

Mobilité du phosphore et intervention agroenvironnementale en bassin versant agricole : Étude de cas du ruisseau au Castor, tributaire de la rivière Aux Brochets, Québec

*A. R. Michaud¹, R. Lauzier² et M. R. Laverdière¹

Résumé, *A. R. Michaud¹, Richard Lauzier² et M. R. Laverdière¹. **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*. 16 (1) : 47-60.** La mobilité du phosphore (P) dans le bassin versant du ruisseau Au Castor, un tributaire agricole (11 km²) de la rivière aux Brochets, a fait l'objet d'une analyse mettant en relation les débits et la qualité de l'eau mesurés à l'exutoire avec les caractéristiques des systèmes de production agricole et du paysage. Parallèlement au suivi agroenvironnemental, le bassin versant a fait l'objet d'une action concertée des propriétaires riverains, ciblée sur le contrôle du ruissellement de surface au moyen de structures de captage, l'aménagement systématique de bandes riveraines le long de la branche principale du ruisseau, de même que de la mise à jour des programmes de fertilisation et des modes de gestion des engrais de ferme. Malgré une importante variabilité inter-annuelle dans le comportement hydrologique du bassin versant, l'analyse de covariance des concentrations en phosphore indique une réduction significative de 25 % des concentrations en P total en période de crues du ruisseau entre la période de référence (1997-1999), précédant les interventions agroenvironnementales et deux périodes successives d'évaluation (1999-2001 et 2001-2003). L'influence des aménagements sur la dynamique du ruissellement et la mobilité du P est associée au laminage des crues engendrant le ruissellement de surface et au bris de la connectivité hydrologique entre les champs agricoles et le ruisseau. L'action complémentaire des bandes riveraines et des structures de captage aurait ainsi favorisé l'écoulement hypodermique et la sédimentation du P particulaire en amont du réseau hydrographique.

Mots clés : Phosphore, pollution diffuse, bassin versant, ruissellement, érosion, ripisylve, bandes riveraines.

Abstract, *A.R. Michaud¹, R.Lauzier² and M.R. Laverdière². **Phosphorus mobility and best management practices: Beaver Brook case study, Pike River, Quebec. *Agrosol*. 16 (1): 47-60.** The mobility of phosphorus within Beaver Brook, a small agricultural watershed (11 km²), tributary to Pike River, was described through hydrometric and water quality monitoring in relation to production systems and landscape descriptors. In parallel to agri-environmental monitoring, best management practices were implemented throughout most hydrologically active areas of watershed, including systematic implementation of riparian buffers and catch basins along stream main channel, as well as nutrient and manure management plan updates. Despite an important inter-annual variability in hydrological conditions, covariance analysis of phosphorus concentration in surface water, using stream flow rate as covariate, indicated a 25% reduction in flow-weighted total P levels during peak runoff events from a reference period (1997-1999) to successive assessment periods 1999-2001 and 2001-2003. Improvement in water quality is linked to attenuation of peak surface runoff activity and breaks in hydrological connectivity between fields and stream. Resulting hypodermic flow and sedimentation of particular P is indebted to complementary action of riparian buffer strips and structural runoff management.

Key words: Phosphorus, non-point source pollution; watershed, runoff, erosion, riparian zone, buffer strip.

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

*Auteur pour la correspondance : téléphone : (418) 644-6884, télécopieur : (418) 644-6855, Courriel : aubert.michaud@irda.qc.ca

2. Direction régionale de la Montérégie, Secteur Est, ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec

Introduction

L'augmentation des concentrations en phosphore (P) dans les eaux de la baie Missisquoi contribue à la prolifération de fleurs d'eau de cyanobactéries en période estivale. Les taux élevés de cyanobactéries totales, la proportion majeure de cyanobactéries à potentiel toxique de même que les fortes concentrations mesurées en microcystine-LR dans les eaux de la baie présentent des risques pour la santé des usagers du plan d'eau (Blais 2002). La détérioration de la qualité de l'eau a ainsi provoqué la fermeture des plages publiques depuis les quatre dernières années. Parallèlement aux enjeux récréo-touristiques, la baie Missisquoi est la source d'eau potable d'un vaste bassin de population comprenant les municipalités de Bedford et le secteur Philipsburg de la municipalité de Saint-Armand. Reconnaissant la sévérité de la problématique environnementale, les gouvernements du Québec et du Vermont ont signé en 2002 une entente sur la réduction des apports de phosphore à la baie Missisquoi (Québec et Vermont, 2002) par laquelle les signataires s'engagent à réduire les charges de phosphore selon un partage de responsabilité imputant 60 % de la réduction des apports de P au Vermont et 40 % au Québec. La charge cible du Québec est ainsi fixée à 38,9 t P an⁻¹. Cette réduction des exportations de P dans la baie devrait y ramener la concentration moyenne en PTOT d'un niveau actuel de 35 µg P L⁻¹ au critère-cible de 25 µg PL⁻¹, de façon à soustraire les eaux de la baie au processus d'eutrophisation. L'effort de réduction des charges de P se situe ainsi à environ 41 % des charges annuelles de P. Cet objectif, interpelle particulièrement le monde agricole, dans la mesure où environ 80 % du phosphore de sources diffuses exporté annuellement dans la baie Missisquoi est attribué à l'agriculture, qui occupe 26 % du territoire du bassin versant de la baie (Hegman et al. 1999).

Plusieurs projets de recherche ont été réalisés dans la région en appui aux initiatives communautaires de mise en valeur de la rivière Aux Brochets, principal tributaire de la Baie Missisquoi en territoire québécois. La nature multidisciplinaire

des travaux et la diversité des échelles d'étude ont permis de développer une meilleure compréhension de la dynamique globale du phosphore dans les systèmes de production agricole, les sols et l'écosystème aquatique du bassin versant. Dans le cadre d'études en parcelles sous pluie simulée, Michaud et Laverdière (2004) ont lié l'érodabilité du sol, son enrichissement en P et l'apport récent d'engrais de ferme, aux concentrations et à la bio-disponibilité du P dans le ruissellement de surface. Enright et Madramootoo (2004a) ont caractérisé la mobilité du P dans le ruissellement de surface et les drains souterrains de deux champs de la région. Bien que le drainage souterrain ait été le principal exutoire des eaux, contribuant en moyenne pour 81 % du volume exporté hors de la parcelle, le ruissellement de surface contribuait en moyenne à 60 % des exportations de P en raison d'une concentration moyenne en cet élément de plus de dix fois supérieure à celle observée dans les drains. Dans le cadre d'une étude de bassins versants jumeaux (6-8 km²) du ruisseau Walbridge, tributaire de la rivière aux Brochets, Duguet et al. (2002) ont montré la répartition hétérogène des zones hydrologiquement actives à l'échelle du bassin. Michaud et al. (2004a) ont aussi décrit l'influence de ce paysage sur les régimes d'exportation du P. À l'échelle du bassin versant de la rivière aux Brochets (630 km²), principal contributeur en P à la baie Missisquoi en territoire québécois, Deslandes et al. (2002) ont généralisé la production d'indicateurs agroenvironnementaux de la mobilité du P. La vocation agricole du territoire, la position des sous-bassins dans le relief, le bilan des apports et l'enrichissement des sols en P ont expliqué la variabilité spatiale des concentrations en P de 18 sous-bassins lors de crues du réseau hydrographique. Le système d'information à référence spatiale développé dans le cadre de ce projet, combiné aux suivis des écosystèmes aquatiques des bassins expérimentaux des ruisseaux Au Castor et Walbridge, a supporté la modélisation de la mobilité du P à l'échelle du bassin versant de la rivière aux Brochets (Beaudin et al. 2004) au moyen du modèle hydrologique SWAT (Soil and water assesment tool) (Arnold et al. 1998).

