole, les routines du réservoir sol responsable de la redistribution de l'eau d'infiltration étant en mesure de compenser une surestimation ou une sous-estimation de la demande en eau (Saxton et Willey 2006).

Tableau 8. Références complémentaires pour la caractérisation physico-chimique des couches ou horizons minéraux des profils de sols.

Type	SOL_BD	SOL_K	USLE_K	Référence
VT	1	NA	NA	(Lamontagne 1997)
VT	2	1	NA	(Liang 2002)
VT	3	2	1	(van Griensven 2002)
VT	4	3	NA	(Schroeder et al. 1994)
FPT	NA	NA	2	(Williams 1995)
FPT	5	4	3	(Saxton et Rawls 2006)

Nota : VT, valeurs types (références multiples); FPT, fonction de pédo-transfert; NA, ne s'applique pas.

Des fentes de retrait se formant dans les sols présentant des propriétés vertiques réduisent le ruissellement rapide de surface en servant de chemins préférentiels verticaux pour venir recharger l'aquifère. Ces sols principalement de granulométrie argileuse ($>35\%$ d'argile) ont la propriété de rétrécir lorsqu'ils sont secs et de gonfler lorsqu'ils sont humides. SWAT permet d'effectuer le suivi du volume des fentes de retrait puis la modification du cheminement de l'eau en conséquence pour les URH dont le type de sol possède des propriétés vertiques. Pour ce faire, il est nécessaire de définir la fraction du volume maximum possible de fente de retrait par rapport au volume total du sol. La présence de vertisols au Québec est à toute fin pratique improbable, cependant il n'est pas impossible que certains types de sols présentent des propriétés vertiques dans des régions spécifiques et sous des conditions climatiques particulières (Lamontagne et Cossette 1994). Dans le cas de la présente modélisation, tous les types de sols ont été considérés comme ne présentant pas de propriétés vertiques.

Le traitement de certains cas particuliers de non-sols s'est effectué comme suit : aucune possibilité d'infiltration n'a été permise pour les affleurements rocheux. Le non-sol désignant l'eau a été négligé à l'étape de la distribution des URH, car il apparaissait en faible proportion dans les bassins versants étudiés. Par contre, les propriétés physiques de certains types de terrain, désignant des îles ou des alluvions non différenciées ont été dérivées de séries de sols définies à l'intérieur du bassin versant, en accord avec leur proximité physique et potentiel de similarité avec ces types de terrain.

