

Variabilité spatio-temporelle des exportations de sédiments et de phosphore dans le bassin versant de la Rivière aux Brochets au sud-ouest du Québec

Partie I

Paramétrage, calibrage et validation du modèle SWAT

*I. BEAUDIN¹, J. DESLANDES¹, A. R. MICHAUD¹, F. BONN² et C.A. MADRAMOOTOO³

RÉSUMÉ - I. Beaudin, J. Deslandes, A. Michaud, F. Bonn et C.A. Madramootoo, Variabilité spatio-temporelle des exportations de sédiments et de phosphore dans le bassin versant de la Rivière aux Brochets au sud-ouest du Québec. Partie I – Paramétrage, calibrage et validation du modèle SWAT. *Agrosol.* 17 (1) : 4-20. Une modélisation du fonctionnement hydrologique, des processus d'érosion et de la mobilité du phosphore a été supportée à l'échelle du bassin versant de la Rivière aux Brochets (630 km²), important tributaire québécois du Lac Champlain. Compte tenu de la problématique récurrente de prolifération de cyanobactéries dans la Baie Missisquoi, la réduction des flux de phosphore à la baie constitue une priorité d'intervention et a fait l'objet d'une entente entre les gouvernements de la province de Québec et de l'état du Vermont. Le paramétrage du modèle SWAT s'est appuyé sur la caractérisation et la représentation spatiale des paysages et des systèmes de production agricole selon un découpage du parcellaire en culture en plus de 2,400 unités de réponse hydrologique, chacune présentant des propriétés distinctes en termes de type de sol, de relief, de pratiques culturales, d'apports de nutriments et d'appartenance à l'un des 99 sous-bassins versants du territoire à l'étude. Le calibrage et la validation de la modélisation se sont appuyés sur les données de quatre stations hydrométriques, de même que sur le suivi de la qualité d'eau de deux bassins versants expérimentaux (6-8 km²) présentant des propriétés physiques contrastées. La différenciation des paramètres de calage pour les portions amont et aval du bassin a permis un bon ajustement du modèle hydrologique aux débits observés sur les différents tronçons de la Rivière aux Brochets, de

même qu'une bonne reproduction des flux de sédiments et de phosphore mesurés aux embouchures des deux bassins de référence. La modélisation des flux de sédiments et de phosphore à l'échelle du bassin versant met en relief une forte discrimination spatiale dans la distribution des exportations. Sur la base des conditions actuelles de régimes des sols et des cultures, plus de 50 % du flux de phosphore modélisé provient d'environ 10 % de la superficie totale du bassin. Typiquement, ces secteurs sont associés à d'importantes lames d'eau ruisselées, des taux élevés d'érosion ou à un enrichissement important de la couche arable en phosphore.

Mots clés : SWAT, modèle, bilan hydrique, sédiments, phosphore, paysage, systèmes culturaux.

ABSTRACT - I. Beaudin, J. Deslandes, A. Michaud, F. Bonn and C.A. Madramootoo, Spatial-temporal variability of sediment and phosphorus exports within the Pike River watershed of southwestern Québec. Part I – Parameterization, calibration and validation of the SWAT model. *Agrosol.* 17 (1): 4-20. Hydrological performance, erosion processes and phosphorus mobility were modelled for the 630 km² Pike River watershed, an important Quebec tributary of Lake Champlain. Given the recurring issue of cyanobacterial blooms in the Missisquoi Bay, intervening to reduce the influx of phosphorus to the bay became a priority and led to an agreement between the governments of the province of Quebec and the state of Vermont. The model's parameterisation was supported by a characterisation and spatial representation of agricultural landscapes and production systems according to a field-scale parti-

1. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA), 2700 rue Einstein, Québec (Québec), G1P 3W8, Canada

*Auteur pour la correspondance : téléphone : +1-418-528-7627, télécopieur : +1-418-644-6855, courriel : isabelle.beaudin@mail2.irda.qc.ca

2. Centre d'applications et de recherches en télédétection (CARTEL), Université de Sherbrooke, 2500, boul. de l'Université, Sherbrooke (Québec), J1K 2R1, Canada

3. Brace Centre for Water Resources Management, McGill University, Sainte-Anne-de-Bellevue (Québec), H9X 3V9, Canada

tioning of cultivated lands into over 2400 hydrological response units, each distinctive in its combination of soil properties, topography, fertilizer inputs, and inclusion within one of 99 sub-watersheds in the region under study. The model's calibration and validation was based on data from four hydrometric stations as well as the monitoring of water quality at the outlet of two small (6-8 km²) experimental watersheds of contrasting physical attributes. A differential setting of baseline values for the upstream and downstream portions of the watershed led to a better matching of hydrological model output to measured discharge on different branches of the Pike River, as well as a closer reproduction of sediment and phosphorus loads at the outlet of the two reference basins. On a watershed scale, the model-derived sediment and phosphorus loads showed a clear spatial pattern: under present soil and crop management methods, over 50 % of modeled phosphorus loads originated over roughly 10 % of the watershed's area. Typically, these areas showed high surface runoff depths, high erosion rates or significant phosphorus enrichment of the topsoil.

Keywords: SWAT, modeling, water balance, sediment, phosphorus, landscape, cropping systems

Introduction

Réduire les exportations diffuses de phosphore particulaire et soluble d'origine agricole vers le lac Champlain a été identifié en 1993 comme action prioritaire par les membres de la Conférence sur la gestion du lac Champlain (LCBP, 1994), situé en zone trans-frontalière entre le Québec et les états du Vermont et de New York. Reconnaissant le rôle déterminant des apports de phosphore (P) dans l'eutrophisation de la Baie Missisquoi (portion nord-est du lac Champlain), le Québec et le Vermont ont signé en 2002 une entente qui cible une concentration de 25 µg P L⁻¹ dans les eaux de la baie pour 2009. À cette fin, une réduction de 70,1 t/an (42 %) des exportations totales de phosphore par rapport à la charge annuelle totale de référence, établie pour l'année 1991, est nécessaire. Le partage des responsabilités pour le Québec a été établi à 40 %

(27 t/an) et à 60 % (43 t/an) pour le Vermont (Mimeault, 2002). Comme près de 80 % de la charge annuelle de P vers la baie (143 t P) est attribuable à l'agriculture (Hegman *et al.*, 1999), la gestion des sources de P passe inévitablement par les pratiques de gestion bénéfique (PGB) des ressources en eau et en sol.

L'état du Vermont et le Québec coopèrent depuis les années '90 afin de surveiller les concentrations de phosphore de la baie Missisquoi et ses deux plus grands tributaires, la rivière Missisquoi et la Rivière aux Brochets. Entre 1990 et 2000, la concentration annuelle moyenne de phosphore dans la baie Missisquoi a systématiquement dépassé le critère de qualité de l'eau de 0,025 mg/L et aucune tendance significative, à la hausse ou à la baisse, n'a été notée. De plus, les apports de P en provenance des rivières Missisquoi et Brochets ont systématiquement dépassé les charges cibles établies pour ces bassins (Medalie and Smeltzer, 2004).

En 1997, un programme de recherche a été initié dans le bassin versant de la rivière aux Brochets, le plus important contributeur de phosphore à la Baie Missisquoi en territoire canadien, dans le but de décrire les mécanismes de transfert des sources diffuses de P vers les éco-systèmes aquatiques. Des recherches ont été entreprises à plusieurs échelles spatiales : (i) en parcelles expérimentales – afin d'étudier l'effet et l'interaction des propriétés des sols, des amendements et des cultures sur la spéciation et les formes de P; (ii) à l'échelle du champ (10 ha) – pour effectuer le suivi des pertes de P avec le ruissellement et le drainage souterrain (Enright and Madramootoo, 2004); (iii) à méso-échelle (6-10 km²) – pour réaliser la caractérisation de la variabilité spatio-temporelle des flux de P de bassins versants (Michaud *et al.*, 2004a; 2005) et pour l'évaluation des effets de la gestion du territoire par le suivi de bassins jumeaux (Michaud *et al.*, 2004) et; (iv) à macro-échelle (630 km²) – pour adapter des indicateurs agroenvironnementaux associés à la mobilité du P (Deslandes *et al.*, 2004).

La caractérisation approfondie du bassin versant de la Rivière aux Brochets, à travers la modélisation, permet maintenant

d'évaluer rapidement, économiquement et à long terme l'efficacité des pratiques de gestion bénéfique (PGB) qui permettront d'atteindre les objectifs de réduction des charges de P. Considérant la capacité prédictive du modèle SWAT (Soil and Water Assessment Tool; Arnold et Fohrer, 2005) à simuler, sur de longues périodes de temps, les effets de différents scénarios de gestion du territoire sur les transferts hydriques et sur la mobilité des sédiments et des nutriments à l'échelle de grands bassins versants, ce modèle a été retenu. SWAT est un modèle déterministe semi-distribué issu d'une série de modèles développés antérieurement, notamment les modèles SWRRB (Williams *et al.*, 1985), EPIC (Williams *et al.*, 1984), CREAMS (Knisel, 1980) et GLEAMS (Leonard *et al.*, 1987). Il est largement utilisé en Amérique du Nord et en Europe dans la prédiction des transferts diffus de sédiments, de nutriments et de pesticides (Arnold et Fohrer, 2005; Neitsch *et al.*, 2002; van Griensven et Bauwens, 2005; Santhi *et al.*, 2001).

Afin d'extrapoler les effets des modifications des pratiques de gestion agricole sur les exportations de P vers le milieu aquatique, il est préalablement nécessaire de calibrer et de valider le modèle. Cet article présente donc le paramétrage, le calibrage et la validation de SWAT pour le bassin versant de la Rivière aux Brochets (630 km²), un important tributaire de la Baie Missisquoi en territoire canadien. Une attention particulière est portée aux gradients spatiaux des attributs du paysage, au stock de P du sol, aux amendements et aux systèmes culturaux et de leur influence sur la sensibilité du modèle et ses prédictions. Un deuxième article (Michaud *et al.*, 2006) présente les résultats de modélisation des scénarios des pratiques agricoles alternatives sur les dynamiques de transport des sédiments et du phosphore.

Méthodologie

Description du site

La Rivière aux Brochets a été identifiée comme l'un des principaux contributeurs au phosphore de la Baie Missisquoi

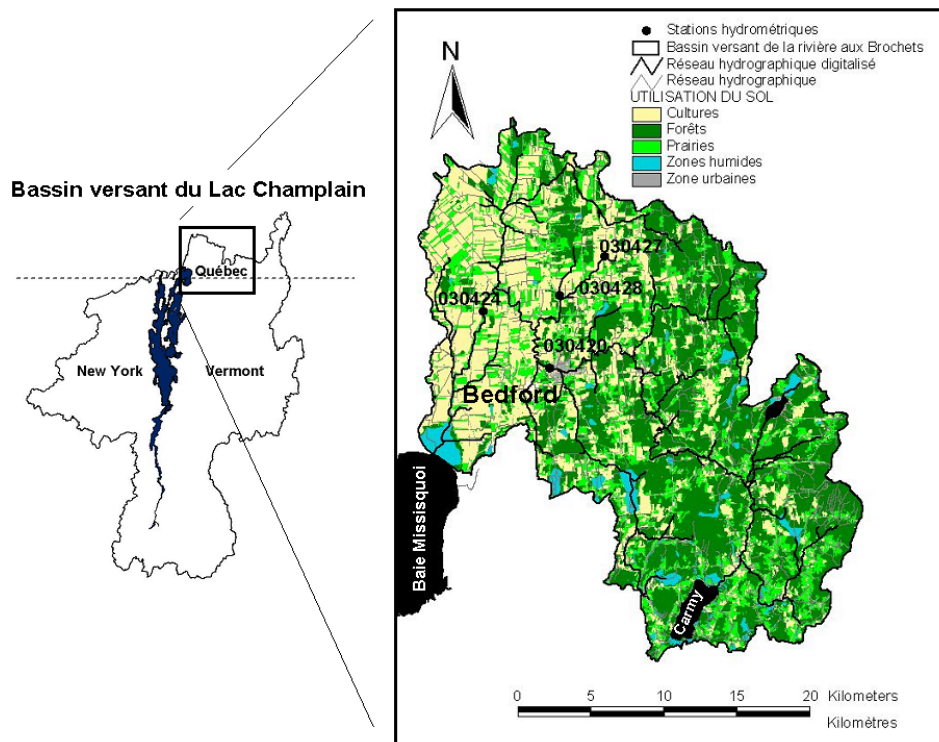


Figure 1. Les bassins versants du Lac Champlain et de la Rivière aux Brochets.