La présente étude porte sur le bassin versant du ruisseau Au Castor, tributaire agricole (11 km²) de la portion aval de la rivière aux Brochets. Caumartin et Vincent (1994) attribuaient à ce bassin agricole une vulnérabilité relativement élevée aux exportations de P, comparative-ment aux autres tributaires de la rivière aux Brochets. Michaud et al. (2004c) ont mis en relation de la qualité de l'eau observée dans les branches et le tronçon principal du ruisseau avec différents descripteurs des systèmes de production agricole et du paysage. La variabilité spatiale des exportations de P s'est avérée contrôlée, de façon dominante, par des facteurs géophysiques prédisposant à la production de ruissellement de surface. Dans le but de limiter l'action du ruissellement et le transport de sédiments au cours d'eau, la Coopérative de solidarité de la rivière aux Brochets et le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ), ont coordonné un aménagement hydro-agricole intégré de la portion du bassin versant la plus vulnérable à la production de ruissellement de surface, comportant l'implantation de bandes riveraines arbustives et de structures de captage.

Les zones tampon de végétation pérenne constituent des infrastructures agroenvironnementales dont l'efficacité a largement été démontrée en parcelles expérimentales au Québec (Duchemin et Majdoub 2004) et ailleurs dans le Nord-Est américain (Lawrence et al. 2002). Cependant, peu d'études ont documenté l'effet de tels aménagements sur la qualité de l'eau à l'échelle du bassin versant. Meals (2000) a documenté une amélioration tangible de la qualité de l'eau, dans de petits bassins versants laitiers du Vermont, suite à l'implantation de bandes riveraines et au retrait de l'accès des animaux au cours d'eau. Au Québec, la haute densité de cours d'eau aménagés à des fins agricoles, de même que le cadastre allongé et étroit des terres, généralement dans le sens du gradient topographique, fait en sorte que la majeure partie du parcellaire en culture ne s'égoutte pas vers les rives de cours d'eau, mais se concentre plutôt vers les raies de curage et le réseau de fossés

(Michaud et al. 2004b). La convergence des patrons d'écoulement du ruissellement de surface réduit par ailleurs considérablement le piégeage des sédiments et nutriments par les bandes riveraines (Helmers et al. 2005). Les pratiques culturales anti-érosives et les ouvrages de contrôle du ruissellement constituent dès lors des compléments essentiels aux bandes riveraines en favorisant l'infiltration de l'eau dans la couche arable, le morcellement de la lame de ruissellement, le laminage des crues et la sédimentation en amont du réseau hydrographique. L'objectif de la présente étude est d'évaluer l'effet des interventions agroenvironnementales mises en oeuvre dans le bassin versant du ruisseau Au Castor sur l'exportation du P à l'exutoire du bassin.

Méthodologie

Description du site d'étude

Le bassin versant de ruisseau Au Castor couvre une superficie de 11 km², essentiellement dédiée à la production agricole. Le maïs-grain, les céréales à paille, les plantes fourragères et le soya sont cultivés en rotation sur les 305 parcelles exploitées dans le bassin versant (figure 1b). Globalement, le bilan des apports moyens en P pondéré pour la superficie du bassin est de l'ordre de 10,6 kg-P/ha. Ce bilan modéré reflète la vocation laitière et céréalière du bassin, alors que l'apport en P en provenance des engrais de ferme demeure inférieur au prélèvement des cultures. Les échantillonnages composites de l'ensemble du parcellaire du bassin révèlent qu'environ le tiers des parcelles avaient atteint en 1999 le seuil de vulnérabilité de 10 % (Mehlich-3 P/Al), alors que le seuil critique de 20 % était atteint par 6 % d'entre elles (Michaud et al. 2002). Les saturations en P des sols reflètent essentiellement le cumul, dans le temps, des apports excédentaires d'engrais de ferme liés aux contraintes historiques de disponibilité des superficies d'épandage dans le secteur Est du bassin, soit les sous-bassins n° 5, 6 et 7 (figure 1a).