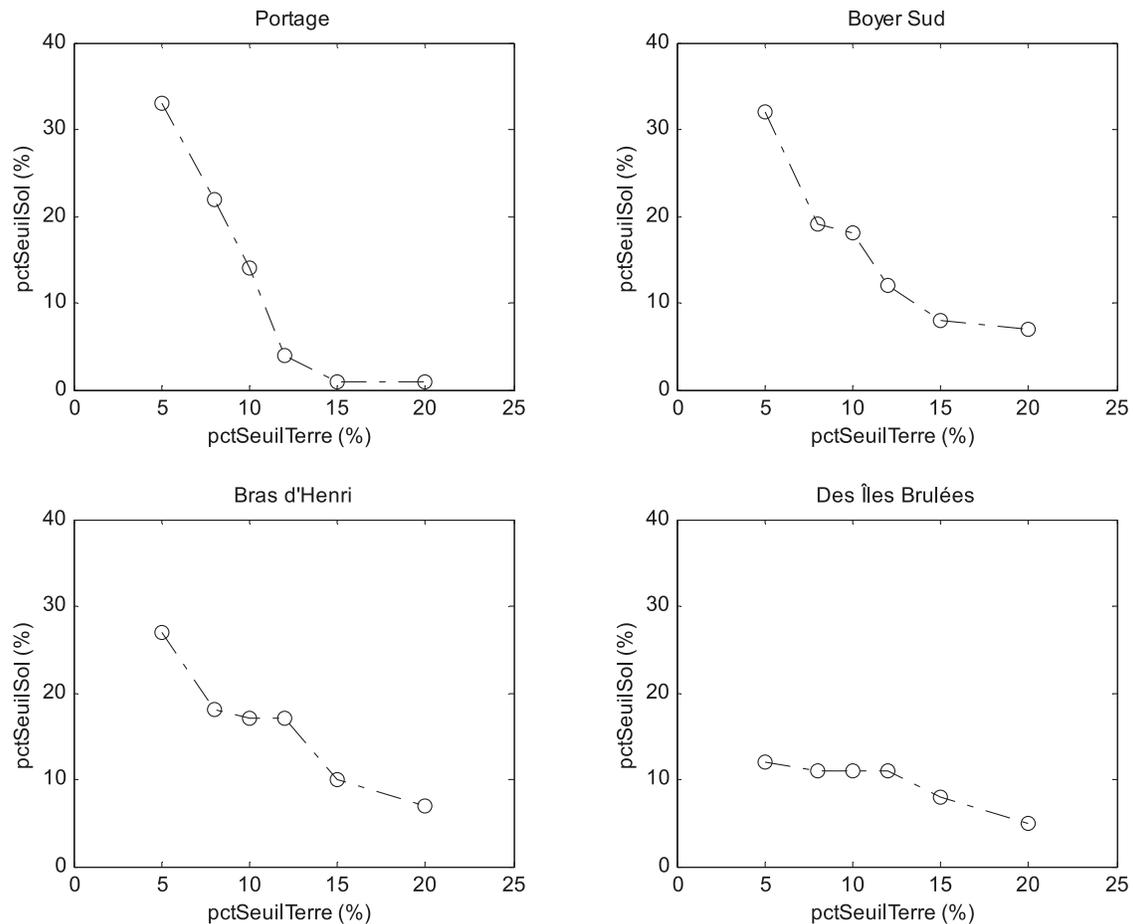
Les sols organiques sont désignés par des types de terrain sous le nom de terres noires bien décomposées et moyennement décomposées, ces derniers sont aussi appelés sols tourbeux. La première catégorie a été associée à une couche de surface composée de matériau humique (horizon Oh) (CSSC 2002). La plupart de ces terres noires reposaient sur une phase minérale dont la texture était spécifiée (p. ex. : sable, argile, etc.). Les séries de sols présentant les mêmes propriétés granulométriques étaient alors considérées pour compléter la base de données de ces profils de sols organiques pour les profondeurs de 400 à 1000 mm, alors qu'un horizon Oh avec ses propriétés physico-chimiques était défini pour la couche superficielle (0–400 mm). Les sols tourbeux, quant à eux, possédaient des couches organiques profondes ($>1 \text{ m}$) composées de matériau mésique (horizon Om). Le

Tableau 9. Références complémentaires pour la caractérisation physico-chimique des couches ou horizons organiques des profils de sols.

Paramètre	OH	OM	OF	Référence
SOL_BD	0,30	0,25	0,10	(Nolin et Lamontagne 1986; CSSC 2002)
SOL_AWC ^a	0,13	0,17	0,31	(Nolin et Lamontagne 1986; CSSC 2002)
SOL_K	1	30	60	(CSSC 2002)
SOL_CBN	30	40	50	(CSSC 2002)
USLE_K	0,05	0,05	0,05	(Van Vliet 1989)

Nota : Les unités des propriétés sont les mêmes que celles explicitées au tableau 3.

^aEn faisant l'hypothèse que la teneur en fragments grossiers est nulle.

Fig. 3. Différents couples pctSeuilTerre pctSeuilSol permettant l'obtention d'au plus 10 unités de réponse hydrologique (URH) par sous-bassin.

type de terrain désignant des marécages a été considéré comme étant constitué d'une couche de surface (0–400 mm) peu décomposée (horizon Of) composée de matériaux fibriques reposant sur une phase minérale définie aussi selon la similarité de la granulométrie associée à des sols similaires présents à l'intérieur du bassin versant et situé à proximité de ces marécages. Une fois ces associations effectuées, il a été nécessaire d'attribuer les propriétés physiques de sols à chacun de ces horizons organiques, lesquels sont regroupés au tableau 9. Il est bien de spécifier que le traitement des cas particuliers se limite à ceux rencontrés dans le présent exercice de modélisation.