(Hegman *et al.*, 1999). Elle prend naissance aux États-Unis, au lac Carthy, à environ 8 km au sud de la frontière Québec-Vermont (figure 1). Son bassin draine un territoire de 630 km², dont 99 km² (15,7 %) se situent dans l'état américain du Vermont. Le bassin est caractérisé par un gradient spatial bien démarqué dans l'utilisation du territoire et son environnement géophysique. La portion amont du bassin (390 km²) traverse le piedmont appalachien, dominé par des loams sableux et schisteux. Les élévations y varient de 50 à 710 m au-dessus du niveau de la mer, avec une pente moyenne de 5° mais pouvant atteindre 38°. Cette portion du bassin se prête peu à l'agriculture intensive en raison de la nature des sols et du relief accidenté. Globalement, 35 % de la superficie de cette portion du bassin est réservée à des fins agricoles, principalement à la production laitière et porcine, avec une densité d'élevage de 0,44 UA/ha. Les productions fourragères pérennes et les cultures annuelles y occupent respectivement, 22 et 13 % de la superficie de la portion amont du bassin.

La région en aval du bassin (247 km²), qui s'étend de la ville Bedford à l'embouchure de la rivière, emprunte aux paysages de la plaine des Basses-Terres du Saint-Laurent

et des Appalaches. Les argiles d'origines marine et lacustre occupent les positions basses du relief, alors que les tills calcaires ou schisteux occupent les positions surélevées et ondulées du paysage. L'élévation de cette partie du bassin oscille entre 20 et 130 m avec de faibles pentes [moyenne de 0,6° (1 %)]. Les trois quarts de la superficie de cette portion du bassin sont cultivés. La production de maïs et de soja occupent la moitié des superficies en culture, alors que les fourrages pérennes et les céréales à paille occupent respectivement 30 et 20 % du territoire agricole. Le profil de la production animale ressemble à celui de la portion en amont du bassin, bien que la production y soit plus intensive, avec une densité d'élevage de 1 UA/ha. Cette portion du bassin abrite aussi le cœur industriel et la majorité de la population de la région, évaluée à environ 9 000 habitants.

Paramétrage du modèle

La préparation du projet de modélisation de SWAT pour la période d'étude 1997-2003 a été réalisée en suivant la procédure décrite par Di Luzio *et al.* (2002). En phase terrestre, les routines de SWAT ont supporté la simulation de l'évolution des stocks de nutriments, de la croissance et

des prélèvements des plantes, de même que les transferts d'eau, de sédiments et de nutriments vers le réseau hydrographique. L'ensemble des processus ont été simulés de façon journalière à l'échelle d'unités de réponse hydrologique (URH), chacune présentant une combinaison unique d'utilisation du sol et des propriétés physiques des sols à l'intérieur d'un des 99 sous-bassins du territoire à l'étude. Dans la phase aquatique du modèle, les exportations d'eau, de sédiments et de nutriments cumulées à l'échelle des sous-bassins ont été prises en charge par les routines du modèle qui simule les processus de déposition, de re-suspension, de transformation et d'érosion au sein du réseau hydrographique. Les simulations journalières des cycles terrestres et aquatiques de l'eau, des sédiments et des nutriments ont été rendues possibles grâce à un large éventail de données pertinentes aux conditions climatiques propres à la période d'étude ainsi qu'aux particularités physiques du territoire et à la gestion du parcellaire.

Climat

Les données journalières de précipitation et de température utilisées pour la période d'étude proviennent des stations météorologiques de Philipsburg (45°01' N, 73°04' O; élévation : 53 m), Farnham (45°18' N, 72°54' O; élévation : 68 m) et Sutton (45°09' N, 72°37' O; élévation : 244 m), localisées en périphérie du bassin (MDDEP, 2003). Les données relatives à l'éclairement solaire, à la vitesse du vent et à l'humidité relative, proviennent des bases de données du simulateur de climat de SWAT pour la station météorologique de Plattsburg (44°42' N, 73°30' O; Arnold et Fohrer, 2005). Les précipitations annuelles normales (1971 à 2000) des stations de Farnham, Philipsburg et Sutton, respectivement de l'ordre de 1 156 mm, 1 095 mm et 1 272 mm, mettent en relief le gradient orographique (30-210 m) à l'œuvre à l'échelle du bassin versant. Les normales des températures et des précipitations neigeuses annuelles passent de 5,8 °C et 390 mm à Sutton, près des altitudes maximales retrouvées en tête du bassin, à 6,8 °C et 247 mm à Phillipsburg, près de la rive de la Baie Missisquoi.

Globalement, les précipitations reçues au cours de la période à l'étude demeurent en-

dega de 11 % des normales annuelles alors que la température annuelle moyenne pour cette même période correspond à la moyenne à long terme. La modélisation de la croissance des cultures a pour sa part été ajustée aux unités thermiques de croissance (UTC) requises pour chacune des cultures modélisées. Ces UTC ont été calculées à partir des données de températures de la période à l'étude ainsi qu'à l'aide des dates de semence et de récolte de chacune des cultures. Avec ses 2500 à 2900 unités thermiques maïs (UTM) (Bootsma *et al.*, 1999), cette région est parmi les plus productives au Québec. Certains paramètres de croissance des cultures ont ensuite été ajustés par itération, de façon à reproduire les biomasses et les rendements généralement observés dans la région.

Attributs du paysage

La délimitation du bassin versant et de ses sous-bassins s'est appuyée sur une intégration des données hydrographiques, topographiques, hydrologiques, pédologiques et d'occupation des sols relatives aux portions québécoises et américaines du bassin versant de la Rivière aux Brochets. Le modèle numérique d'altitude (MNA) développé à partir de données multi-sources (Deslandes *et al.*, 2002) à une résolution spatiale de 30 m présente une précision de l'ordre de $\pm 1,3$ m, estimée comparativement au relief de haute précision développé pour le sous-bassin Walbridge (Michaud *et al.*, 2004b). La représentation spatiale de l'utilisation du sol a été supportée par la classification d'une image Landsat 7 ETM+ du 5 juillet 1999 (Cattaï, 2004). La cartographie de la couverture pédologique provient de différentes sources (Thériault *et al.*, 1943; Cann *et al.*, 1946; USDA-NCRS, 1999). Les propriétés physico-chimiques des sols, comme la texture, la conductivité hydraulique, la densité apparente et le pourcentage de matière organique ont été extraites des banques de données québécoises (Tabi, *et al.*, 1990) et américaines (USDA-NCRS, 1999). Les réserves en eau utile ont été dérivées des données de granulométrie (USDA-NCRS, 2001), alors que les facteurs d'érodabilité du sol proviennent de Bernard (1996) ou ont été estimés selon la méthode du nomogramme de Wischmeier (1971). En absence de données relatives à la distribution spatiale du

drainage souterrain, les superficies en cultures annuelles ont été considérées comme étant drainées pour les fins de la modélisation hydrologique. Le taux résultant du parcellaire drainé (60 %) s'avère représentatif des bassins versants expérimentaux de la région (Michaud *et al.*, 2004a; Michaud *et al.*, 2004b). Pour les besoins du modèle, la profondeur moyenne des drains a été fixée à 900 mm; le temps requis pour atteindre la capacité au champ à 48 heures et la durée du délai d'évacuation au cours d'eau à dix heures.

Phosphore du sol

Les processus de minéralisation et de rétention du phosphore, modélisés de façon journalière par SWAT à l'échelle de l'URH, ont été initialisés à partir d'une concentration du sol en P labile (mg/kg) et en P organique (mg/kg) dans le sol. La spatialisaiton de la richesse initiale des sols en P a été effectuée avec 1328 dosages de P selon la méthode Mehlich-III (Mehlich, 1984), redistribués à l'échelle des sous-bassins hydrographiques (Deslandes *et al.*; 2002). Les dosages selon la méthode Mehlich-III ont été convertis en valeurs équivalentes selon la méthode Olsen (Olsen *et al.*, 1954), en appliquant la courbe de calage de Tran *et al.* (1990) développée à partir de séries de sol. Les estimations de la biodisponibilité du P selon la méthode Olsen ont à leur tour été converties en teneurs de P labile selon l'équation proposée par Sharpley *et al.* (1984). Les teneurs initiales de P organique ont pour leur part été estimées à partir des taux de matière organique des séries de sol et des ratios C : N (12,4 : 1) et N : P (8 : 1) de la matière organique du sol (MO) (Neitsch, 2002). De façon à refléter les moyennes des richesses en P généralement plus élevées sur les sols dédiés à la culture du maïs (Tabi *et al.*, 1990), les teneurs en phosphore des URH en culture de maïs-grain ont été majorées de 50 %. La richesse des sols en P labile des sous-bassins américains a été fixée, par défaut, à 25 mg/kg de sol pour les terres en culture (Cope *et al.*, 1981).

Systèmes cultureux et gestion des fertilisants

La modélisation du cycle de l'eau, des processus d'érosion et de mobilité du phosphore sur le parcellaire agricole, s'est

appuyée sur un scénario de référence regroupant des itinéraires simplifiés de gestion pour chacune des 2253 URH en culture. La distribution spatiale des cultures, dérivée de la classification de l'image satellite de l'année 1999 (Cattaï, 2004), a été maintenue pour l'ensemble de la période de modélisation. Les dates de semis, de travail du sol et d'apports de fertilisants ont été ajustées annuellement en fonction du type de culture, du calendrier probable de gestion du parcellaire et des précipitations observées pour la période 2000-2003. L'historique de l'état des cultures au Québec (Financière agricole du Québec, 2006) a permis, dans une certaine mesure, de valider les choix des dates des semis et des récoltes. Compte tenu des pratiques généralement observées dans la région, la date la plus hâtive des épandages a été fixée à la première journée, à partir de la dernière semaine d'avril, ayant une période de 48 heures sans précipitation ni avant, ni après. De manière similaire, une période de 48 heures sans précipitation a été fixée comme préalable à l'enfouissement des engrais, à l'ensemencement ou à l'application en bandes ou enfouie de fertilisants. Ces règles entraînent des délais d'incorporation des fertilisants de 6 à 16 jours. Les itinéraires d'épandages estivaux et automnaux observent la même logique. Un scénario unique de travail du sol, basé sur la pratique conventionnelle du labour automnal et des hersages printaniers, a été retenu pour l'ensemble des cultures annuelles.

Les apports en phosphore et en azote ont été tirés des informations sur les dépenses annuelles en engrais minéraux, la composition des cheptels et les types de culture, consignées dans la fiche gouvernementale d'enregistrement de l'exploitation agricole. Une première distribution spatiale des apports d'engrais de ferme et minéraux a été établie à l'échelle des sous-bassins. Puis, les données de gestion des sols et des cultures recensées à l'échelle de la parcelle, acquises dans le cadre de l'étude de trois sous-bassins versants expérimentaux (Michaud, 2004a, b), ont servi de balise pour la répartition à l'échelle de la culture. La distribution temporelle des apports en engrais de ferme a été répartie sur trois périodes, soit : 45 % des volumes épandus en pré-semis; 36 % en post-levée et; 19 % à l'automne. Cette pondération reflète les

déclarations de la fiche d'enregistrement des exploitations agricoles. Les apports d'engrais minéraux azotés ont pour leur part été fractionnés à parts égales entre le pré-semis et la post-levée. L'engrais minéral phosphaté a été appliqué en une seule opération, au semis. En absence de données concernant les apports de nutriments sur le territoire américain du bassin versant, les valeurs moyennes des apports de la portion aval du bassin en territoire québécois ont été appliquées aux sous-bassins se situant aux États-Unis.

Calibrage et validation du modèle

L'optimisation des paramètres de calage a été supportée par quatre utilitaires PERL (*Practical Extraction Report Language*) développés par White *et al.* (2002), de même que par l'interprétation critique et la comparaison des résultats de la modélisation par rapport aux observations citées dans la littérature scientifique québécoise et nord-américaine. L'ajustement du modèle aux données de référence a été évalué à l'aide de trois indices statistiques, soit : (i) le coefficient de corrélation de Pearson (r); (ii) le coefficient de Nash Sutcliffe (NS; ASCE, 1993) et; (iii) le pourcentage de déviation des valeurs prédites par rapport aux valeurs mesurées (D_v). Alors que la corrélation de Pearson évalue la force [valeurs entre 0 (aucune corrélation) et 1 (corrélation parfaite)] et la direction (valeur négative ou positive) de la relation linéaire qui existe entre les valeurs prédites et les valeurs simulées, le coefficient de Nash-Sutcliffe est un indicateur de l'efficacité prédictive du modèle. Recommandé par l'« American Society of Civil Engineers » pour les études en hydrologie, le NS est particulièrement sensible aux événements de pointe. Une valeur de 1 indique un ajustement parfait alors qu'une valeur de 0 indique que le modèle ne prédit pas mieux qu'en utilisant la moyenne des données observées. Deux périodes distinctes ont été utilisées; une période de calage et une période de validation. Lors du calage du modèle, les écarts entre les flux observés et simulés sont minimisés au moyen d'un ajustement des paramètres du modèle. Au cours de la période subséquente, dédiée à la validation, l'ajustement du modèle calibré est évalué en utilisant une période dont les conditions climatiques sont différentes.