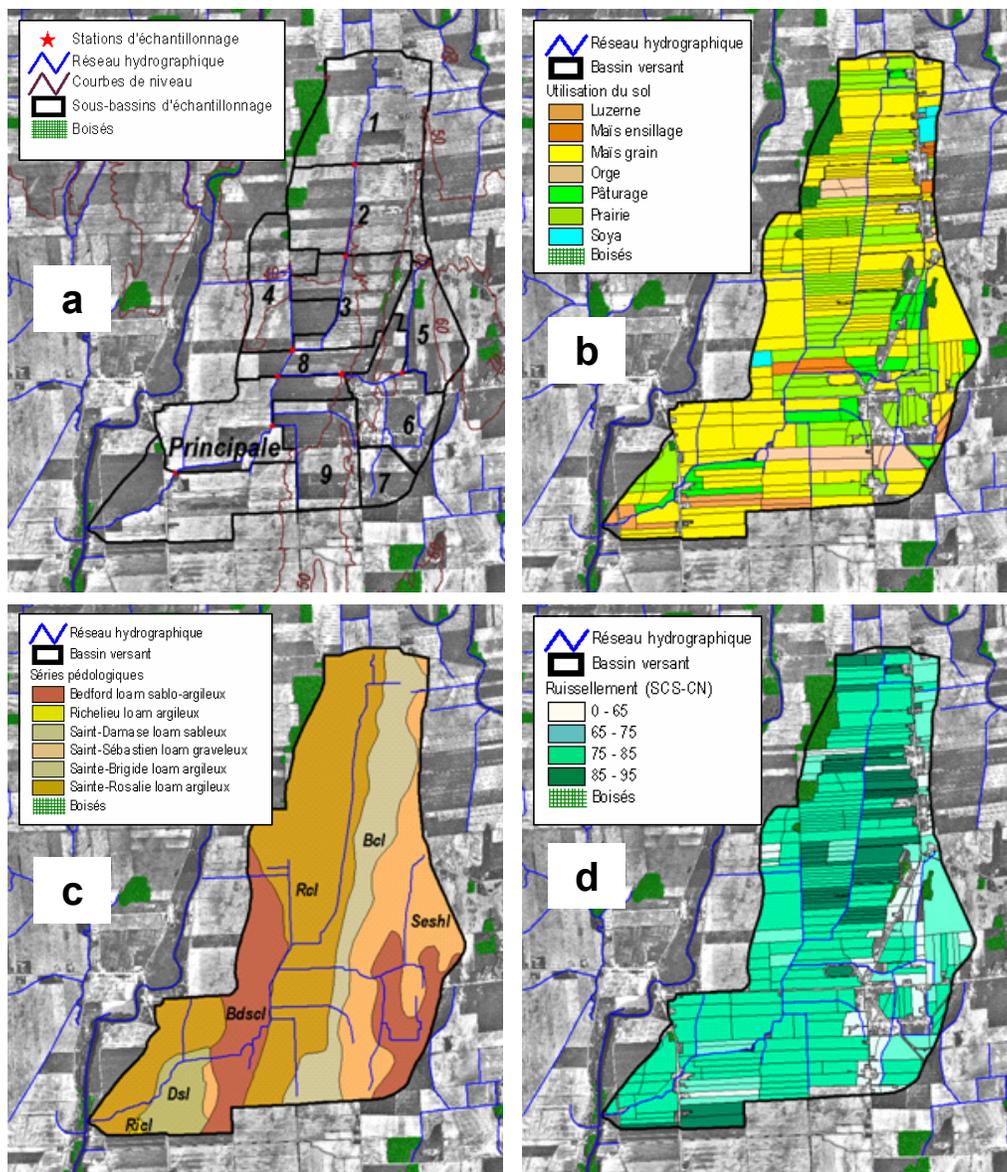


Figure 1. Caractéristiques biophysiques du bassin versant du ruisseau Au Castor : relief et sous-bassins hydrographiques (a), utilisation du sol (b), pédologie (c) et indices de ruissellement estimés selon la méthode CN-SCS (d).

Au plan géophysique, le bassin versant est situé aux confins de la plaine des basses-terres du Saint-Laurent. Le paysage légèrement ondulé présente un gradient longitudinal d'élevation favorisant le secteur Est du bassin. Les sols de la région à l'étude ont été décrits et cartographiés par Cann et al. (1948). Les argiles d'origines marine et lacustre, représentées par les sols de la série Sainte-Rosalie, occupent les positions basses du relief, longeant le cours d'eau principal (figure 1c). En position légèrement surélevée

dans le relief, les séries de sol Sainte-Brigide et Bedford développées sur tills calcaires présentent une topographie légèrement ondulée. Enfin, les tills bien égouttés sur fond de schistes argileux et d'ardoise, dont fait partie la série de sol Saint-Sébastien, occupent les positions les plus élevées du relief. L'ensemble du réseau hydrographique du bassin versant, a été aménagé afin de permettre le drainage souterrain des terres, implanté sur 52 % de la superficie cultivée du bassin. Les indices de

ruissellement calculés par la méthode CN-SCS (Monfet 1979) pour l'ensemble du parcellaire en culture sur la base d'une intégration spatiale des données de relief, de drainage souterrain et de type de sol, sont illustrés en figure 1d.

Interventions agroenvironnementales

Dans le cadre de la présente étude, la détection de l'effet des interventions agroenvironnementales sur la mobilité du P est fondée sur la comparaison des mesures de la qualité de l'eau observée en période de référence, précédant la mise en oeuvre des interventions agroenvironnementales (1997-1999), aux mesures acquises lors de deux périodes successives d'évaluation (1999-2001 et 2001-2003), suivant l'implantation des aménagements hydro-agricoles. Des structures de captage ont systématiquement été installées à la confluence des fossés avec la branche principale du ruisseau dans la portion la plus *hydro-active* du parcellaire, en raison d'une position basse dans le relief et non drainé souterrainement (figure 2). Trente-cinq embouchures de fossés ont ainsi été comblées et aménagées par la Coopérative de solidarité du bassin-versant de la rivière aux Brochets, la plupart au cours de l'été 1999 et 2000. La stabilisation d'une cinquantaine de foyers d'érosion en rive et l'implantation d'une bande riveraine arbustive sur 4 kilomètres le long de la branche principale du ruisseau ont complété l'aménagement hydro-agricole du bassin (figure 3).

Au plan de la gestion des sols et des cultures, l'échantillonnage systématique des sols du bassin versant durant la période de référence a fourni les bases agronomiques pour une mise à jour des plans de fertilisation des 24 entreprises agricoles du bassin versant. Les taux d'épandage des engrais de ferme ont été ajustés au besoin agronomique des cultures, suite à l'étalonnage des épandeurs utilisés par les entreprises participant au projet. L'examen des données de recensement agricole pour la période d'étude (MAPAQ 1997, 2000, 2003) a démontré que le profil des productions animales des entreprises agricoles est demeuré relativement stable dans le bassin versant au cours de cette période. L'importance relative de la production fourragère dans les rotations de culture a cependant baissé au fil des ans, au profit des cultures annuelles. Globalement, la production fourragère de l'ensemble des propriétaires du bassin versant représentait 32 % des superficies totales en production en 1997, alors qu'elle ne comptait plus que pour 23 % des superficies en 2003.

Suivi hydrométrique et qualité de l'eau

La période de caractérisation hydrométrique et géochimique des eaux du ruisseau couvre six années hydrologiques, soit d'octobre 1997 à septembre 2003. Les précipitations liquides ont été jaugées en continu au moyen d'un pluviographe localisé dans la partie centrale du bassin. Les précipitations hivernales ont été obtenues des stations gouvernementales de Philipsburg et Farnham (MENV 2003). Le jaugeage hydrométrique à l'exutoire du bassin a été supporté par l'aménagement d'un déversoir en « V » et l'enregistrement continu de la hauteur de l'eau par un limnimètre de type bulle-à-bulle. La courbe de tarage hauteur-débit a été établie sur la base de mesures des débits effectuées au moulinet et d'une modélisation supportée par le logiciel BDH développé par le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ, 2000).

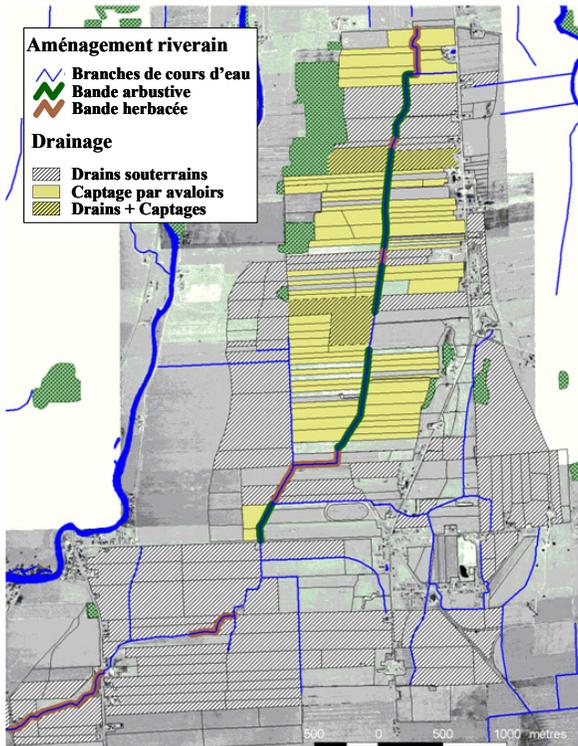


Figure 2. Cartographie des aménagements hydro-agricoles réalisés sur le bassin versant du ruisseau Au Castor.