À cette étape-ci, il est pertinent de réviser l'essentiel des profils de sols ayant fait l'objet d'une caractérisation pour limiter les incongruités entre les valeurs de propriétés sélectionnées des diverses couches ou horizons de sols. Pour ce faire, il est fortement conseillé de faire appel à des pédologues.

Étant donné les limites de la carte des sols, il a été décidé de considérer uniquement la série de sols dominante pour un polygone donné. Faire la moyenne de propriétés de toutes les séries de sols (1 à 4) contenues à l'intérieur d'une unité cartographique demeure difficile et peut mener à des aberrations. D'autre part, l'influence de l'agrégation des propriétés

dont la caractérisation se limite à la couche superficielle (p. ex., albédo du sol humide, facteur K d'érodabilité) mériterait d'être testée en utilisant une démarche similaire à celle adoptée dans Duchemin et al. (2001).

Sélection des valeurs seuils *pctSeuilTerre* et *pctSeuilSol*

Une fois la topographie, l'occupation du territoire et la pédologie analysées, il est nécessaire de fixer les valeurs seuil *pctSeuilTerre* et *pctSeuilSol* responsables de la subdivision du bassin versant en unités de réponse hydrologique (URH).

En pratique, plusieurs couples *pctSeuilTerre* *pctSeuilSol* permettent de limiter le nombre d'URH à 10 par sous-bassin, tout en produisant un nombre total d'URH relativement similaire. À titre d'exemple pour le bassin versant Portage, au plus 10 URH par sous-bassin sont obtenues pour une multitude de combinaisons *pctSeuilTerre* et *pctSeuilSol* comprise entre les cas limites (5 % à 33 %) et (20 % à 1 %). L'objectif visé peut donc être atteint en conservant la presque totalité des type d'occupation du territoire dominants à l'intérieur des sous-bassins (valeur faible de *pctSeuilTerre*) et en négligeant les types de sol couvrant une forte proportion des types d'occupation du territoire conservés (valeur élevée de *pctSeuilSol*). À l'opposé, le fait de négliger les types d'occupation du territoire couvrant une superficie importante des sous-bassins (valeur élevée de *pctSeuilTerre*) et de conserver la presque totalité des types de sol (valeur faible de *pctSeuilSol*) permet également l'atteinte de cet objectif. Ceci est illustré à la figure 3 pour les quatre bassins versants. Un compromis doit être effectué : sacrifier un certain niveau de détail dans la représentation des occupations du territoire ou dans celle des types de sols.

Les critères permettant de juger si la distribution des URH est acceptable en réponse à la négligence ou non de certaines classes dépendent largement des objectifs de modélisation poursuivis et demeurent en partie subjectifs. Dans la présente application, il a été choisi de conserver les occupations du territoire dominantes occupant au moins 10 % de la superficie d'un sous-bassin, puis de négliger les types de sol couvrant au plus 14 % des types d'occupation du territoire conservés. À l'échelle du bassin versant, cette manière de faire a permis de conserver à la fois les occupations du territoire et les types de sol dominants.

Conclusion

Les présents travaux ont permis de proposer une méthodologie largement transférable d'adaptation des données physiographiques canadiennes et québécoises pour le modèle de qualité des eaux SWAT. Les données numériques d'élévation du Canada à l'échelle 1 : 50 000 et les réseaux hydrographiques numérisés de la BDTQ au 1 : 20 000 ont été retenus afin de délimiter les bassins versants. Pour caractériser le territoire, la carte d'occupations du territoire fournie par Canards Illimités Canada et la carte numérique des sols 1 : 20 000 fournie par l'IRDA ont été utilisées. Ces cartes ont été le point de départ respectivement d'une proposition d'association de classes communes d'occupation du territoire à la base de données de SWAT, puis de la définition de profils types de sols sur la base du concept taxonomique

de la série de sols avec leurs propriétés physico-chimiques individualisés suivant les horizons de sols.