Calibrage de l'hydrologie

Les débits simulés par le modèle ont été comparés aux mesures prises à quatre stations hydrométriques; deux localisées sur les branches du Ruisseau Walbridge (WAL_{int} , $WAL_{tém}$), un tributaire de la Rivière aux Brochets, et deux sur le tronçon principal (B_{am} , B_{av}) de cette dernière (tableau 1; MDDEP, 2005). L'ensemble des stations hydrométriques sont équipées de limnimètres de type bulleur. Le tarage des courbes hauteur-débit est mis à jour annuellement à partir d'un minimum de 6 jaugeages. Les données hydrométriques sont ensuite corrigées afin de prendre en compte les refoulements occasionnés par la présence de glace ou de macrophytes dans le lit du cours d'eau. Toutefois, étant donné l'impossibilité de corriger totalement les effets de refoulement dus à la présence de glace entre janvier et avril 2001, cette période a été exclue du processus de calibrage du modèle. De plus, un suivi des charges de matières en suspension (MES) et de phosphore (P) est également effectué aux stations hydrométriques situées sur les tronçons du Ruisseau Walbridge.

Le calage hydrologique du modèle a été réalisé de l'amont vers l'aval en tenant compte du fort gradient dans la nature des paysages qui caractérisent le bassin versant de la Rivière aux Brochets. La surestimation des hauteurs de ruissellement de surface engendrée par la méthode SCS (USDA-SCS, 1972) a requis une réduction systématique des numéros de courbes de l'ordre de 20 % par rapport aux valeurs recommandées pour les états de surface à l'étude (Neitsch *et al.*, 2002). Des surestimations attribuables à la méthode SCS ont aussi été rapportées par Perone et

Madramootoo (1998) dans les Basses-Terres du Saint-Laurent. Tolson et Shoemaker (2004) et Saleh *et al.* (2000) ont par ailleurs apporté des ajustements similaires aux numéros de courbes (CN2) dans leurs simulations avec le modèle SWAT.

En plus des numéros de courbes, les caractéristiques de pente [longueur (SLSUBBSN) et inclinaison (SLOPE)] ainsi que les facteurs de compensation pour l'évapotranspiration (EPCO et ESCO) se sont avérés des paramètres sensibles dans l'ajustement des lames d'eau ruisselées prédites par le modèle SWAT pour le bassin versant de la Rivière aux Brochets. La répartition des écoulements en surface et souterrains s'est aussi montrée fort sensible aux caractéristiques pédologiques des URH, notamment à la profondeur des profils, à la densité apparente et la conductivité hydraulique des sols. Lenhart *et al.* (2002) ont d'ailleurs mis en relief la sensibilité du modèle SWAT à ces paramètres édaphiques. Les paramètres influents sur les transferts souterrains d'eau (ALPHA_BF, RCHRG_DP, GW_DELAY, GWQMN et REVAPMN) se sont aussi avérés déterminants pour l'ajustement du modèle aux débits observés en rivière. Lenhart *et al.* (2002), Tolson et Shoemaker (2004) et Spruill *et al.* (2000) ont aussi souligné la sensibilité des prédictions hydrologiques du modèle SWAT à ces paramètres de calage. Considérant l'importance des précipitations neigeuses et de la période de fonte printanière sur les exportations d'eau, de sédiments et de phosphore, un ensemble distinct de paramètres régissant le couvert nival et la fonte ont été utilisés pour la modélisation des sous-bassins WAL_{int} et $WAL_{tém}$ et celle des bassins B_{am} et B_{av} .

Tableau 1. Liste des stations hydrométriques sur le bassin versant de la Rivière aux Brochets.

N° de station	Station	Cours d'eau et description du territoire	Mesures réalisées
030420	B_{am}	Rivière aux Brochets, portion amont (385 km ²) Vallonné, dominé par la forêt	Débit
030424	B_{av}	Rivière aux Brochets, portion aval (561 km ²) Draine le territoire vallonné et forestier de la tête du bassin et une partie du secteur agricole et plat	Débit
030427	WAL_{int}	Ruisseau Walbridge avec interventions hydroagricoles (6,3 km ²) Vallonné et agricole (61 %), typique du paysage associé au piedmont appalachien	Débit, MES, P
030428	$WAL_{tém}$	Ruisseau Walbridge sans intervention hydroagricole (7,9 km ²) Plat et agricole (63 %), pentes longues, typique du paysage des basses terres du Saint-Laurent	Débit, MES, P

Calibrage de l'érosion et des exportations de phosphore

En raison de leurs propriétés géomorphologiques et des réponses hydrologiques contrastées, les bassins expérimentaux Walbridge (Michaud *et al.*, 2004a) ont servi de balises dans la différenciation des paramètres de calage de SWAT associés aux exportations de P et MES, pour les portions amont et aval du bassin versant de la Rivière aux Brochets. Entre 2000 et 2003, 166 échantillons ont été prélevés à l'exutoire des bassins versants expérimentaux du Ruisseau Walbridge. Ces échantillons d'eau ont été conservés à une température de 4 °C jusqu'à ce qu'ils soient analysés en laboratoire. Les matières en suspension ont été quantifiées par filtration (< 0,45 µm). Les concentrations de P réactif soluble (RS), biodisponible et total ont été déterminées par colorimétrie automatique avec la formation d'un complexe jaune de phosphomolybdate réduit par l'acide ascorbique (Murphy et Riley, 1962), après avoir respectivement subi une filtration (< 0,45 µm), une extraction à 0,1 N NaOH (Sharpley *et al.*, 1991) et une minéralisation au persulfate. Les données ponctuelles de qualité de l'eau et les mesures continues du débit du Ruisseau ont permis la modélisation des charges de sédiments et de phosphore avec le support du logiciel Flux 5.0 (Walker, 1998). Ce logiciel traduit avec des équations de régression, pour trois strates de débit, la relation qui existe entre les concentrations ponctuelles observées dans le ruisseau et le débit du cours d'eau (C/Q). Les coefficients de variation des estimations des charges sont demeurés circonscrits à l'intérieur des limites acceptables pour la modélisation de petits tributaires (Walker, 1998). L'examen des résidus des régressions concentration-débit et charge-débit a démontré l'indépendance des résidus par rapport au débit, à la date, à la saison, à la concentration et à la charge. Aucune donnée aberrante n'a été détectée à un niveau de probabilité de 5 %.

Suivant le calage des composantes hydrologiques du modèle, les simulations d'exportations de matières en suspension (MES) et de phosphore ont démontré une grande sensibilité aux paramètres de l'équation universelle modifiée de pertes de sol (MUSLE), notamment aux propriétés texturales et à l'indice d'érodabilité

du sol. Les coefficients de rugosité de Manning, ainsi que le facteur d'ajustement des débits de pointe (APM), associés à l'intensité des pluies, ont été ajustés afin de reproduire le plus fidèlement possible les dynamiques d'exportation des sédiments et des nutriments aux exutoires des bassins expérimentaux Walbridge. Au niveau de l'érosion du chenal, la méthode de Muskingum a été retenue pour évaluer l'effet de la variation spatiale du débit dans le réseau hydrographique sur le transport des sédiments et des éléments nutritifs. Tel que mentionné dans la littérature (Neitsch *et al.*, 2002; Tolson et Shoemaker, 2004), les facteurs d'érodabilité et de couverture végétale du réseau hydrographique se sont avérés forts sensibles lors du calage des exportations de MES et de P dans la phase aquatique du modèle. Cependant, nous ne disposons que de très peu de données sur les dynamiques de déposition et de resuspension en conditions climatiques similaires au secteur à l'étude. Wang *et al.* (1999) ont cependant quantifié les processus de rétention à l'œuvre dans un tributaire du Lac Champlain et ont établi que la rétention équivalait aux charges annuelles exportées. Un bilan hydro-dynamique relativement équilibré milite pour une contribution nette marginale de sédiments en provenance du réseau hydrographique. Hypothétiquement, il a ainsi été estimé que l'érosion du réseau hydrographique comptait pour moins de 20 % de la charge sédimentaire exportée. L'ajustement final des dynamiques d'exportation a été complété par le biais des facteurs régissant la

capacité de resuspension des sédiments par le cours d'eau.

Concernant les charges et la spéciation des prédictions de P simulées, plusieurs paramètres se sont avérés déterminants lors du calage du modèle, dont : le facteur d'enrichissement des sédiments en P (ERORGP); le facteur de disponibilité du P (PSP) et; le facteur de fractionnement du phosphore de la première couche de sol qui contribue à l'enrichissement du ruissellement en phosphore soluble (PHOSKD). Une attention particulière a aussi été portée à l'ajustement de la richesse des sols et aux opérations de travail du sol, notamment à l'efficacité de mixage et la profondeur du travail, de même qu'à la fraction des nutriments appliquée dans la couche superficielle du sol (10 mm) lors des opérations de fertilisation. Ces paramètres de régie des sols se sont avérés sensibles dans la définition du stock de P disponible à l'exportation via le ruissellement de surface.

Résultats et discussion

Ajustement des composantes hydrologiques du modèle

La répartition du bilan hydrique annuel moyen simulé entre 2000 et 2003 (tableau 2) montre que sur une moyenne annuelle de 1154 mm de précipitation sur l'ensemble du bassin de la Rivière aux Brochets, environ la moitié (566 mm) est

Tableau 2. Bilan hydrique annuel moyen (2000-2003) à l'exutoire de la Rivière aux Brochets.

Fractionnement du bilan hydrique	Quantités (mm)
Précipitation totale	1154
Précipitation neigeuse	326
Fonte de neige	296
Ruissellement	218
Mouvements latéraux d'eau dans le sol contribuant au débit du cours d'eau	39
Contribution des drains souterrains*	46
Contribution de l'eau souterraine (aquifère peu profond) au débit du cours d'eau	211
Transfert d'eau entre l'aquifère peu profond et les plantes (en période de stress hydrique)	16
Recharge de l'aquifère profond par percolation	60
Recharge totale des aquifères (profond et peu profond)	254
Débit en rivière	476
Eau qui percole et atteint l'aquifère peu profond	254
Évapotranspiration réelle	566
Évapotranspiration potentielle	805
Pertes par transmission	37

*attention, cette valeur est sous-estimée puisqu'elle est ramenée à l'ensemble du bassin, même si celui-ci n'est pas totalement drainé par des drains souterrains. Une valeur moyenne de 180 mm est représentative des superficies drainées.

perdue par évapotranspiration. Le ruissellement, les flux latéraux dans le sol et l'écoulement par les drains souterrains totalisent quant à eux 218, 39 et 46 mm par an respectivement et environ 211 mm transitent dans l'aquifère peu profond pour atteindre le cours d'eau alors que 60 mm sont transférés vers l'aquifère profond.

Dans l'ensemble, la répartition des composantes du bilan hydrique semble représentative des conditions agroclimatiques locales. Cependant, ce bilan donne toutefois l'impression que l'eau évacuée par les drains souterrains est sous-estimée. Rappelons que ces valeurs reflètent le bilan hydrique global de l'ensemble du bassin versant, alors que seulement 30 % de sa superficie totale est drainée souterrainement. En ne considérant que les champs drainés souterrainement, la hauteur d'eau moyenne exportée par les drains souterrains s'élève à 180 mm, comparativement à 170 mm qui transitent par le ruissellement. La comparaison des prédictions du modèle aux mesures réalisées aux champs dans la portion aval du bassin versant de la Rivière aux Brochets (Enright et Madramootoo, 2004), durant la même période d'étude, laisse cependant croire que les hauteurs d'eau de drainage simulées seraient sous-estimées au bénéfice des flux provenant de l'aquifère peu profond ou du ruissellement. Les récessions des débits

simulés dans la rivière et les ruisseaux ont généralement été bien reproduites. L'ajustement des débits simulés pendant ces périodes témoigne d'une reproduction satisfaisante des flux souterrains globaux (drains, migrations latérales des sols et résurgence de l'aquifère peu profond), malgré un certain degré d'incertitude concernant les contributions relatives de ces différentes sources.

L'ajustement des débits prédits par SWAT aux débits mesurés aux quatre stations hydrométriques pour la période d'étude est présenté au tableau 3. Dans l'ensemble, après le calage, les débits prédits par le modèle s'ajustent de façon satisfaisante aux débits mesurés aux stations hydrométriques de la Rivière aux Brochets. Les coefficients statistiques mensuels témoignent d'un bon ajustement du modèle (tableau 3b), tant pour les périodes de calage que celles de validation. Les coefficients de corrélation (r) varient entre 0,71 et 0,86, alors que les coefficients de Nash Sutcliffe (NS) s'échelonnent entre 0,44 et 0,66. Les volumes d'eau écoulés varient pour leur part d'une surestimation de 19 % à une sous-estimation de 33 %.