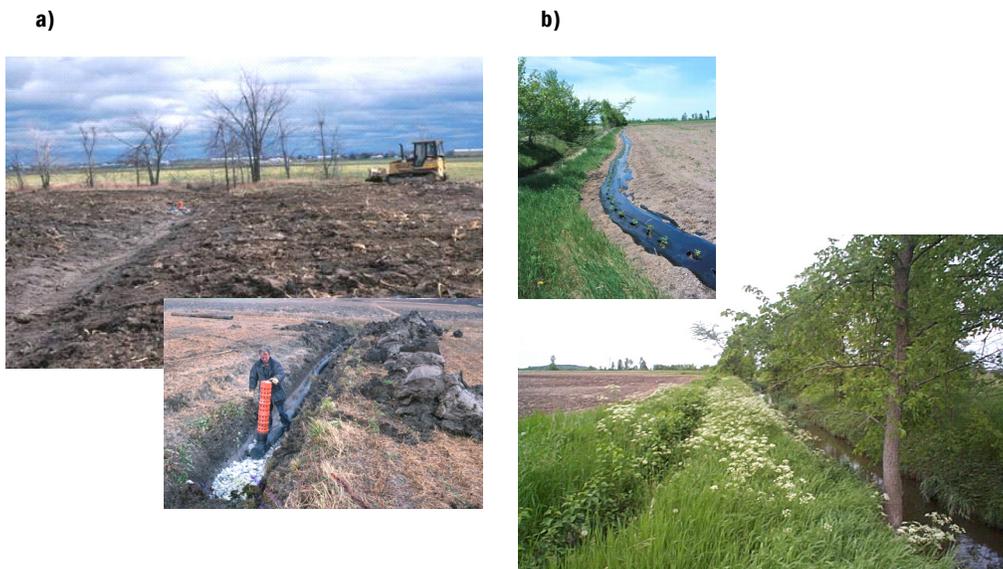


Figure 3. Structure de captage aménagée à l'exutoire d'un fossé tributaire de la branche principale du ruisseau Au Castor (a) et bande riveraine arbustive (b) implantée le long du même cours d'eau.

Le suivi de qualité de l'eau à l'exutoire du bassin versant a été supporté par le prélèvement de 250 échantillonnages ponctuels répartis sur les six années hydrologiques à l'étude, soit 110 échantillons prélevés au cours de la période de référence (1997-1999) et respectivement 76 et 74 pour les périodes d'évaluation 1999-2000 et 2001-2003. Le protocole d'échantillonnage a favorisé la collecte d'échantillons lors d'évènements de précipitation ou de fonte des neiges provoquant une hausse sensible du débit du ruisseau. Le prélèvement d'au moins trois échantillons était alors supporté pour chaque évènement hydrologique, préférablement de part et d'autre de la pointe de crue. Les échantillons d'eau ont été conservés à une température inférieure à 4 °C jusqu'à ce qu'ils soient analysés au laboratoire de physico-chimie de l'IRDA. Les matières en suspension (MES) ont été quantifiées par filtration (< 0,45 µm) ou centrifugation. Les concentrations de P réactif soluble (PRS) et total (PTOT) 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 filtration (< 0,45 µm) et minéralisation au persulfate. Les teneurs en calcium (Ca) en solution ont été dosées à l'aide d'un spectrophotomètre au plasma suivant la centrifugation des échantillons.

Analyses statistiques

La série de mesures hydrométriques et de qualité de l'eau couvrant l'ensemble de la période d'étude 1997-2003 a été segmentée en trois périodes comportant chacune deux années hydrologiques complètes débutant le 1^{er} octobre et se terminant le 30 septembre. Une transformation logarithmique a été appliquée à l'ensemble des données de concentration et de débits de façon à assurer une distribution normale des observations précédant les analyses statistiques en mode linéaire.

Les modélisations des relations concentration-débit (C/Q) et des flux de MES, PRS, PTOT et Ca ont été supportées par le

logiciel Flux 5.0 (Walker 1998) pour chacune des trois périodes d'étude. Une stratification selon trois strates de débits décrites par Michaud et al. (2004c), représentatives de régimes d'écoulement de base ($Q < 0,6 \text{ mm jr}^{-1}$), de lames d'eau élevées ($0,6 \text{ mm jr}^{-1} < Q < 3,3 \text{ mm jr}^{-1}$) et de crues ($Q > 3,3 \text{ mm jr}^{-1}$), ont été retenues pour les modélisations. La procédure de validation croisée, reconnue pour produire des estimateurs sans biais pour différentes pentes C/Q (Walker 1987), a été utilisée pour estimer la variance de l'erreur. L'examen des résidus des régressions de l'ensemble des paramètres a démontré que ceux-ci étaient indépendants du débit, de la date, de la saison de même que des valeurs de concentrations et de flux. Trois observations aberrantes de concentration en PRS et six observations de concentration en Ca ont été détectées au seuil de 5 % et ont été retranchées de la banque de données utilisée pour la modélisation des flux.

La détection de l'effet des interventions agroenvironnementales sur la qualité de l'eau du ruisseau a été supportée par une analyse de covariance (ANCOVA) comparant les concentrations de MES, PRS, PTOT et Ca observées en période de référence aux deux périodes successives d'évaluation, et utilisant le débit du cours d'eau à l'exutoire en co-variable. Suivant cette approche inspirée de Grabow et al. (1999), seules les observations associées aux strates de débits élevés et aux crues ($Q > 0,6 \text{ mm jr}^{-1}$) ont été retenues en raison des relations C/Q positives des paramètres PT, PRS et MES. La procédure PROC MIXED du système SAS (2000) a été utilisée pour comparer les régressions C/Q des paramètres PT, PRS, MES et Ca. La procédure réalisée en trois étapes successives a consisté à :

- 1) d'abord vérifier que les pentes de régression C/Q des trois périodes à l'étude étaient toutes différentes de la valeur nulle;
- 2) tester l'égalité des pentes de régression C/Q pour les trois périodes à l'étude;

Compte tenu de l'égalité des pentes de régression C/Q des paramètres PT, PRS, MES et Ca estimées pour les trois périodes

à l'étude, un modèle réduit a été retenu pour l'ANCOVA, où la dépendance des paramètres de qualité de l'eau par rapport au débit est exprimée par :

$$\log[CP_{ij}] = a_0 + a_i + b(\log Q_{ij}) + e_{ij}$$

où :

$[CP_{ij}]$ est la concentration du paramètre de qualité d'eau ($\mu\text{g L}^{-1}$) pour la $i^{\text{ème}}$ période et le $j^{\text{ème}}$ échantillon;
 a_0 est l'ordonnée à l'origine du modèle pour la période de référence;
 a_i est l'effet de la $i^{\text{ème}}$ période sur l'ordonnée à l'origine du modèle;
 b est la pente du modèle;
 Q_{ij} est la lame d'eau à l'exutoire (mm jr^{-1}) pour la $i^{\text{ème}}$ période et le $j^{\text{ème}}$ échantillon;
 e_{ij} est le terme d'erreur associé à la $i^{\text{ème}}$ période et au $j^{\text{ème}}$ échantillon.