Tester la sensibilité des sorties du modèle soumis à l'utilisation de cartes de diverses résolutions et (ou) à différents schémas de discrétisation ou échelle de perception du territoire est relativement fastidieux, difficilement transférable d'un site à l'autre sans permettre objectivement de proposer un agencement supérieur. Un effort important doit être consenti au départ de manière à fournir au modèle hydrologique les informations les plus pertinentes possibles. Il a été démontré par plusieurs, notamment par Andréassian et al. (2001) et Oudin et al. (2004), que ces modèles ont, par les nombreux paramètres qu'ils comportent, la capacité de s'adapter à l'information fournie en entrée. Toutefois, la pertinence des données d'entrée demeure incontournable (Kirchner 2006; Sidle 2006). Malgré tout, le choix d'un agencement demeure en partie subjectif. Enfin, la disponibilité des données et la précision des données seront toujours des facteurs limitants pour la modélisation.

Le Service national d'information sur les terres et les eaux, en cours d'élaboration par les experts d'AAC, permettra à terme de produire et diffuser de l'information permettant la caractérisation physique du territoire pour l'application de modèle hydrologique tel que proposé ici (pour plus d'informations consulter <http://www.agr.gc.ca/nlwis-snite>). De l'information sera graduellement ajoutée au site d'ici 2009.

Remerciements

Le Centre d'expertise hydrique du Québec, le Service de l'information sur le milieu atmosphérique et le Service météorologique du Canada pour avoir fourni les données complémentaires nécessaires pour compléter le projet. Le projet a été financé par le Fonds québécois de la recherche sur la nature et les technologies et par une bourse d'étude du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada. Peter Vanrolleghem est titulaire de la Chaire de recherche du Canada en modélisation de la qualité de l'eau.

Bibliographie

- Andréassian, V., Perrin, C., Michel, C., Usart-Sanchez, I., et Lavabre, J. 2001. Impact of imperfect rainfall knowledge on the efficiency and the parameters of watershed models. *J. Hydrol. (Amst.)*, **250** : 206–223. doi:10.1016/S0022-1694(01)00437-1.
- Arnold, J.G., et Fohrer, N. 2005. SWAT2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling. *Hydrol. Process.* **19** : 563–572. doi:10.1002/hyp.5611.
- Baril, R., et Rochefort, B. 1957. Étude pédologique du comté de Lotbinière dans la province de Québec. Service des fermes expérimentales, ministère fédéral de l'Agriculture en collaboration avec le ministère de l'Agriculture de Québec et l'École supérieure d'Agriculture, Saint-Anne-de-la-Pocatière.
- Baril, P., Maranda, Y., et Baudrand, J. 2006. Integrated watershed management in Quebec (Canada): a participatory approach centred on local solidarity. *Water Sci. Technol.* **53** : 301–307. doi:10.2166/wst.2006.325. PMID:16838716.
- Bernard, C. 1996. Estimation de l'érodabilité (K) des principales séries de sol agricole du Québec, à l'aide du nomographe de Wischmeier. *Agrisol*, **9** : 6–12.
- Berzins, W.E., Harrison, R., et Watson, P. 2006. Implementation of