Considérant l'ajustement du modèle sur une base journalière, les critères statistiques indiquent aussi une reproduction satisfaisante des débits mesurés pour

l'ensemble des stations hydrométriques (tableau 3a). La station B_{av}, située la plus près de l'exutoire du bassin de la Rivière aux Brochets, présente des corrélations (r) de 0,76 et 0,86, des NS de 0,55 et 0,64 et des sous-estimations des volumes d'eau de 20 et 33 % pour les périodes de calage et de validation respectivement. Ces sous-évaluations sont essentiellement associées aux périodes hivernales de janvier-février 2002 et de mars et de décembre 2003. Pendant ces périodes, des températures exceptionnellement clémentes, oscillant autour de zéro et atteignant un maximum de 10° C, ont été enregistrées. Dans de telles conditions, le modèle SWAT éprouve des difficultés à différencier la pluie de la neige, en raison de son module de génération du climat basé sur la température moyenne journalière. Compte tenu de l'importance des crues associées aux redoux hivernaux, la prédiction des hauteurs d'eau s'en trouve grandement affectée. Il est aussi fort probable que les effets de la glace sur la rivière aient causé une sur-évaluation des débits de référence, en raison d'élévations du niveau de l'eau enregistrées par le limnimètre pendant ces périodes. Mis à part ces débits de pointe, associés aux redoux hivernaux, l'hydrogramme journalier simulé révèle, dans son ensemble, la capacité du modèle à reproduire le comportement hydrologique du bassin.

Tableau 3. Indicateurs de l'ajustement du modèle aux débits journaliers (a) et mensuels (b) mesurés aux quatre stations hydrométriques de référence pour les périodes de calage et de validation.

(a)	Calage			Validation		
	R	NS	D _v %	R	NS	D _v %
030420 - Rivière aux Brochets, amont de Bedford (B _{am})	0,75 (avril 1998 à déc. 2000 et mai 2001 à déc. 2002)	0,56	- 3 %	0,71	0,50 (jan. 2003 à déc. 2003)	- 8 %
030424 - Rivière aux Brochets, aval de Bedford*(B _{av})	0,76 (nov. 2001 à déc. 2002)	0,55	- 20 %	0,86	0,64 (jan. 2003 à déc. 2003)*	- 33 %
030427 - Ruisseau Walbridge Intervention (Wal _{int})	0,77 (nov. 2001 à déc. 2002)	0,58	- 9 %	0,78	0,44 (jan. 2003 à déc. 2003)	+ 19 %
030428 - Ruisseau Walbridge Témoin (Wal _{tém})	0,77 (nov. 2001 à déc. 2002)	0,59	+ 3 %	0,82	0,66 (jan. 2003 à déc. 2003)	- 15 %
(b)	Calage			Validation		
	R	NS	D _v %	R	NS	D _v %
030420 - Rivière aux Brochets, amont de Bedford (B _{am})	0,93 (avril 1998 à déc. 2000 et mai 2001 à déc. 2002)	0,85	- 3 %	0,97	0,91 (jan. 2003 à déc. 2003)	- 8 %
030424 - Rivière aux Brochets, aval de Bedford*(B _{av})	0,82 (nov. 2001 à déc. 2002)	0,52	- 20 %	0,88	0,60 (jan. 2003 à déc. 2003)	- 33 %
030427 - Ruisseau Walbridge Intervention (Wal _{int})	0,74 (nov. 2001 à déc. 2002)	0,49	- 9 %	0,93	0,64 (jan. 2003 à déc. 2003)	+ 19 %
030428 - Ruisseau Walbridge Témoin (Wal _{tém})	0,78 (nov. 2001 à déc. 2002)	0,60	+ 3 %	0,94	0,85 (jan. 2003 à déc. 2003)	- 15 %

*À la station 030424, les statistiques de validation (2003) sont calculées en excluant les mois de juillet à octobre 2003 puisque les données réelles de débit sont inexistantes.

Quant à la station B_{am} , l'ajustement des débits pendant la période de calage, s'échelonnant entre avril 1998 et décembre 2002, témoigne d'une corrélation de 0,75, d'un NS de 0,56 et d'une déviation de -3 %. Notons cependant que les mois de janvier à avril 2001 ont été exclus de la période de calage à cause d'une mauvaise correction de l'effet de la glace sur les débits mesurés. Pendant la période de validation, allant de janvier à décembre 2003, le modèle reproduit bien l'hydrologie du bassin, tel qu'en témoignent la corrélation de 0,71, le NS de 0,50 et la déviation de -8 %. À l'instar des autres bassins, mais de façon plus évidente, SWAT a éprouvé des difficultés à reproduire le temps de concentration pendant la période estivale. Ceci est perceptible par les petits pics de ruissellement simulés pendant l'été (figure 2). Ces écarts du modèle par rapport aux débits mesurés sont possiblement associés aux difficultés qu'éprouve le modèle à reproduire les fluctuations du taux de saturation en eau du sol, largement tributaire de la capacité au champ. Cette propriété des URH est estimée dans le modèle SWAT sur la base de caractéristiques physiques du sol, définies de façon trop macroscopique (échelle 1:63360 pour la portion québécoise du

bassin) par rapport à la variabilité spatiale réelle appréhendée à l'échelle du parcellaire. Par ailleurs, le modèle échoue dans la reproduction de certaines pluies intenses qui surviennent pendant les orages estivaux. L'événement du 11 juin 2002 (52 mm) témoigne bien de cette problématique.

En ce qui concerne le calage du modèle hydrologique à la station WAL_{int} du Ruisseau Walbridge, les indicateurs de l'ajustement du modèle ne sont pas tous satisfaisants ($r = 0,73$; $NS = 0,23$ et $Dv = -4$ %) lorsque les paramètres de fonte et les caractéristiques du couvert nival issus du calage hydrologique de la portion aval du bassin de la Rivière aux Brochets (B_{av}) sont utilisés. Néanmoins, un léger ajustement des paramètres régissant l'état (pluie ou neige) des précipitations et la fonte de la neige au sol permet d'atteindre des seuils statistiques satisfaisants ($r = 0,77$; $NS = 0,58$ et $Dv = -9$ %) lors de la période de calage. La période de validation démontre cependant un ajustement au débit de pointe, tel qu'illustré par le coefficient de Nash-Sutcliffe, un peu faible ($NS = 0,44$) et une déviation par rapport aux volumes d'eau exportés relativement élevée (19 %) pendant la période de validation. Cette surestimation est essentiellement liée à la

période d'octobre à décembre 2003, qui montre un surplus de 88 mm, alors que la période printanière (mars à mai) de 2003 est bien simulée, avec seulement 13 mm en surplus. Notons que les paramètres caractérisant le couvert nival et les périodes de fonte sont fixés à l'échelle du bassin dans le modèle SWAT et qu'ils ne peuvent donc pas être ajustés aux caractéristiques propres aux sous-bassins, telles que la présence de la forêt ou l'orientation du versant. Rappelons que dans le calage de l'hydrologie sur les deux bassins expérimentaux du Ruisseau Walbridge, les paramètres de fonte ont été ajustés aux caractéristiques biophysiques du bassin. Afin de minimiser l'effet d'un mauvais paramétrage des débits, les modélisations subséquentes des exportations de sédiments (MÉS) et de phosphore (P) sont basées sur les paramètres de calage hydrologique propres à chacun des bassins versants expérimentaux.

Enfin, en ce qui a trait au calage du modèle à la station $WAL_{tém}$ du Ruisseau Walbridge, le recours aux propriétés de fonte et du couvert nival propres aux caractéristiques des sous-bassins du Ruisseau Walbridge a permis d'atteindre des critères statistiques satisfaisants pour la période de calage ($r = 0,77$; $NS = 0,59$ et $Dv = 3$ %) et de validation ($r = 0,82$; $NS = 0,66$ et $Dv = -15$ %). Néanmoins, les événements estivaux extrêmes de ruissellement, associés à des précipitations intenses, manquent d'amplitude. La méthode SCS de prédiction des hauteurs de ruissellement ne permet pas de corriger cette lacune sans causer une surévaluation des pics de ruissellement pendant le reste de l'année. Les écarts dans la reproduction des événements estivaux, combinés aux difficultés du modèle à reproduire fidèlement les précipitations hivernales, expliquent l'obtention de coefficients Nash Sutcliffe légèrement inférieurs au taux de 0,60, généralement considéré comme balise dans l'interprétation de l'ajustement des débits simulés. Toutefois, la période de validation de la station $WAL_{tém}$ montre un NS supérieur ($NS = 0,66$) à celui de la période de calage ($NS = 0,59$). Cet étonnant résultat provient du fait que la période de calage compte deux périodes hivernales (nov. 2001 à avril 2002 et nov. à déc. 2002) pour lesquelles SWAT éprouve certaines difficultés de reproduction, plutôt qu'une en

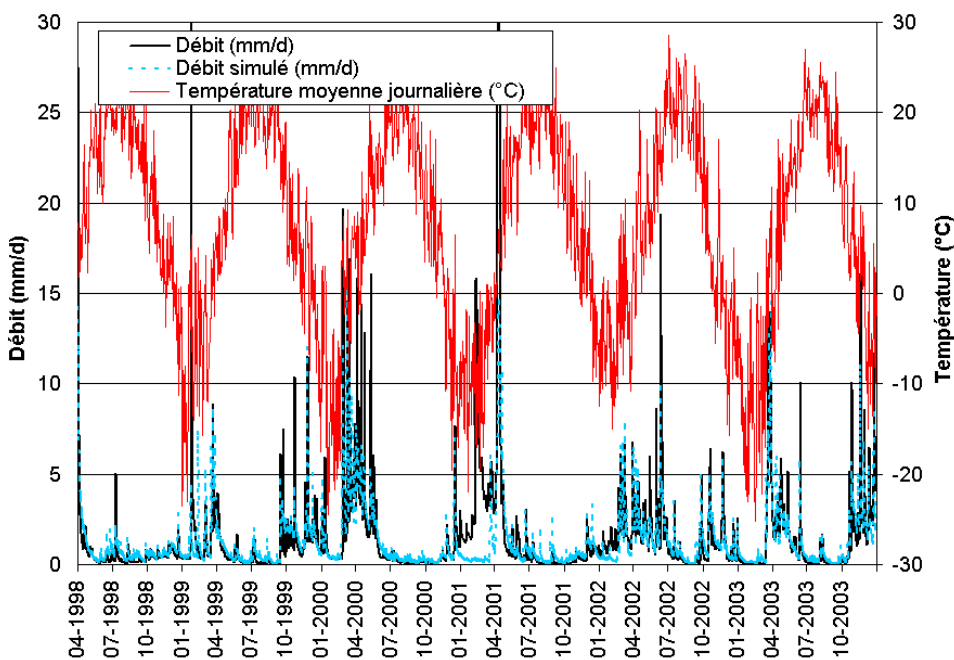


Figure 2. Série chronologique journalière de la température moyenne, du débit mesuré et du débit prédit par le modèle à la station hydrométrique de la Rivière aux Brochets (Bam), en amont de Bedford, pour la période d'étude 1998-2003.

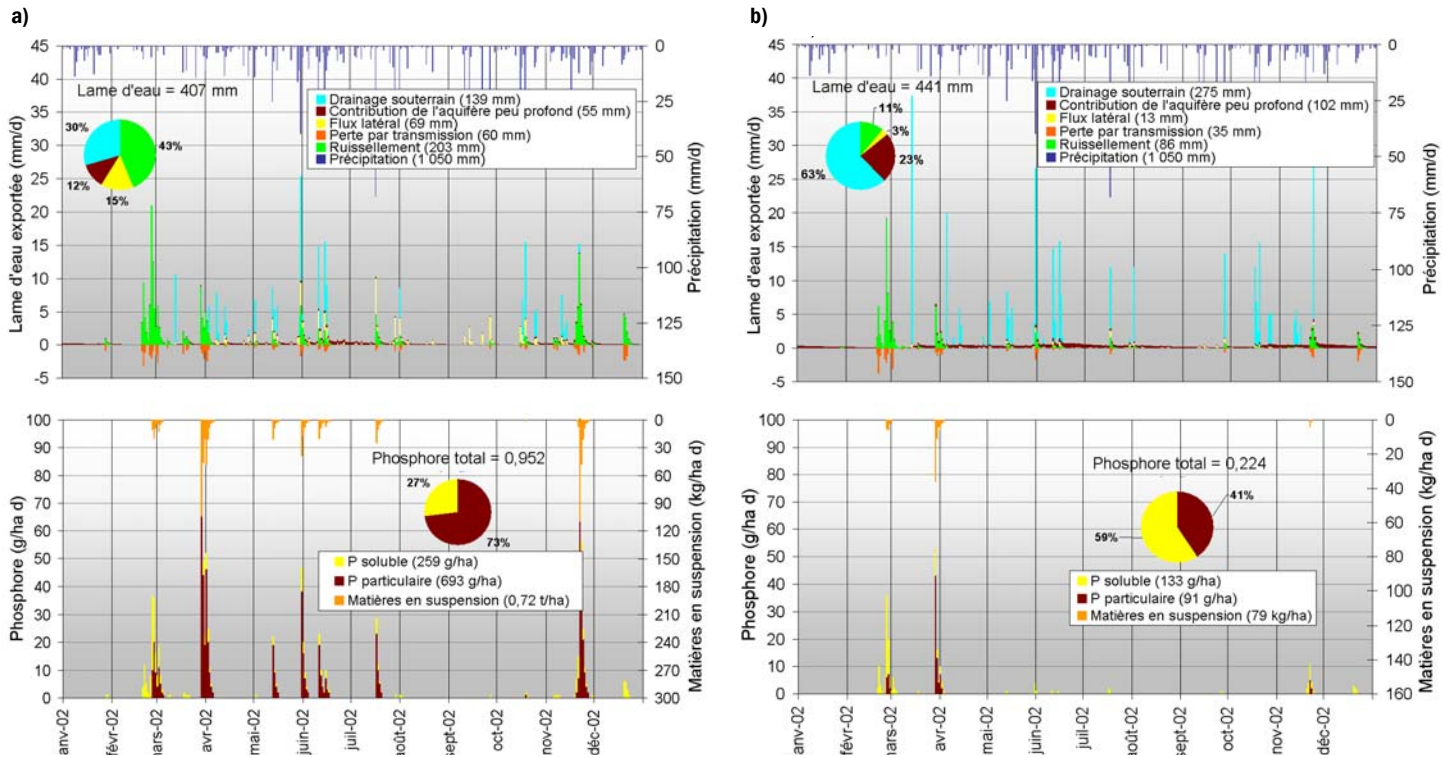


Figure 3. Série chronologique journalière des composants du bilan hydrique et des exportations de MES et P modélisées pour des URH de maïs sur un loam sableux mal drainé avec une pente de 0,8 % (a) et sur un loam sableux graveleux bien drainé en pente de 0,7 % (b).