Les e_{ij} sont indépendants et identiquement distribués selon une distribution normale de moyenne = 0 et de variance σ^2 .

Conceptuellement, une valeur significativement différente de « 0 » du paramètre a_i du modèle de régression indique que les valeurs de concentration de la variable dépendante à l'étude pour la $i^{\text{ème}}$ période d'évaluation diffèrent de façon significative de la période de référence. Le modèle statistique permet ainsi de comparer les concentrations prédites pour chacune des périodes sur une base commune de conditions d'écoulement instantané à l'exutoire du bassin versant.

Résultats et discussion

Relevés météorologiques et hydrométriques

Les relevés météorologiques et hydrométriques indiquent d'importantes variabilités dans les conditions hydrologiques dans le bassin versant du ruisseau Au Castor au cours de la période d'étude 1997-2003. Le tableau 1 exprime la variabilité inter-annuelle des précipitations, des fontes de neige et des débits mesurés

Tableau 1. Bilans hydrologiques et flux de matières en suspension et de phosphore compilés sur une base annuelle et sur la base des événements de crues du ruisseau au Castor.

Bilan hydrologique annuel	Année hydrologique (1er octobre au 30 septembre)					
	1997-1998	1998-1999	1999-2000	2000-2001	2001-2002	2002-2003
Précipitations et fontes de neige						
Total mm	1 150	1 006	1 234	942	1 059	875
Pluie sur sol non gelé mm	752	799	800	629	824	598
(% total)	(65 %)	(79 %)	(65 %)	(67 %)	(78 %)	(68 %)
Fonte et/ou pluie sur sol gelé mm	398	207	434	313	235	276
(% total)	(35 %)	(21 %)	(35 %)	(33 %)	(22 %)	(32 %)
Flux totaux annuel						
Lame d'eau exportée mm	452	202	555	454	457	507
Matière en suspension T-MES	947	413	651	591	1 093	1 288
Phosphore total kg P	1 540	695	1 578	1 572	1 414	1 546
Phosphore réactif soluble kg P	543	263	724	718	610	668

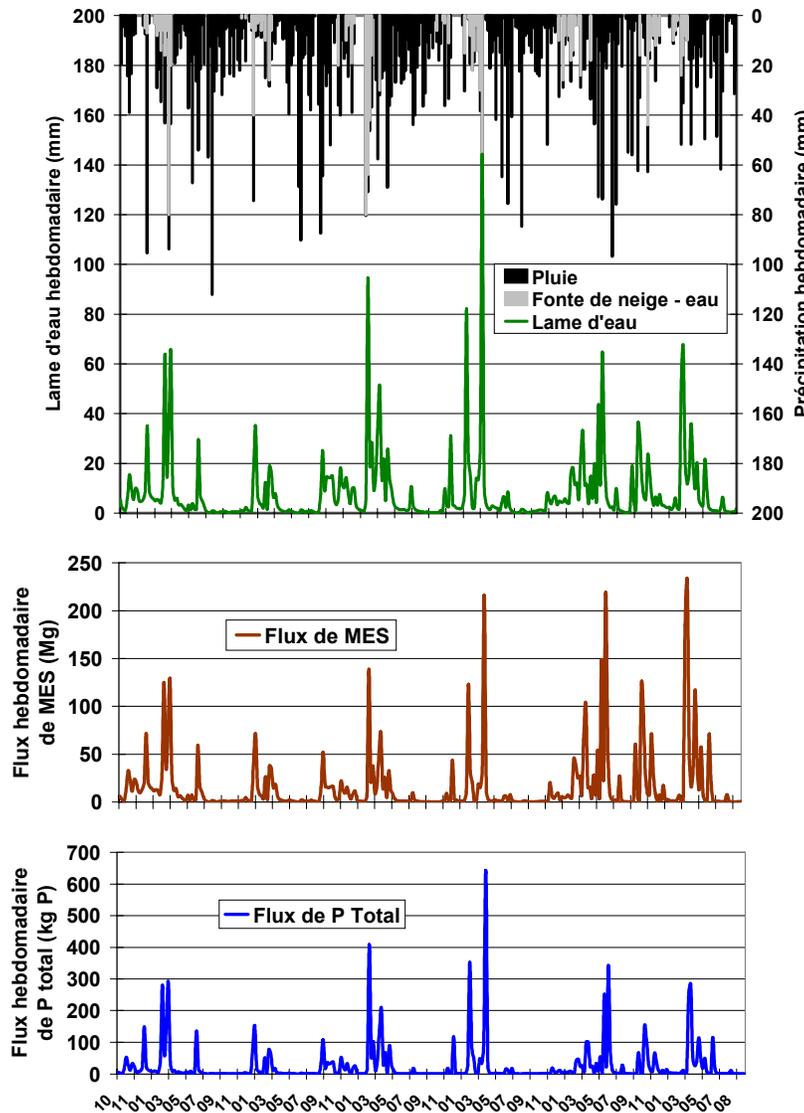


Figure 4. Séries chronologiques des précipitations, des débits et des flux de phosphore et de matières en suspension à l'exutoire du bassin versant du ruisseau au Castor pour la période d'étude 1997-2003.

à l'exutoire du bassin versant expérimental, de même que les flux MES, PRS et PTOT qui leur sont associés, pour chacune des six années de la période d'étude. Sur cette base, la hauteur moyenne d'eau exportée annuellement à l'exutoire du bassin versant est de 438 mm. La hauteur minimale d'eau (202 mm) a été mesurée en 1998-1999, alors que la valeur maximale (555 mm) a été mesurée en 1999-2000.

La figure 4 illustre les séries chronologiques, sur une base hebdomadaire, des précipitations, fontes de neige et exportations de sédiments et de phosphore pour l'ensemble de la période 1997-2003. Une importante variabilité inter-annuelle est observée dans la contribution relative des pluies et des fontes de neige aux crues et exportations du ruisseau. Au cours des années hydrologiques 2001-2002 et 2002-2003, les événements de pluie ont contribué de façon dominante aux crues du ruisseau et aux exportations de MES et P. Les précipitations abondantes du printemps 2002 (mai et juin), de l'automne 2002 (septembre à novembre) et de juin 2003 contribuent pour la plus large part au volume des crues. Au cours des quatre premières années de la période d'étude (1997-2001), la plupart des crues sont plutôt associées à des événements hivernaux, alors que chacune de ces années hydrologiques a connu un redoux hivernal en janvier ou février. Les contributions significatives des pluies, en dehors de la période de fonte des neiges, se limitent à un intense orage en juillet 1998, l'automne pluvieux de 1999 et aux pluies abondantes de mai 2000.