- the Alberta water for life strategy: strategic partnerships in action. *Water Sci. Technol.* **53** : 255–260. PMID:16838710.
- Biesbroeck, B., Wyseure, G., Van Orschoven, J., et Feyen, J. 2002. AVSWAT 2000. Tutorial. Katholieke Universiteit Leuven (K.U.Leuven), Laboratory for Soil and Water Management (LSWM), Belgium.
- Borah, D.K., et Bera, M. 2003. Watershed-scale hydrologic and nonpoint-source pollution models: Review of mathematical bases. *Trans. ASAE*, **46** : 1553–1566.
- Chanasyk, D.S., Mapfumo, E., et Willms, W. 2003. Quantification and simulation of surface runoff from fescue grassland watersheds. *Agric. Water Manage.* **59** : 137–153. doi:10.1016/S0378-3774(02)00124-5.
- Chaplot, V. 2005. Impact of DEM mesh size and soil map scale on SWAT runoff, sediment, and NO₃-N loads predictions. *J. Hydrol.* **312**(1–4) : 207–222.
- CSSC. 2002. Le système canadien de classification des sols. 3^e éd. Publication 1646. Direction générale de la recherche, Groupe de travail sur la classification des sols, ministère de l'Agriculture et de l'Agro-Alimentaire du Canada, Ottawa, Ont.
- Day, J.H., et McMenamin, J. 1983. Système d'information des sols au Canada (SISCan)- Manuel de description des sols sur le terrain Révision 1982. Direction générale de la recherche, Agriculture Canada, Ottawa, Ont.
- Deslandes, J., Beaudin, I., Michaud, A., Bonn, F., et Madramootoo, C.A. 2007. Influence of landscape and cropping system on phosphorus mobility within the Pike River watershed of Southern Quebec: Model parametrization and validation. *Can. Water Resour. J.* **32** : 21–42.
- Di Luzio, M., Srinivasan, R., Arnold, J.G., et Neitsch, S.L. 2002. SWAT 2000 ArcView interface manual. TWRI Report TR-193. Texas Water Resources Institute, College Station, Tex.
- Di Luzio, M., Arnold, J.G., et Srinivasan, J.G. 2005. Effect of GIS data quality on small watershed stream flow and sediment simulations. *Hydrol. Process.* **19** : 629–650. doi:10.1002/hyp.5612.
- Duchemin, M., Rousseau, A., Lamontagne, L., et Villeneuve, J.-P. 2001. Utilisation des technologies géomatiques pour spatialiser le facteur K d'érodabilité des sols du bassin versant de la rivière Chaudière, Québec. *Can. J. Soil Sci.* **81** : 423–437.
- Foster, G.R., McCool, D.K., Renard, K.G., et Moldenhauer, W.C. 1981. Conversion of the universal soil loss equation to SI metric units. *J. Soil Water Conserv.* **36** : 355–359.
- Gangbazo, G. 2006. La gestion intégrée de l'eau par bassin versant: une voie d'expression du développement durable, Québec. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP), Direction des politiques de l'eau.
- Hancock, G.R. 2005. The use of digital elevation models in the identification and characterization of catchments over different grid scales. *Hydrol. Process.* **19** : 1727–1749. doi:10.1002/hyp.5632.
- Jenson, S.K., et Domingue, J.O. 1988. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. *Photogramm. Eng. Remote Sensing*, **54** : 1593–1600.
- Kirchner, J.W. 2006. Getting the right answers for the right reasons: Linking measurements, analyses, and models to advance the science of hydrology. *Water Resour. Res.* **42** : W03S04. doi:10.1029/2005WR004362.
- Knisel, W.G. 1980. CREAMS, a field scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems. Rapport n° 26. USDA Conservation Research, Washington, D.C.
- Lamontagne, L. 1997. Estimation de la densité apparente selon la texture et le type d'horizon. Document interne. Équipe pédologique du Québec, Agriculture Canada, Sainte-Foy. 1 pp.