2003. De plus, la période de fonte printanière de 2003 est bien reproduite, ce qui explique le NS élevé.

Variabilité spatio-temporelle de l'activité hydrologique

Le bilan hydrique simulé à l'échelle de l'URH a une influence déterminante sur les pertes de sol et la mobilité du phosphore. La hauteur de ruissellement de surface simulée est en effet utilisée en intrant dans la prédiction des pertes de sol par l'équation MUSLE. À son tour, la prédiction de pertes de sol est déterminante dans le calcul des exportations de phosphore particulaire. Dans une perspective opérationnelle, la vulnérabilité du parcellaire au ruissellement de surface demeure le premier critère à évaluer dans la planification de la régie agroenvironnementale des sols et des cultures. La figure 3 met en relief la capacité du modèle à discriminer la répartition des lames d'eau s'écoulant de deux URH, toutes deux en culture de maïs, mais présentant des propriétés physiques du sol fort contrastées, soit un loam sableux mal drainé ainsi qu'un loam sableux graveleux bien drainé. Afin de faciliter la composition des

hauteurs d'eau journalières exportées, les résultats de la simulation sont représentés sous la forme d'histogrammes empilés représentant respectivement : le ruissellement de surface; les contributions latérales transitant dans le profil du sol; les contributions de l'aquifère peu profond; les contributions provenant des drains souterrains et les pertes par transmission dans le cours d'eau.

La plus grande susceptibilité de l'URH sur loam sableux mal drainé (Milton) à générer du ruissellement est bien illustrée par la quantité de ruissellement (203 mm), qui est près du double du ruissellement simulé (86 mm) sur l'URH sur loam sableux graveleux bien drainé (Rougement). Similairement, les pertes par transmission dans le réseau hydrographique demeurent également plus importantes sur l'URH mal drainée (60 mm), en raison du volume ruisselé plus abondant. Aux deux sites, les événements de ruissellement sont principalement observés en période printanière ou automnale, alors que le sol est gelé ou saturé, et pendant la fonte des neiges. L'importance relative de la fonte des neiges dans le bilan annuel du ruissellement de surface reflète les observations colligées par

Jamieson *et al.* (2003) sur deux dispositifs d'étude aux champs de la région. Alors que 60 % du ruissellement modélisé est associé aux événements de fonte de neige sur l'URH du sol Milton, cette proportion est plutôt de 80 % pour l'URH dont le sol est bien drainé. Ce contraste dans la saisonnalité du ruissellement de surface simulé aux deux sites démontre bien l'influence de la perméabilité plus faible de la série de sol Milton, qui se traduit par une plus grande susceptibilité à générer du ruissellement à l'année.

Quant aux dynamiques d'écoulements souterrains, peu de données permettent de valider la répartition des contributions souterraines (écoulement latéral, aquifère peu profond et des drains souterrains) simulées par le modèle. Globalement, les composantes souterraines de l'écoulement vers les cours d'eau sont de l'ordre de 65 et 89 %, respectivement, pour les URH du loam sableux mal drainé et du loam sableux graveleux bien drainé. Annuellement, le modèle simule presque deux fois plus d'eau qui transite par les voies souterraines pour l'URH bien drainée. Si seuls les drains sont considérés, ceux-ci exportent respectivement 34 et 63 % des volumes d'eau

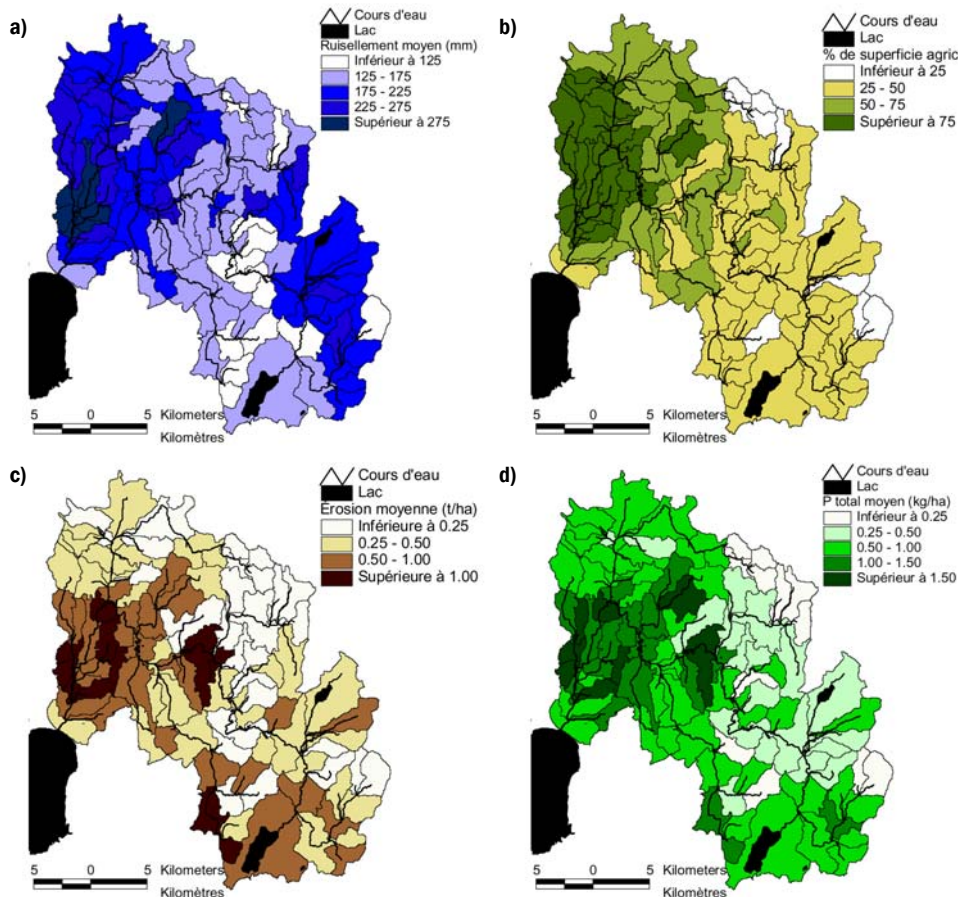


Figure 4. Distribution spatiale, à l'échelle des sous-bassins de la Rivière aux Brochets, du ruissellement annuel moyen (a), du pourcentage d'occupation agricole (b), des exportations annuelles moyennes de sédiments (c) et des exportations annuelles moyennes de P total (d).

atteignant le cours d'eau pour l'URH sur loam sableux mal drainé et sur loam sableux graveleux bien drainé. Pour la même culture, le maïs, la somme de l'ensemble des flux surface/souterrains suggère que l'URH mal drainée génère 407 mm d'eau au cours d'eau, ce qui est inférieur de 10 % à l'URH bien drainée.

Dans une perspective plus globale, la figure 4 (a) présente la cartographie du ruissellement moyen modélisé par SWAT pour les sous-bassins de la Rivière aux Brochets entre 2001 et 2003. Selon la méthode des numéros de courbes (USDA-SCS, 1972), le ruissellement est tributaire des propriétés pédologiques (groupe hydrologique, drainage) et de l'utilisation du sol. Plus l'usage agricole d'un territoire est important, plus la lame d'eau ruisselée y est considérable. L'appréciation des figures 4 (a) et (b) souligne bien cette tendance. En fait, le ruissellement modélisé

sur les 99 sous-bassins de la Rivière aux Brochets est significativement corrélé avec le pourcentage d'utilisation agricole de ceux-ci ($r = 0,64$; $p < 0,001$).

Néanmoins, dans la portion sud-ouest du bassin, où l'occupation agricole du territoire demeure relativement marginale, les hauteurs d'eau ruisselées apparaissent relativement élevées. Cette distribution spatiale de l'activité hydrologique de surface est attribuée en partie au gradient orographique des précipitations favorisant les

parties surélevées du bassin versant, dont l'élévation varie de 710 mètres. La distribution spatiale des précipitations imposées au modèle, provenant de trois stations météorologiques de référence dont les profils climatiques sont contrastés, reflète ce gradient. À titre indicatif, les résultats de la simulation hydrologique témoignent d'une corrélation linéaire significative ($r = 0,72$; $p < 0,001$) entre l'élévation et les précipitations à l'échelle du sous-bassin. De la même façon, le recoupage dans les gradients spatiaux d'occupation du sol et des précipitations fait en sorte que ces derniers sont négativement corrélés ($r = 0,47$; $p < 0,001$). L'interprétation des hauteurs d'eau ruisselées à l'échelle du bassin versant doit ainsi tenir compte du fait que les secteurs présentant une agriculture plus marginale correspondent aux secteurs les plus élevés du bassin, qui reçoivent annuellement le plus de précipitations.

Ajustement des composantes du modèle régissant l'érosion et la mobilité du phosphore

En dépit du fait que SWAT ait été développé pour des applications à l'échelle de grands bassins versants, le modèle a reproduit de façon satisfaisante, après calage, les flux de sédiments et de phosphore des bassins expérimentaux du Ruisseau Walbridge (6-8 km²). Le tableau 4 compare les prédictions de flux de sédiments et de phosphore modélisés par le modèle aux exportations mesurées aux exutoires des bassins expérimentaux d'où ont été pris les échantillons d'eau. Les coefficients statistiques mensuels, calculés à l'aide des données de la période allant de novembre 2001 à décembre 2002, témoignent d'un bon ajustement du modèle. Les corrélations linéaires varient entre 0,82 et 0,88, les coefficients de Nash-Sutcliffe s'échelonnent de 0,55 à 0,76 et l'erreur d'estimation des exportations totales peut varier de 13 %.

Tableau 4. Indicateurs de l'ajustement du modèle aux exportations mensuelles de matières en suspension et de phosphore mesurées aux stations hydrométriques situées à l'exutoire des sous-bassins expérimentaux Walbridge pour la période 2001-2002.

	Calage MES			Calage P		
	R	NS	D, %	R	NS	D, %
030427 Ruisseau Walbridge intervention (Wal _{int})	0,86	0,70	10 %	0,88	0,76	-13 %
	(novembre 2001 à décembre 2002)					
030428 Ruisseau Walbridge Témoin (Wal _{tém})	0,82	0,55	-4 %	0,87	0,73	7 %
	(novembre 2001 à décembre 2002)					

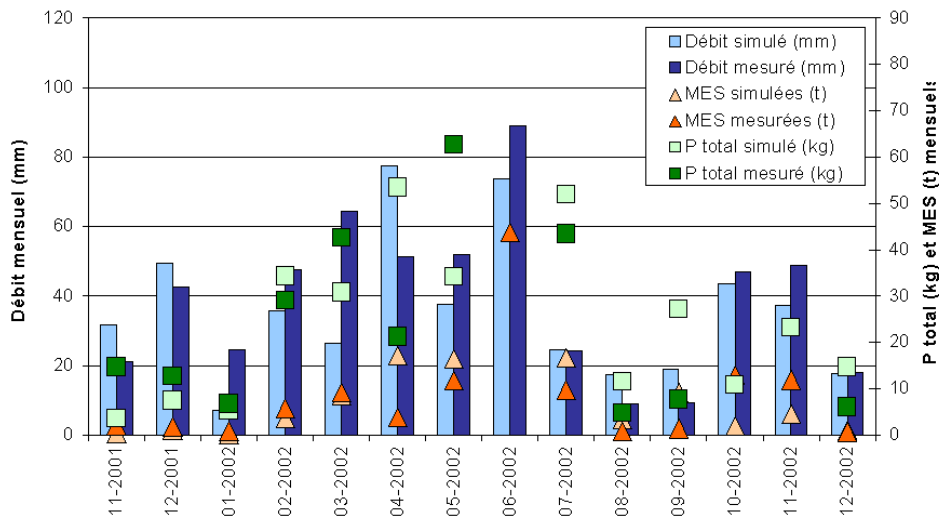


Figure 5. Débits et exportations mensuels de phosphore et de matières en suspension observés et modélisés à l'exutoire du sous-bassin Walbridge Intervention.