Modélisation des flux

Le suivi hydrométrique en continu et le prélèvement ponctuel d'échantillons des eaux du ruisseau Au Castor ont permis une modélisation relativement précise des relations C/Q et des flux de phosphore et de calcium. Les coefficients de variation (CV) des estimations de flux de P et de Ca ont varié de 0,04 à 0,18 pour les différentes périodes à l'étude et correspondent à des niveaux acceptables pour la modélisation de petits tributaires (Walker 1998). En

ce qui a trait au paramètre MES, les CV de 0,24, 0,14 et 0,30, estimés respectivement pour la période de référence et les deux périodes d'évaluation, indiquent un degré moindre de précision du modèle C/Q et invitent à une interprétation prudente des modèles.

Dans l'ensemble, la variabilité des concentrations des paramètres de qualité de l'eau témoigne d'un contrôle hydrologique au cours de l'ensemble de la période. Les concentrations moyennes des paramètres PTOT, PRS et MES s'accroissent alors que le débit du ruisseau passe d'un régime d'écoulement de base, à celui d'un régime élevé, puis à celui de crue. Inversement, les concentrations en Ca du ruisseau tendent à diminuer avec l'augmentation du débit, témoignant d'une contribution croissante du ruissellement de surface au débit du ruisseau.

Phosphore et matières en suspension

En écoulement de base, les pentes C/Q négatives de même que la grande variabilité des concentrations en P (figure 5a) témoignent de phénomènes de rétention biotique et abiotique dans le réseau hydrographique. Dorioz et al. (2004) ont décrit de telles diminutions de P proportionnelles aux accroissements du débit dans le bassin versant du Foron en Haute-Savoie. S'inspirant de leur approche du flux limite de P, l'exportation annuelle de P total associé aux contributions ponctuelles dans le bassin versant du ruisseau Au Castor est estimée à 254, 96 et 162 kg P an⁻¹ respectivement pour les périodes 1997-1999, 1999-2001 et 2001-2003. Dans le bassin versant du ruisseau Au Castor, les flux de P d'origine ponctuelle sont associés aux bâtiments de ferme et cours d'exercice, à l'entreposage d'engrais de ferme sans structure (moins de 100 unités animales au total) et à une densité modérée de population (approximativement 15 habitants par km²). Ces estimations représentent entre 3 et 11 % des charges annuelles en phosphore total, et corroborent les estimations de Hegman et al. (1999) qui attribuent 92 % des exportations diffuses de P à l'utilisation agricole du sol pour

la partie aval du bassin de la rivière aux Brochets.

La strate de débits élevés (0,6 mm jr⁻¹ < Q < 3,3 mm jr⁻¹) est associée à une activité hydrologique dominée par des transferts hypodermiques et souterrains dans le bassin versant. Les pentes positives C/Q des concentrations en P modélisées dans cette strate de débits du ruisseau, de même que l'importante fraction particulaire du flux de P (43 à 67 % du PTOT), sont en partie associées au phénomène de transport préférentiel du P vers le réseau de drainage souterrain. Dans leur étude sur la migration du P dans les drains d'un champ argileux limitrophe au bassin du ruisseau Au Castor, Enright et Madramootoo (2004a) ont attribué les accroissements marqués des concentrations en P dans les eaux de drainage souterrain au transport préférentiel de P dans les macropores du sol. Les observations rapportées par Jamieson et al. (2002) sur le même site témoignent de concentrations en P particulaire atteignant 80 % du flux total de P exporté en conditions de débit de pointe des

drains. Le transport préférentiel du phosphore via le réseau de drainage souterrain serait particulièrement actif dans les sols argileux en position basse du relief du bassin, longeant la branche principale du ruisseau en raison de la nature argileuse des sols (figure 1c).

Des phénomènes de re-suspension et de *relargage* du P dans la branche principale du ruisseau contribueraient aussi à expliquer les fortes pentes C/Q des concentrations en phosphore, de même que la grande variabilité du paramètre MES observée dans la strate de débits élevés. Les échantillonnages intensifs des eaux du ruisseau Au Castor témoignent de ces phénomènes (Michaud et al., 2004c), alors que des pics élevés de concentrations en P et en MES devancent les débits de pointe du ruisseau en période estivale. L'accumulation de sédiments limono-argileux est particulièrement importante (> 50 cm) dans le lit de la portion amont de la branche principale du ruisseau, où la morphologie du bassin versant favorise les processus de déposition. La croissance abondante de

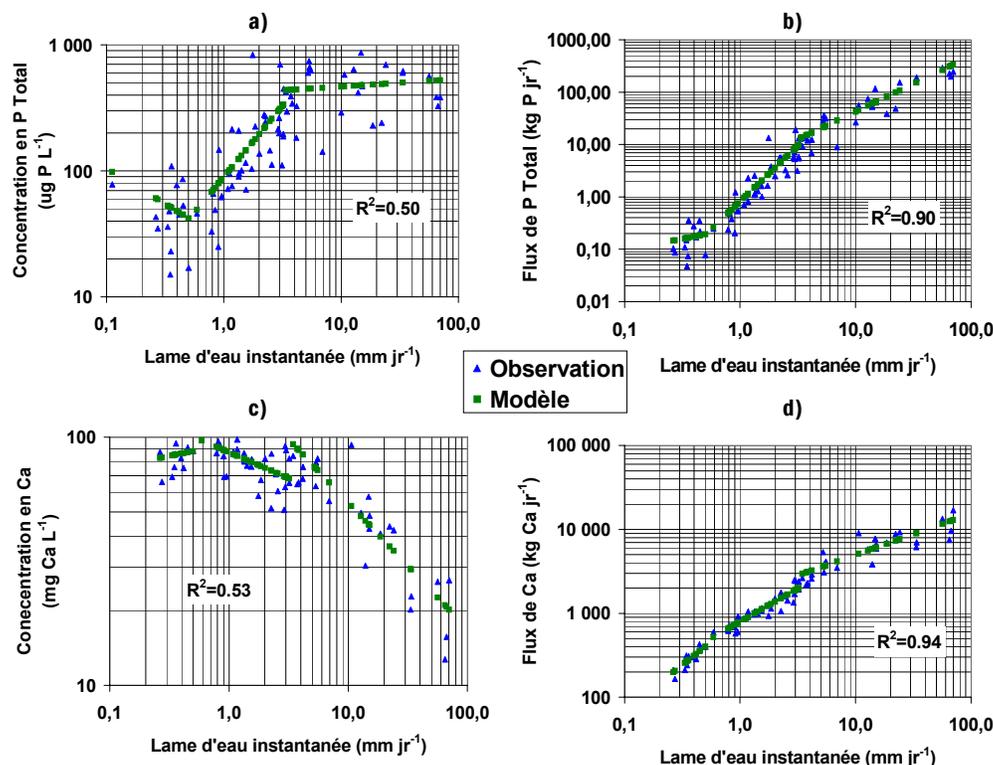


Figure 5. Modèles de régression des concentrations et des flux de phosphore total (a-b) et de calcium (b-c) en fonction du débit à l'exutoire du bassin versant du ruisseau au Castor pour la période d'évaluation 1999-2001.

macrophytes et de périphytons y favorise également la rétention biotique et abiotique du P en période estivale. Dorioz et al. (2004) ont évalué que la rétention du P d'origine ponctuelle, lors des périodes de tarissement, dépassaient les exportations associées aux plus fortes crues à l'exutoire du bassin du Foron. Un tel phénomène de relargage de P dans le bassin versant du ruisseau Au Castor semble particulièrement important lorsque se manifestent les premières crues de l'été ou à l'automne.