- Lamontagne, L., et Cossette, J.-M. 1994. Guide de terrain pour l'excursion sur les sols vertiques dans l'est du Canada (section Québec). Équipe pédologique du Québec, Centre de recherche sur les terres et les ressources biologiques, Direction générale de la recherche, Agriculture et Agro-alimentaire Canada, Sainte-Foy, Qué.
- Lamontagne, L., et Nolin, M.C. 1997a. Cadre pédologique de référence pour la corrélation des sols. Contribution n° 971123. Équipe pédologique du Québec, Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures.
- Lamontagne, L., et Nolin, M.C. 1997b. Dossier des noms de sols du Québec SISCan (Système d'information des sols du Canada). Contribution n° 971124. Équipe pédologique du Québec, Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures.
- Liang, X. 2002. Variable infiltration capacity (VIC): Macroscale hydrologic model. Documentation du modèle, Land Surface Hydrology Research Group, University of Washington [En ligne] Disponible au <http://www.hydro.washington.edu/Lettenmaier/Models/VIC/VIChome.html>.
- Lin, W.-T., Chou, W.-C., Lin, C.-Y., Huang, P.-H., et Tsai, J.-S. 2006. Automated suitable drainage network extraction from digital elevation models in Taiwan's upstream watersheds. *Hydrol. Process.* **20** : 289–306. doi:10.1002/hyp.5911.
- LPAP. 2007. Base de données physico-chimiques de profils de sols échantillonnés et analysés par l'Équipe pédologique du Québec d'Agriculture et Agroalimentaire Canada dans le cadre d'inventaires pédologiques au cours de la période 1976 à 1997. Laboratoires de pédologie et d'agriculture de précision, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Québec, Qué.
- Mapfumo, E., Chanasyk, D.S., et Willms, W. 2004. Simulating daily soil water under foothills fescue grazing with the soil and water assessment tool model (Alberta, Canada). *Hydrol. Process.* **18** : 2787–2800. doi:10.1002/hyp.1493.
- Marcoux, R. 1966. Étude pédologique des comtés de Bellechasse et de Montmagny. Ministère de l'Agriculture et de la Colonisation du Québec. Bulletin technique n° 12. Division des sols, Service de la recherche.
- Merot, P. 2003. Small rural catchment functioning in the framework of floods and rainfall-runoff events. *Houille Blanche*, **6** : 74–82.
- Michaud, A.R., Beaudin, I., Deslandes, J., Bonn, F., et Madramootoo, C.A. 2007. SWAT-predicted influence of different landscape and cropping system alterations on phosphorus mobility within the Pike River watershed of south-western Quebec. *Can. J. Soil Sci.* **87** : 329–344.
- MTQ. 2004. Manuel de conception des ponceaux. Ministère des Transports du Québec, Service de l'hydraulique, Québec.
- Munsell, A.H. 1941. A color notation. 9^e éd. Munsell Color Company, Baltimore, Ind.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., et Williams, J.R. 2005a. Soil and water assessment tool. Theoretical documentation. USDA, Agricultural Research Service and Blackland Research Center, Texas A&M University, Tex.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Srinivasan, R., et Williams, J.R. 2005b. Soil and water assessment tool. User's manual. USDA, Agricultural Research Service and Blackland Research Center, Texas A&M University, Tex.
- Nolin, M.C., et Lamontagne, L. 1986. Estimation de la réserve en eau utile (50 cm) de quelques unités cartographiques de la région de Montréal. Document interne. Équipe pédologique du Québec, Agriculture Canada, Sainte-Foy, Qué.
- Novotny, V. 2003. Water quality: Diffuse pollution and watershed management. 2^e éd. John Wiley & Sons, Ltd., New York.