L'ajustement des prédictions des flux de sédiments reflète en grande partie la capacité du modèle à reproduire l'hydrologie du bassin. Entre novembre 2001 et décembre 2002, les exportations mesurées sur le bassin du Ruisseau Walbridge Intervention (WAT_{int}) se chiffrent respectivement à 117 tonnes de sédiments (0,19 t/ha) et 572 kg de P (0,95 kg/ha), alors que le modèle les évalue respectivement à 128 tonnes (0,21 t/ha) et 498 kg (0,83 kg/ha). Les exportations mesurées à l'exutoire du bassin du Ruisseau Walbridge Témoin ($WAT_{tém}$) se chiffrent pour leur part à 294 tonnes de sédiments (0,49 t MES/ha) et 713 kg de P (1,18 kg P/ha), alors que les simulations les évaluent à 282 tonnes de sédiments (0,47 T/ha) et 765 kg de P (1,27 kg P/ha). Globalement, le modèle sous-évalue les exportations de MES et P pendant les périodes hivernales, alors que la tendance contraire est observée pendant les périodes estivales (figure 5). En période estivale, la difficulté éprouvée dans la reproduction des hauteurs d'eau ruisselées associées aux précipitations intenses se répercute fortement sur l'ajustement des flux prédits de MES et de P aux flux mesurés. Alors que la pluie du 12 juin 2002 (52 mm) était responsable de 10 % des exportations annuelles totales mesurées en 2002, SWAT n'y a accordé qu'une faible capacité de transport des sédiments et du P. Ces écarts entre les flux prédits et observés de MES et de P aux exutoires des bassins instrumentés sur le

Ruisseau Walbridge témoignent des limites du modèle opérant à un pas de temps journalier et réitérent l'importance d'une bonne reproduction du cycle hydrologique pour bien simuler la variabilité spatiale du parcellaire aux processus d'érosion et de mobilisation du phosphore.

Variation spatio-temporelle des pertes de sol

Au plan agronomique, les résultats des simulations du modèle hydrologique pour la période d'étude 2001-2003 témoignent de taux de pertes de sol relativement faibles sur l'ensemble du territoire (figure 4c). Les exportations annuelles moyennes pondérées pour la superficie en culture et exprimées à l'échelle du sous-bassin reflètent des niveaux bien en-deçà du taux de tolérance agronomique de 6 t/ha généralement admis au Québec. Cependant, au plan environnemental, le cumul des pertes de sol à l'échelle du bassin versant, annuellement estimé à 31 267 tonnes de sédiments pour la période 2000-2003, constitue un enjeu sérieux. L'analyse temporelle des bilans journaliers d'exportation aux exutoires des bassins expérimentaux du Ruisseau Walbridge met en relief le caractère très épisodique des événements hydrologiques conduisant à l'érosion. Ainsi, 80 % de la charge de sédiments modélisée en 2002 atteint le réseau hydrographique au cours de courtes périodes totalisant 28 jours, correspondant à 8 % de l'année. Cette distribution reflète essen-

tiellement celle des hauteurs d'eau ruisselées et se concentre pendant les périodes d'activités hydrologiques du printemps et de l'automne.

Pour ce qui est de la phase aquatique de la modélisation, les bilans hydrodynamiques, simulant les processus de sédimentation, d'érosion et de re-suspension dans les différentes branches et tronçons de la Rivière aux Brochets, sont très variables. Les bilans annuels moyens (2000-2003) se situent entre un taux de déposition net de 25 % et une contribution de l'érosion des berges correspondant à plus du double des pertes de sol provenant du parcellaire en amont. Globalement, l'ajustement des paramètres de calibrage de la phase hydrodynamique du modèle fait en sorte que la masse de sédiments stockés dans l'ensemble du réseau hydrographique du bassin de la Rivière aux Brochets est légèrement inférieure au taux d'érosion des chenaux combiné à la remise en suspension des sédiments du fond du cours d'eau. Le bilan net modélisé à l'exutoire de la rivière se traduit ainsi : des 31 267 tonnes de sédiments prélevés annuellement sur l'ensemble du territoire du bassin, une quantité légèrement supérieure atteint annuellement les eaux de la Baie Missisquoi (37 042 tonnes).

Dans l'ensemble, une importante gradation des taux d'exportation de sédiments d'amont en aval est perceptible à l'échelle des URH (tableau 5). Les algorithmes du modèle hydrologique intègrent les influences d'une multitude de paramètres, dont certains relèvent des propriétés des sols et du relief, alors que d'autres relèvent de la gestion du parcellaire, tels que la présence de drains souterrains, le type de culture et les pratiques agricoles qui leurs sont associées. Malgré la vocation agricole relativement moins importante dans la portion amont du bassin versant, 60 % des exportations annuelles de sédiments y originent. Bien que les exportations moyennes spécifiques pour les portions amont et aval soient semblables, avec des taux respectifs de 0,47 et 0,53 t/ha, les superficies responsables de la majorité des exportations de l'amont du bassin sont beaucoup plus restreintes qu'en aval. Alors que la proportion des superficies en cultures annuelles est moins importante en amont du bassin, les taux de pertes de sol en culture de maïs, de soja ou de

Tableau 5. Exportations annuelles massiques et spécifiques de sédiments et de phosphore modélisées par classe d'occupation du sol pour la période 2000-2003 dans les portions amont et aval du bassin versant de la Rivière aux Brochets et spéciation des fractions de phosphore modélisées par classe d'occupation du sol pour l'ensemble des URH du bassin versant.

Utilisation du sol	Aval						Amont						Ensemble du bassin					
	Superficie		MES		P total		Superficie		MES		P total		MES		P total		% soluble	
	ha	%	t	t/ha	kg	kg/ha	ha	%	t	t/ha	kg	kg/ha	t/ha	ET	kg/ha	ET		
Prairie/pâturage	5863	24 %	123	0,02	2512	0,43	8322	22 %	980	0,12	3016	0,36	0,08	0,10	0,39	0,22	76 %	
Verger/ vignoble	88	0 %	1	0,01	4	0,04	1039	3 %	106	0,10	97	0,09	0,09	0,08	0,09	0,05	52 %	
Maïs	8907	36 %	10096	1,13	16556	1,86	3493	9 %	11509	3,29	14144	4,05	1,74	3,87	2,48	4,36	11 %	
Maraîcher	19	0 %	10	0,50	20	1,02	0	0 %					0,50	0,13	1,02	0,20	16 %	
Urbain	854	3 %	1163	1,36	1643	1,92	1788	5 %	2345	1,31	3521	1,97	1,33	2,92	1,95	1,86	28 %	
Forêt	4570	18 %	6	0,00	43	0,01	20960	54 %	191	0,01	371	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	65 %	
Céréales	2712	11 %	828	0,31	1492	0,55	1711	4 %	1804	1,05	1807	1,06	0,60	0,93	0,75	0,82	28 %	
Soja	1113	5 %	864	0,78	831	0,75	444	1 %	1243	2,80	917	2,07	1,35	2,00	1,12	1,40	2 %	
Milieu humide	585	2 %					891	2 %										
TOTAL	24710	100 %	13090	0,53	23102	0,93	38648	100 %	18177	0,47	23872	0,62	0,49	2,39	0,74	2,30	33 %	

céréales à paille modélisés y demeurent approximativement 3 fois plus élevés que dans la portion aval. Cette différence dans les distributions des pertes de sol entre les secteurs amont et aval du bassin est, en grande partie, attribuable au gradient spatial de l'érosivité du relief. Rappelons que le bassin de la Rivière aux Brochets repose, au plan géomorphologique, à la jonction des paysages relativement plats des Basses-Terres du Saint-Laurent, avec les paysages vallonnés et montagneux du massif appalachien. Dans la portion amont du bassin, les terres agricoles sont cultivées sur une pente moyenne de 3 % (± 4 %), ce qui se traduit par des pertes de sol relativement plus élevées qu'en secteur aval, où la pente moyenne des champs cultivés est de l'ordre de 1 %.

Parallèlement aux propriétés du relief, l'occupation des sols est à la source d'un important gradient du taux d'érosion modélisé sur le parcellaire en culture. En fait, environ 50 % de l'érosion modélisée est associée à moins de 10 % de la superficie totale du bassin. La culture du maïs est associée aux pertes de sol simulées les plus élevées, suivi du soja et des zones urbaines. Alors que la culture du maïs ne couvre que 20 % de la superficie totale du bassin, elle demeure associée à 69 % des exportations totales de sédiments simulées pour l'ensemble du bassin (tableau 5). Cette importante contribution découle de la place prépondérante du maïs dans les rotations de culture du bassin. De plus, le facteur de couverture du sol (USLE C) utilisé par

l'équation MUSLE et associé à cette culture à grand interligne est relativement plus élevé que pour les autres cultures et exprime ainsi une couverture plus faible que la céréale à paille ou le soja.

Les moyennes pondérées pour la superficie en culture de maïs se situent respectivement à 1,13 et 3,29 t/ha pour les portions aval et amont du bassin. Les simulations de valeurs extrêmes de pertes de sol, associées à des concentrations de MES supérieures à 1 000 mg/L, contribuent cependant à hausser le bilan massique des exportations de sédiments à l'échelle du bassin. La forte dispersion dans les taux de pertes de sol modélisés tient en grande partie aux poids des facteurs de pente et d'érodabilité du sol, accordés par les algorithmes de l'équation MUSLE. À titre indicatif, les taux de pertes de sol modélisés en culture du maïs sont respectivement corrélés à 54 et 42 % avec l'inclinaison de la pente et l'indice d'érodabilité du sol (tableau 6).

Variation spatio-temporelle des pertes de phosphore

Pour l'ensemble de la période d'étude 2000-2003, SWAT estime le flux annuel moyen de P exporté vers le réseau hydrographique à 47 tonnes de phosphore (0,74 kg P/ha). Suivant la prise en charge du P par les composantes hydrodynamiques du modèle, la charge annuelle de P modélisée atteignant l'exutoire du bassin est de l'ordre de 44 tonnes. La différence,

environ 3 tonnes, correspond au bilan net de stockage et de re-largage du P dans le réseau hydrographique, et demeure tributaire du bilan sédimentaire relativement équilibré défini dans la composante hydrodynamique du modèle. Le flux net de P total vers la Baie Missisquoi modélisé dans le cadre de la présente étude est du même ordre que celui rapporté par Hegman *et al.* (1999) et qui a servi de balise au Groupe de travail Vermont Québec sur la réduction du phosphore (2000) dans la détermination des charges-cibles à la base de l'entente Vermont-Québec sur la réduction des apports de phosphore à la baie. Hegman *et al.* (1999) évaluent effectivement les charges de P en amont de la station hydrométrique de Bedford (drainant 89 % du bassin) à 36,4 tonnes dont 32,8 tonnes seraient associées au secteur agricole. En extrapolant cette charge à l'ensemble du bassin, l'estimation grimpe à 41 tonnes soit 0,64 t/ha. Hegman *et al.* (1999) ont basé leur estimation sur un coefficient de transport moyen du P diffus d'origine agricole fixé à 1,2 kg/ha. À titre indicatif, le coefficient moyen de transport du P modélisé dans le cadre de la présente étude pour l'ensemble du parcellaire en culture est de l'ordre de 0,83 kg/ha. Dans une perspective d'appui au processus décisionnel visant la réduction des apports de P à la Baie Missisquoi, les projections spatiales des flux de phosphore, supportées par la présente modélisation hydrologique, sont donc compatibles avec le cadre de référence établi par le Vermont et le Québec.

À l'instar des dynamiques d'exportation de sédiments, les exportations de phosphore modélisées dans SWAT sont très épisodiques. Les événements hydrologiques qui génèrent du ruissellement sont aussi associés aux épisodes d'exportations massives de sédiments et de phosphore (figure 3). Par exemple, à l'exutoire du bassin Intervention du Ruisseau Walbridge, la modélisation des exportations journalières de 2002 révèle que 80 % du phosphore a été exporté en 67 jours (17 % de l'année), principalement lors d'événements de ruissellement printaniers et automnaux hydrologiques importants. La nature épisodique des flux de P modélisés reflète les observations en bassins versants agricoles expérimentaux généralement rapportées dans la région (Michaud *et al.*, 2004a, b; Meals, 2004).