En période de crues du ruisseau, les processus de ruissellement de surface sont actifs sur une portion variable du parcellaire du bassin versant, ce qui se traduit par des concentrations élevées de P et de sédiments dans la colonne d'eau. Les moyennes bisannuelles des concentrations en PTOT en période de crues, pondérées pour le débit du ruisseau, se situent entre 460 et 482 $\mu\text{g P L}^{-1}$. Compte tenu des disparités inter-annuelles dans les précipitations et les hauteurs d'eau ruisselée, la proportion du flux annuel de PTOT associée aux crues se situe respectivement à 81 et 75 % pour les périodes d'évaluation 1999-2001 et 2001-2003, alors qu'elle n'est que de 60 % pour la période de référence. La forte inclinaison de la pente C/Q en PTOT pour la période 2001-2003 (C/Q = 0,54, $p < 0,05$) se démarque des périodes précédentes, alors que ces dernières présentent un plafonnement des concentrations en PTOT et MES en fonction du débit du ruisseau (pente C/Q = 0,05, ns). Le plafonnement des concentrations dans la strate de débits de pointe au cours des périodes 1997-1999 et 1999-2001 est associé à la contribution dominante des événements hivernaux (69 %) aux crues du ruisseau. Au cours de l'hiver, l'érosivité des précipitations demeure en effet relativement plus faible qu'en période estivale, alors que le pouvoir érosif du ruissellement est tempéré par la consolidation des agrégats du sol gelé (Dorioz et Ferhi 1993). Pour la période 2001-2003, les crues du ruisseau Au Castor sont plutôt induites par des pluies intenses en saison de production. Les pointes de concentration en

MES observées en mai et juin 2002 ($> 1000 \text{ mg L}^{-1}$) traduisent une forte érodabilité des sols, présumée plus élevée qu'à la fin de l'hiver. Des épisodes de ruissellement courts et intenses en période estivale favorisent par ailleurs la capacité de transport du ruissellement de surface, résultant en des concentrations maximales de MES et de PTOT dans le ruisseau, de même que de fortes pentes C/Q. Le caractère épisodique des crues estivales favorise aussi les effets d'hystérésis sur les concentrations de MES observées dans le ruisseau. Il en résulte une imprécision des modèles de flux, tel que démontré par le coefficient élevé de variation (CV $> 0,30$) associé au paramètre MES pour la période 2001-2003.

Calcium

Dans les strates de débits élevés et de crues, la teneur en Ca de l'eau de surface du ruisseau demeure négativement corrélée avec le débit du ruisseau ($r = -0,50$, $p < 0,0001$, $N = 206$). De tous les paramètres de qualité de l'eau à l'étude, les modélisations des flux de Ca dans l'eau de surface présentent les meilleurs ajustements aux observations pour les trois périodes à l'étude ($0,85 < R^2 < 0,98$). La constance dans la relation C/Q du Ca en solution au fil d'une grande diversité d'événements hydrologiques tient à sa nature soluble, qui le soustrait aux phénomènes d'hystérésis particulière et à la nature fortement calcaire des roches-mères des sols du bassin versant. Il est généralement établi que l'eau qui chemine sous la surface du sol pour atteindre le réseau hydrographique ne présente plus les mêmes propriétés géochimiques que celle qui rejoint directement le cours d'eau par le biais du ruissellement de surface, constituée pour une large part de la pluie ou de l'eau de fonte (Heatwaite et al. 2000). La dépendance de l'activité du Ca face aux fluctuations de l'activité hydrologique observée dans les conditions édaphiques spécifiques au bassin versant du ruisseau Au Castor en fait ainsi un excellent traceur géochimique de la prédominance des écoulements de surface ou souterrains.

En conditions d'étiage, les concentrations en Ca observées à l'exutoire atteignent des maxima compris entre 110 et 125 mg Ca L^{-1} pour les trois périodes à l'étude. Ces concentrations élevées témoignent alors de la résurgence de la nappe d'eau souterraine vers le ruisseau et sont influencées par la nature neutre à fortement calcaire de la roche-mère. Grenon et al. (1999) rapportent des concentrations moyennes en Ca dans le substratum des trois séries de sol Sainte-Rosalie, Sainte-Brigide et Bedford, de l'ordre de 13,0, 11,9 et 19,8 cmol kg^{-1} , respectivement. Dans la strate de débits élevés, les moyennes pondérées pour le débit sont comprises comprises entre 66 et 102 mg L^{-1} pour les trois périodes d'étude. Les concentrations de Ca en solution décroissent avec la hausse de l'activité hydrologique, à dominance hypodermique, témoignant de temps de contact plus court de l'eau avec la matrice du sol et d'un transfert préférentiel vers les drains souterrains. Dans la strate de débits de crues, les concentrations décroissent encore plus rapidement avec la hausse du débit en raison du développement d'une activité hydrologique de surface sur une superficie croissante du bassin. Les minima annuels observés en période de crues du ruisseau, compris entre 8,7 et 12,7 mg L^{-1} , témoignent d'une contribution maximale du ruissellement de surface à la lame d'eau exportée du bassin versant. Cette distribution des concentrations en Ca en fonction du régime hydrique du ruisseau est cohérente avec les observations de ruissellement de surface et d'écoulement au drain observée à l'échelle de parcelles expérimentales représentatives des propriétés des sols du bassin versant. Enright et Madramootoo (2004b) ont en effet observé des concentrations médianes de Ca dans le ruissellement de surface de l'ordre de 11,0 et 29,0 mg L^{-1} pour deux sites expérimentaux à proximité du ruisseau Au Castor. Les concentrations au drain de l'ordre de 50 et 108 mg L^{-1} , respectivement pour les mêmes sites, reflètent pour leur part les observations à l'exutoire du ruisseau pour la strate de débits élevés, associées aux conditions d'écoulement hypodermique.