- Oudin, L., Andréassian, V., Perrin, C., et Ancil, F. 2004. Locating the sources of low-pass behaviour within rainfall-runoff models. *Water Resour. Res.* **40** : W11101. doi:10.1029/2004WR003291.
- Ouellet, L., Rompré, M., Carrier, D., et Laflamme, G. 1995. Étude pédologique du comté de Beauce, Québec. Service des sols, Direction de la recherche et du développement, ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec.
- Pageau, E. 1976. Étude pédologique du comté de Dorchester. Agriculture Québec, Division des sols.
- Post, D.F., Fimbres, A., Matthias, A.D., Sano, E.E., Accioly, L., Batchily, A.K., et Ferreira, L.G. 2000. Predicting soil albedo from soil color and spectral reflectance Data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **64** : 1027–1034.
- Renaud, J. 2004. Mise en place du modèle agri-environnemental SWAT sur le bassin versant du Mercube. Rapport de stage. *Sous la direction de J. Poulernard*. Laboratoire des Sciences du Sol, CISM, Université de Savoie, France.
- Romanowicz, A.A., Vanclouster, M., Rounsevell, M., et Junesse, I.L. 2005. Sensitivity of the SWAT model to the soil and land use data parametrisation: A case study in the Thyle catchment, Belgium. *Ecol. Model.* **187** : 27–39.
- Saleh, A., et Du, B. 2004. Evaluation of SWAT and HSPF within BASINS program for the Upper North Bosque River Watershed in Central Texas. *Trans. ASAE*, **47** : 1039–1049.
- Saxton, K.E., et Rawls, W.J. 2006. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **70** : 1569–1578. doi:10.2136/sssaj2005.0117.
- Saxton, K.E., et Willey, P.H. 2006. The SPAW model for agricultural field and pond hydrologic simulation. *Dans Watershed models. Sous la direction de V.P. Singh et D.K. Frevert*. CRC Press, Boca Raton, Fla. p. 401–435.
- Schroeder, P.R., Dozier, T.S., Zappi, P.A., McEnroe, B.M., Sjostrom, J.W., et Payton, R.L. 1994. The hydrologic evaluation of landfill performance (HELP) model: Model: Engineering documentation for version 3. EPA/600/R-94/168b. Environmental Protection Agency Office of Research and Development, Washington, D.C.
- Shelton, I.J., Wall, G.J., et Coote, D.R. 1990. Risque d'érosion hydrique Ontario-Sud. Inventaire des sols du Canada. N° de contribution 90-71, publication 5277/B. Centre de recherches sur les terres, Direction générale de la recherche Agriculture Canada, Québec, Que.
- Shrestha, R., Tachikawa, Y., et Takara, K. 2006. Input data resolution analysis for distributed hydrological modeling. *J. Hydrol. (Amst.)*, **319** : 36–50. doi:10.1016/j.jhydrol.2005.04.025.
- Sidle, R.C. 2006. Field observations and process understanding in hydrology: essential components in scaling. *Hydrol. Process.* **20** : 1439–1445. doi:10.1002/hyp.6191.
- Soil Survey Staff. 2001. National Soil Survey. Handbook part 618, title 430-VI. Natural Resources Conservation Service, Washington, D.C.
- Srinivasan, R., Huisman, S., et Breuer, L. 2004. European SWAT summer school 2004. User's manual. SWAT development team, Institute of Landscape Ecology and Resources Management, Justus-Liebig University, Giessen, Collaborative research center 299 "Land use options for peripheral regions", Belgium.
- Tabi, M., Tardif, L., Carrier, D., Laflamme, G., et Rompré, M. 1990. Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec. Rapport synthèse: Entente auxiliaire Canada-Québec sur le développement agro-alimentaire. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Québec.
- Tripathi, M.P., Raghuvanshi, N.S., et Rao, G.P. 2006. Effect of watershed subdivision on simulation of water balance components. *Hydrol. Process.* **20** : 1137–1156. doi:10.1002/hyp.5927.
- van Griensven, A. 2002. Developments towards integrated water quality modelling for river basins. Thèse de doctorat, Vrije Universiteit Brussel, Bruxelles, Belgique.
- Van Vliet, L.J.P. 1989. Water erosion prediction in the Peace River region of British Columbia. Contribution 88-67, technical bulletin 1989-3E. Agriculture Canada, Research Branch, Land Resource Research Center.
- Williams, J.R. 1995. The EPIC model. Chap. 25. *Dans Computer models of watershed*. Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colo. p. 909–1000.
- Yair, A., et Raz-Yassif, N. 2004. Hydrological processes in a small arid catchment: scale effects of rainfall and slope length. *Geomorphology*, **61** : 155–169. doi:10.1016/j.geomorph.2003.12.003.