Globalement, les résultats de modélisation révèlent une prédominance de la forme particulaire (67 % du P total) du phosphore mobilisé sur l'ensemble du territoire du bassin de la Rivière aux Brochets. Cette spéciation concorde avec les observations en bassins versants expérimentaux de la région à l'étude (Michaud *et al.*; 2004) et ailleurs dans le Nord-Est américain (Sharpley *et al.*, 1992). Celles-ci témoignent d'une dominance des formes particulières de l'ordre de 60 à 90 % du P transporté par le ruissellement en milieu agricole. Un gradient dans les formes de phosphore modélisées, selon les usages du territoire (tableau 5), est cependant perceptible. Alors que les exportations

provenant des zones peu sensibles à l'érosion (verger/vigne, forêt, prairie/pâturage) sont dominées par les formes solubles du P, les zones en culture à interlignes exportent davantage de P particulaire.

À l'échelle des URH en culture, le modèle associe des flux spécifiques moyens de P relativement plus importants aux URH en culture de maïs (2,47 kg P/ha), suivie de la culture de soja (1,12 kg P/ha), de la céréale à paille (0,74 kg P/ha) et de la prairie (0,32 kg P/ha). Les simulations des exportations de P à l'intérieur de chacune des classes de culture sont cependant très variables. Similairement aux dynamiques d'érosion des sols, les caractéristiques physiques des paysages, notamment la pente des URH et la perméabilité des sols, sont à la source d'importants gradients des exportations de P, en secteur amont comme à l'aval du bassin versant de la Rivière aux Brochets (figure 4d).

Un aperçu des poids relatifs accordés par le modèle SWAT aux différents paramètres d'entrée du modèle pour exprimer la variabilité des flux de P est présenté au tableau 6. Ce dernier présente les corrélations linéaires entre certains paramètres d'entrée du modèle et le ruissellement, les flux de sédiments et de P solubles et particuliers modélisés pour les champs de maïs et de prairie. Globalement, les fractions soluble et particulaire des flux de P modélisés par le modèle apparaissent faiblement corrélées, en culture de maïs comme en prairie (tableau 6). Ces

prédictions contrastées dans la spéciation du P exporté témoignent de la capacité du modèle hydrologique à dissocier les processus d'enrichissement du ruissellement et à distinguer les influences respectives des facteurs liés au transport et aux sources terrestres de P biodisponible. En culture de maïs, l'exportation de P total modélisée demeure fortement corrélée avec le taux d'érosion simulé ($r = 0,94$; $p < 0,001$). La pente de l'URH ($r = 0,54$; $p < 0,001$) et l'érodabilité du sol ($r = 0,36$; $p < 0,001$) expliquent la majeure partie de la variabilité modélisée des exportations de P en culture du maïs. En prairie, la spéciation du P s'inverse et la fraction soluble compte alors pour 76 % des flux de P exporté. Les paramètres du modèle hydrologique pertinents à la biodisponibilité des sources de P, notamment l'apport de P, la richesse initiale du sol en P labile et le stock de P minéralisé dans la couche arable, contribuent alors à la plus grande part de la variabilité des exportations de P soluble simulées par le modèle hydrologique (tableau 6).

La figure 6a illustre les concentrations moyennes en P soluble et particulaire simulées pour l'ensemble des URH en culture du bassin versant pour la période 2000-2003. Bien que chaque classe de culture présente une forte variabilité dans les concentrations globales de P simulées, un contraste dans la spéciation des formes de P se détache de l'ensemble des observations à l'échelle de l'URH. Le modèle attribue ainsi l'essentiel des

Tableau 6. Matrice de corrélations linéaires simples entre les résultats de la simulation et certains paramètres d'entrée du modèle, à l'échelle de l'unité de réponse hydrologique (URH) en culture de maïs et de prairie.

Paramètres (2)	Résultats de la simulation hydrologique (flux exportés) (1)					Paramètres de modélisation				
	Fraction de phosphore					Apport de P	Richesse du sol en P	P minéralisé	Pente de l'URH	Érodabilité du sol
	Soluble	Particulaire	Total	Sédiments	Ruissellement					
P soluble		0,22***	0,27***	0,12**	0,56***	0,76***	0,26***	0,60***	NS	0,19***
P particulaire	0,08*		0,99***	0,94***	0,33***	0,12***	NS	0,17***	0,55***	0,35***
P total	0,98***	0,27***		0,94***	0,35***	0,15***	NS	0,19***	0,54***	0,36***
Sédiments	NS	0,95***	0,20***		0,30***	NS	NS	0,12*	0,57***	0,42***
Ruissellement	0,64***	0,38***	0,69***	0,37		0,15**	NS	NS	NS	0,36***
Apport de P	0,64***	-0,25***	0,57***	-0,31***	NS		0,10*	0,74***	0,10*	NS
Richesse du sol	0,31***	-0,20***	0,26***	-0,25***	NS	0,39***		NS	-0,15***	NS
P minéralisé	0,61***	-0,22***	0,54***	-0,30***	NS	0,97***	0,37***		0,16***	NS
Pente de l'URH	-0,38***	0,51***	-0,26***	0,57***	-0,12**	-0,46***	-0,46***	-0,42***		0,09*
Érodabilité du sol	0,21***	0,42***	0,28***	0,48***	0,41***	-0,13***	NS	NS	NS	

(1)  Unités de réponses hydrologiques en culture de maïs (N = 567)

 Unités de réponses hydrologiques en culture prairie (N = 690)

(2) ***, **, * : significatif au niveau de probabilité de 0,001, 0,01 et 0,05.

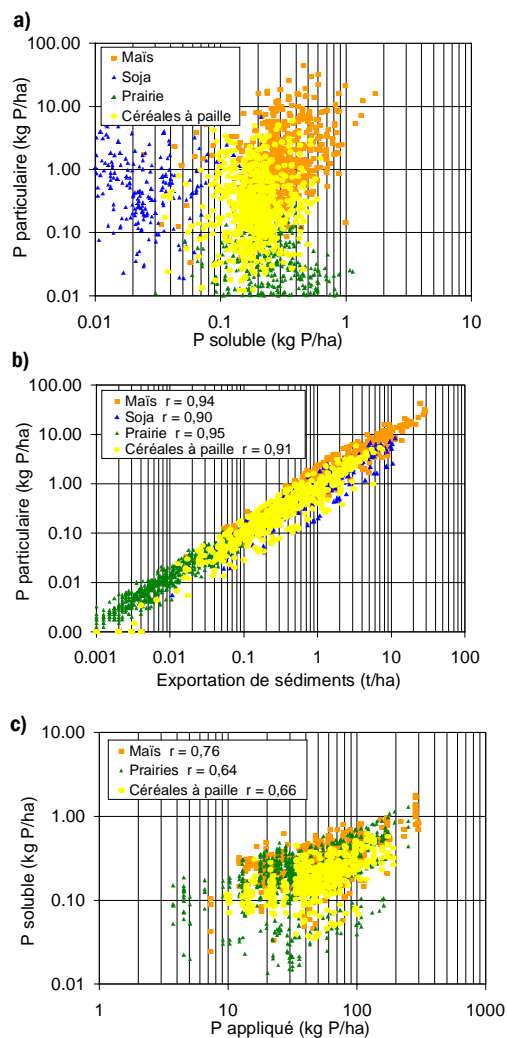


Figure 6. Distribution des richesses et formes de phosphore pour les lames d'eau simulées par le modèle hydrologique (a) taux d'exportation de phosphore particulaire simulé en fonction du taux d'érosion (b) et taux simulé d'exportation du phosphore soluble en fonction de l'apport de P (c) représenté à l'échelle de l'unité de réponse hydrologique par classe de culture.

exportations de la culture de soja aux formes particulières. Notons qu'aucun apport de P n'a été attribué à cette culture dans l'itinéraire technique de référence. Les routines terrestres du modèle puisent alors dans les stocks de P modérément et peu labile du sol pour supporter les besoins de la plante au cours de sa croissance. Peu de phosphore labile est alors disponible en surface du sol pour enrichir le ruissellement. La situation inverse se présente pour la prairie, où la forme soluble domine en raison de la stratification du phosphore dans le profil de sol suite aux apports de P, alors que la couverture végétale minimise le détachement et la mobilisation des

sédiments. Les cultures de céréales à paille et de maïs présentent pour leur part des spéciations variables du P exporté, reflétant les capacités du modèle à simuler l'interaction des facteurs source et transport dans la mobilité du phosphore. L'influence relative de ces facteurs, tel que simulé par le modèle hydrologique, est aussi mise en relief à la figure 6b. Pour l'ensemble des classes de culture, l'exportation de P particulaire est linéairement corrélée avec le taux d'érosion. L'exportation de P soluble modélisée au moment des événements de ruissellement est pour sa part fortement corrélée aux apports de P (figure 6c). Cette corrélation reflète l'interaction des routines terrestres et hydrologiques du modèle, alors que les apports de P enrichissent le stock de P labile en surface du sol, à son tour déterminant de la richesse du ruissellement en P soluble.

Ces tendances dans la spéciation soluble/particulaire des flux de P simulés sont cohérentes avec ce qui est généralement rapporté dans la littérature dans le cadre de dispositifs d'étude en parcelle naturelle ou en sol nu. Dans le cadre d'une étude sous simulation de pluie, réalisée sur des sols du bassin versant de la Rivière aux Brochets, Michaud et Laverdière (2004) ont démontré une variation de 2 à 80 % de la teneur en P soluble du ruissellement exporté d'un même type de sol en réponse à des traitements contrastés d'amendement et de couverture végétale.

Conclusion

L'intégration spatiale des attributs du paysage et des systèmes de productions agricoles de la Rivière aux Brochets a permis au modèle SWAT de reproduire avec satisfaction les exportations d'eau, de sédiments et de phosphore mesurées à l'exutoire des bassins Walbridge. Le recours à deux bassins de référence s'est avéré crucial pour différencier les paramètres de calage du modèle et pour tenir compte des paysages contrastés des portions amont et aval du bassin. La reproduction fidèle des périodes de récession des débits démontre la capacité du modèle à reproduire efficacement les flux souterrains. Malgré une réduction de l'ordre de 20 % des

numéros de courbes généralement proposés dans la littérature, la confrontation des résultats de SWAT aux mesures réalisées à l'échelle du champ révèle cependant une sous-estimation de l'écoulement dans les drains souterrains. Compte tenu de l'importance des transferts préférentiels de P rapportés au Québec, le développement des capacités prédictives de SWAT au niveau des écoulements aux drains demeure une priorité de recherche. Des efforts substantiels devraient par ailleurs être investis dans l'amélioration de la capacité du modèle à reproduire les épisodes de fonte de neige, responsables d'une portion importante des flux de sédiments et phosphore vers le réseau hydrographique dans les conditions climatiques propres au territoire à l'étude. La discrimination spatiale des paramètres de fonte et des caractéristiques du couvert nival à l'échelle du sous-bassin serait un atout important qui permettrait de considérer l'impact des gradients topographiques et d'utilisation du sol des grands bassins hétérogènes. Aussi, considérant les limites du modèle SWAT à reproduire la forme des précipitations (neige vs pluie) sur une base journalière, et l'importance de ce facteur sur l'hydrologie, la définition des quantités journalières de pluie et de neige par l'utilisateur augmenterait sensiblement l'ajustement du modèle en périodes hivernale et printanière.

Dans une perspective de gestion du territoire, les résultats de la modélisation sur les 2353 unités de réponses hydrologiques ont fourni une bonne représentation des gradients de l'activité hydrologique du territoire et des bilans en phosphore. Les flux de P modélisés à l'échelle des URH et des sous-bassins ont démontré une importante discrimination spatiale de la mobilité du P sous différents paysages agricoles. Cette discrimination spatiale des exportations de P offre une information de base dans l'évaluation des zones critiques reliées aux différents facteurs de source et de transport du phosphore. Le modèle SWAT, grâce aux scénarios d'interventions agroenvironnementales qu'il peut supporter, est un outil de gestion prometteur pour les utilisateurs québécois et américains impliqués dans la démarche de mise en valeur du bassin versant et de la Baie Missisquoi. Différents scénarios de pratiques de gestion alternative ont d'ailleurs été simulés à l'aide du

modèle calibré pour le territoire agricole du bassin de la Rivière aux Brochets. Les résultats de ces simulations, présentés dans un second article du présent numéro d'Agrosolution, permettent de quantifier de façon réaliste les exportations d'eau, de sédiments mais surtout de phosphore découlant de la mise en place d'interventions qui pourront mener à la réduction de 42 % des exportations de phosphore recherchée par l'entente entre le Québec et le Vermont.

Remerciements

Les travaux présentés dans cet article ont été rendus possible grâce au soutien financier du Fonds québécois de la recherche sur la nature et les technologies (FQRNT) et du Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) par le biais du projet OSMEDAL. Les auteurs tiennent à remercier François Godin et ses collègues du Centre d'expertise hydrique pour la coordination et le suivi du réseau hydrométrique. Ils tiennent également à remercier Richard Lauzier, Pierre Beaudet et Charles Savoie du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation, Martin Mimeault et Georges Gangbazo du ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs et Chantal D'Auteuil de la Corporation bassin versant Baie Missisquoi pour leur support technique et l'apport de données.



Source : Université de Sherbrooke

Cette étude est dédiée à la mémoire de Ferdinand Bonn. La générosité, la créativité et les qualités de rassembleur de Ferdinand ont été un ingrédient essentiel de ce projet, comme tant d'autres projets à travers le monde.

Références

- Arnold, J., M. Di Luzio, N. Sammons et R. Srinivasan. 2006. Soil and water assessment tool (SWAT). Consulté en ligne en 2006 à l'adresse : <http://www.brc.tamus.edu/swat/team.html>.
- Arnold, J.G. et N. Fohrer. 2005. SWAT2000 : Current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling. *Hydrological Processes*, vol. 19, pp. 563-572.
- ASCE Task Committee on definition of criteria for evaluation of watershed models of the watershed management Committee, Irrigation and Drainage Division. 1993. Criteria for evaluation of watershed models. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 119(3), pp. 429-442.
- Bernard, C. 1996. Estimation de l'érodabilité des principales séries de sol du Québec, à l'aide du nomographe de Wischmeier. *Agrosol*, vol. 9(2), p. 6-12.
- Bootsma, A., G. Tremblay et P. Fillion. 1999. Analyses sur les risques associés aux unités thermiques disponibles pour la production de maïs et de soya au Québec. *Bulletin technique CRECO*, No. de contribution 991396-F. Centre de recherches de l'Est sur les céréales et oléagineux, Direction générale de la recherche, Agriculture et Agro-alimentaire Canada. 38 p.
- Cann, D.B., P. Lajoie et P.C. Stobbe. 1946. Étude des sols des comtés de Shefford, Brome et Missisquoi dans la province de Québec. #3M-10358-12-47. Service des fermes expérimentales, Ministère fédéral de l'agriculture, en collaboration avec le Ministère de l'agriculture du Québec et le Collège Macdonald, Université McGill. 94 p.
- Cattaï, J. 2004. La détection de contours dans l'approche stratifiée par champ pour la classification d'un milieu agricole à l'aide de données Landsat TM. Cas du bassin versant de la Rivière aux Brochets, sud du Québec. Mémoire de maîtrise de l'Université de Sherbrooke, Département de géographie et télédétection, Faculté des lettres et sciences humaines. 120 p.
- Deslandes, J., A. R. Michaud et F. Bonn. 2002. Use of GIS and remote sensing to develop indicators of phosphorus non-point source pollution in the Pike River basin. Dans: *Lake Champlain: Partnerships and Research in the New Millennium*. T.O. Manley, P.L. Manley et T.B. Mihuc (eds.). Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, NY, United States. pp. 271-290.
- Di Luzio, M., R. Srinivasan, J.G. Arnold, S.L. Neitsch. 2002. Arcview interface for SWAT2000 User's guide. Texas Agricultural Experiment Station and USDA Agricultural Research Service, BCR Report 02-07, 345 p.
- Enright, P. et C.A. Madramootoo. 2004. Phosphorus losses in surface runoff and sub-surface drainage waters on two agricultural fields in Quebec. In: *Drainage VIII - Proceedings of the Eight International Drainage Symposium*. Published by ASAE, St. Joseph, MI, USA. pp. 160-170.
- Financière agricole du Québec. 2006. L'état des cultures. Consulté en ligne en 2006 à l'adresse : <http://www.financiereagricole.qc.ca/index.php?id=990>.
- Groupe de travail Vermont-Québec sur la réduction du phosphore. 2000. Partage des responsabilités entre le Québec et le Vermont pour la réduction des charges de phosphore dans la Baie Missisquoi, présenté au Comité directeur du Lac Champlain, 23 p.
- Hegman, W., D. Wang, and C. Borer. 1999. Estimation of Lake Champlain basinwide nonpoint source phosphorus export. Technical Report No. 31. Lake Champlain Basin Program. Grand Isle, Vermont, 69 p.
- Knisel, W.G. 1980. CREAMS, a field scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems. USDA Conservation Research Report. No. 26, 643 p.
- LCBP (Lake Champlain Basin Program). 2004. Nature of the Basin. Lake Champlain Basin Atlas. LCBP, Grand Isle, Vermont. Consulté en ligne en 2006 à l'adresse : http://www.lcbp.org/ATLAS/HTML/nat_region.htm.
- Lenhart, T., K. Eckhardt, N. Fohrer et H.-G. Frede. 2002. Comparison of two different approaches of sensitivity analysis. *Physics and Chemistry of the Earth*, vol. 27, pp. 645-654.

- Leonard, R.A., W.G. Knisel, and D.A. Still. 1987. GLEAMS: Groundwater loading effects on agricultural management systems. *Trans. ASAE*, vol. 30(5), pp. 1403-1428.
- MDDEP (Ministère du Développement durable, Environnement et Parcs du Québec). 2005. Le réseau hydrométrique québécois 1998 à 2003. Disponible en ligne : <http://www.cehq.gouv.qc.ca/hydrometrie/reseau/index.htm>.
- Meals, D.W. 2004. Water quality improvements following riparian restoration in two Vermont agricultural watersheds. In: *Lake Champlain: Partnerships and Research in the New Millennium*. T.O. Manley, P.L. Manley and T.B. Mihuc (Eds.). Kluwer Academic/Plenum Pub., New York, NY, United States, pp. 81-95.
- Medalie, L. et E. Smeltzer. 2004. Status and trends of phosphorus in Lake Champlain and its tributaries, 1990-2000. In: *Lake Champlain: Partnerships and Research in the New Millennium*. T.O. Manley, P.L. Manley and T.B. Mihuc (Eds.). Kluwer Academic/Plenum Pub., New York, NY, United States, pp. 191-219.
- Mehlich, A. 1984. Mehlich 3 soil test extractant: a modification of Mehlich 2. *Communications of Soil Science and Plant Analysis*, vol.15, pp. 1409-1416.
- Michaud, A. R., I. Beaudin, J. Deslandes, F. Bonn et C.A. Madramootoo. 2006. Variabilité spatio-temporelle des flux de sédiments et de phosphore dans le bassin versant de la Rivière aux Brochets, sud du Québec. Partie II - Évaluation de l'effet de scénarios agroenvironnementaux alternatifs à l'aide de SWAT. *Agrosolution*, vol. 17(1) 21-32.
- Michaud, A. R., J. Deslandes et J. Desjardins. 2004a. Rapport final : Réseau d'actions concertées en bassins versants agricoles, Projet de recherche et de développement présenté au Fonds d'action québécois pour le développement durable et son partenaire financier le Gouvernement du Québec (Projet no. 212). IRDA, Québec, 100 p. Disponible en ligne à l'adresse : <http://www.agrireseau.qc.ca/agroenvironnement/documents/Rapport%20final.pdf>
- Michaud, A.R., R. Lauzier et M.R. Laverdière. 2004b. Temporal and spatial variability in nonpoint source phosphorus in relation to agricultural production and terrestrial indicators: the Beaver Brook case study. In: *Lake Champlain: Partnerships and Research in the New Millennium*. T.O. Manley, P.L. Manley and T.B. Mihuc (Eds.). Kluwer Academic/Plenum Pub., New York, NY, United States, pp. 97-121.
- Michaud, A.R., R. Lauzier et M.R. Laverdière. 2005. Mobilité du phosphore et intervention agroenvironnementale en bassin versant agricole : Étude de cas du Ruisseau au Castor, tributaire de la Rivière aux Brochets, Québec. *Agrosol*, vol. 16(1), p. 47-59.
- Michaud, A.R., R. Lauzier et M.R. Laverdière. 2002. Description du système de transport du phosphore dans le bassin versant du Ruisseau au Castor. *Agrosol*, vol. 13(2), p. 124-139.
- Michaud, A.R. et M.R. Laverdière. 2004. Cropping, soil type and manure application effects on phosphorus export and bioavailability. *Canadian Journal of Soil Science*, vol. 84, pp. 284-295.
- Mimeault, M. 2002. Mise en valeur de la Baie Missisquoi et du Lac Champlain. *Agrosol*, vol. 13(2), p. 92-96.
- Murphy, J. et J.R. Riley. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphates in surface waters. *Anal. Acta*, Vol. 27, pp. 31-36.
- Neitsch, S.L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry, J.R. William et K.W. King. 2002. Soil and water assessment tool theoretical documentation. Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service, Texas, 458 p.
- Neitsch, S.L., J.G. Arnold et R. Srinivasan. 2002. Pesticides fate and transport predicted by the soil and water Assessment tool (SWAT) : Atrazine, Metolachlor and Trifluralin in the Sugar Creek watershed. Grassland, Soil & Water Research Laboratory, USDA-ARS, Blackland Research Center, Texas, BRC Publication No. 2002-03, 96 p.
- Perrone, J. et C.A. Madramootoo. 1998. Improved curve number selection for runoff prediction, *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 25, pp. 728-734.
- Saleh, A., J.G. Arnold, P.W. Gassman, L.M. Hauck, W.D. Rosenthal, J.R. Williams et A.M.S. McFarland. 2000. Application of SWAT for the upper north Bosque river watershed. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, vol. 43(5), pp. 1077-1087.
- Santhi, C., J.G. Arnold, J.R. Williams, W.A. Dugas, R. Srinivasan et L. M. Hauck. 2001. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *AWRA No. 00044*, vol. 37(5), pp. 1169-1188.
- Sharpley, A.N., C.A. Jones, C. Gray et C.V. Cole. 1984. A simplified soil and plant phosphorus model: II prediction of labile, organic and sorbed phosphorus. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 48, pp. 805-809.
- Sharpley, A.N., S.J. Smith, O.R. Jones, W. A. Berg et G. A. Coleman. 1992. The transport of bioavailable phosphorus in the agricultural runoff. *Journal of Environmental Quality*, vol. 21(1), pp. 30-35.
- Sharpley, A.N., Troeger, W.W. et S.J. Smith. 1991. The measurement of bioavailable phosphorus in agricultural runoff. *Journal of Environmental Quality*, vol. 20, pp. 235-238.
- Spruill, C.A., S.R. Workman et J.L. Taraba. 2000. Simulation of daily and monthly stream discharge from small watersheds using the SWAT model. *Transactions of American Society of Agricultural Engineers*, vol. 43(6), pp. 1431-1439.
- Tabi, M., Tardif, L., Carrier, D., Laflamme, G. et M. Rompré. 1990. Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec - Région agricole 6, Richelieu, Saint-Hyacinthe. Gouvernement du Québec, Publication no. 91-0025. Québec, Canada, 199 p.

- Thériault, J.-E., L. Choinière, E. Pageau et H. Talbot. 1943. Carte des sols du comté d'Iberville. Service de la grande culture du Ministère de l'agriculture et Service de la cartographie économique du Ministère de l'industrie et du commerce, Québec, QC, Canada.
- Tolson, B.A. et C.A. Shoemaker. 2004. Watershed modeling of the Cannonsville basin using SWAT2000: Model development, calibration and validation for the prediction of flow, sediment and phosphorus transport to the Cannonsville reservoir. Version 1.0. Technical Report, School of Civil and Environmental Engineering, Cornell University, 159 p.
- Tran, T.S. et M. Giroux. 1990. Relation entre les propriétés du sol et la disponibilité du phosphore à la plante. *Agrosol*, p. 7-12.
- U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service. 1972. National Engineering Handbook, Hydrology Section 4, Chapters 4-10.
- Van Griensven A. et W. Bauwens. 2005. Application and evaluation of ESWAT on the Dender basin and the Wister Lake Basin. *Hydrological Processes*, vol. 19, pp. 827-838.
- Walker, W. 1998. Flux, Stream loads computations, version 5.0. Environmental laboratory USAE Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, United States.
- Wang, D., S.N. Kevine, D.W. Meals, Jr., J.P. Hoffman, J.C. Drake et E.A. Cassell. 1999. Importance of instream nutrient storage to P export from a rural eutrophic river in Vermont, USA. *In: Lake Champlain in Transition: From Research toward Restoration*. Water Science and Application 1. American Geophysical Union, pp. 205-224.
- White, S., I. Beaudin, J. Hollis, S. Hallett et F. Worrall. 2002. TERRACE – Terrestrial runoff modelling for risk assessment of chemical exposure, year two report, version 2.1. Cranfield University at Silsoe, Silsoe, Beds., Royaume-Uni.
- Williams, J.R., C.A. Jones et P.T. Dyke. 1984. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Transactions of the ASAE*, vol. 27(1), pp. 129-144.
- Williams, J.R., A. D.Nicks, et J.G. Arnold. 1985. Simulator for water resources in rural basins. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 111(6), pp. 970-986.
- Wischmeier W.H., C.B. Johnson et B.V. Cross. 1971. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *Journal of Soil and Water Conservation*, vol. 26(5), pp. 189-192.