Analyse de covariance des paramètres de qualité d'eau

La variabilité inter-annuelle dans le comportement hydrologique du bassin versant au cours de l'ensemble de la période d'étude limite la possibilité d'évaluer l'effet des interventions agroenvironnementales sur la base des flux mesurés à l'exutoire du ruisseau. L'augmentation des exportations annuelles en PTOT, entre la période de référence 1997-1999 (1,12 kg P ha⁻¹), les périodes d'évaluation 1999-2001 (1,57 kg P ha⁻¹) et 2001-2003

(1,48 kg P ha⁻¹) reflète un accroissement de 54 et 47 % respectivement, des volumes d'eau exportée à l'exutoire du bassin. Dans le contexte de la présente étude, le recours à l'analyse de covariance a pour objectif de distinguer l'influence des interventions agroenvironnementales sur les relations C/Q des paramètres de qualité d'eau, de celle attribuable aux conditions hydrologiques variables au cours de la période 1997-2003.

En première étape, l'analyse ANCOVA appliquée à l'ensemble des observations des strates de débits élevés et de crues

($Q > 0,6 \text{ mm jr}^{-1}$), sans considérer l'effet de la période, a confirmé un contrôle hydrologique global sur les paramètres PTOT, PRS, MES et Ca (tableau 2). En deuxième étape, l'analyse selon un modèle statistique complet, qui considère des pentes C/Q et des ordonnées distinctes à l'origine pour chacune des périodes à l'étude, a mis en relief que les pentes C/Q pour chacun des paramètres PTOT, PRS, MES et Ca n'étaient pas significativement différentes d'une période à l'autre. Conceptuellement, cette absence de différences significatives entre les pentes de régression, associées aux périodes de référence et d'évaluation, indique que la variabilité inter-annuelle des conditions hydrologiques ne compromet pas la comparaison des concentrations des paramètres de qualité de l'eau sur une base commune et pondérée des débits instantanés observés à la station principale. En troisième étape, les différences de concentrations entre les périodes de référence et d'évaluation sont enfin mises en relief par les ordonnées à l'origine des modèles de régression (figure 6), sur la base d'une pente de régression commune aux trois périodes.

Les paramètres de régression des modèles d'analyses de covariance des concentrations en PTOT, PRS, MES et Ca pour les périodes de référence (1997-1999) et d'évaluation (1999-2002 et 2001-2003)

Tableau 2. Effets fixes de la période, du débit et de leur interaction sur la concentration en P total observée à l'exutoire du ruisseau au Castor tels qu'estimés par l'analyse de covariance utilisant le débit comme co-variable.

Étape 1 : Ho : Pente C/Q = 0 (test des valeurs de pentes toutes égales à 0)				
Effet	Num DL	Den DF	Valeur F	Pr > F
Période	3	200	1550,15	<0,0001
Débit X Période	3	200	49,52	<0,0001
Étape 2 : Ho : Pente C ₁ /Q ₁ = C ₂ /Q ₂ = C ₃ /Q ₃ (test de l'égalité des pentes)				
Effet	Num DF	Den DF	Valeur F	Pr > F
Période	2	200	4,66	0,0105
Débit	1	200	146,98	<0,0001
Débit X Période	2	200	0,73	0,4842
Étape 3 : Ho : a ₁ = a ₂ = a ₃ (test de l'égalité des ordonnées à l'origine)				
Effet	Num DF	Den DF	Valeur F	Pr > F
Période	2	202	5,5	0,0047
Débit	1	202	147,51	<0,0001

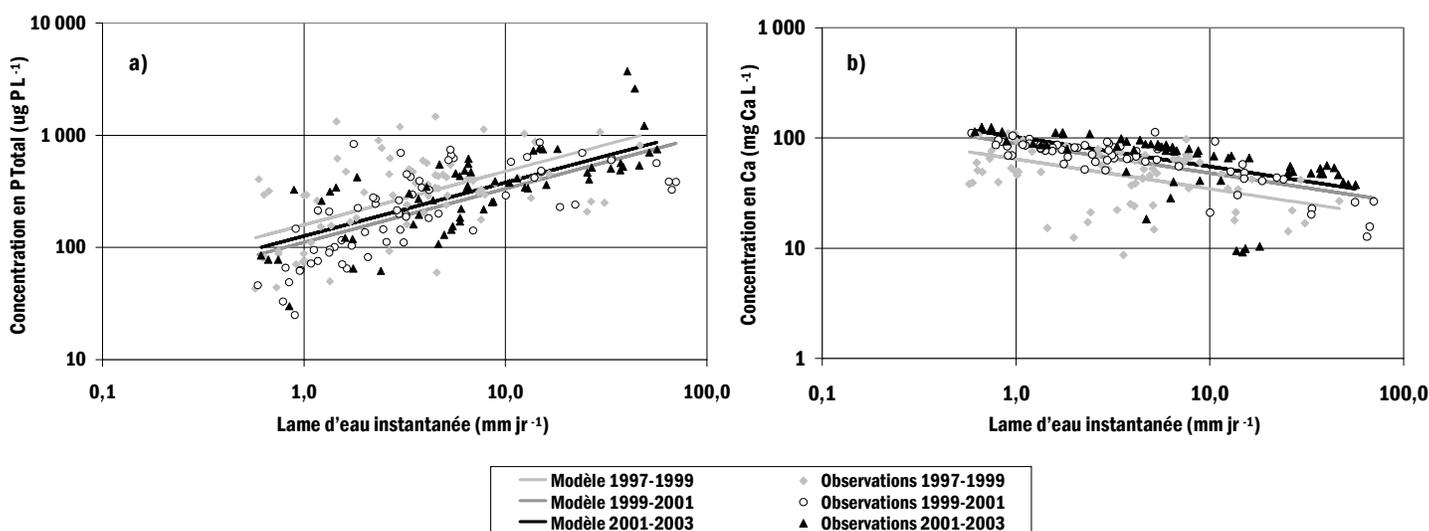


Figure 6. Modèles d'analyse de covariance des concentrations en phosphore total (a) et en calcium en solution (b) pour les périodes de référence (1997-1999) et d'évaluation (1999-2002 et 2001-2003) utilisant le débit du ruisseau au Castor à l'exutoire comme co-variable.

sont présentés au tableau 3. Compte tenu de la pente unique de chaque modèle, les différences de concentrations entre les différentes périodes, sur une base logarithmique, sont identiques quel que soit le débit du ruisseau considéré. Le tableau 4 présente les moyennes ajustées au modèle de covariance des concentrations en PTOT, PRS, MES et Ca, associées à la lame d'eau moyenne de 4,0 mm jr⁻¹. Pour le PTOT, le modèle estime des réductions significatives (p < 0,05) des concentrations ajustées au modèle de covariance de l'ordre de 30 et 21 % respectivement, pour les périodes d'évaluation 1999-2002 (223 µg P L⁻¹) et 2001-2003 (253 µg P L⁻¹), par rapport à l'année de référence (318 µg P L⁻¹). Les réductions sont moins prononcées pour la fraction soluble du P, soit de 25 et 13 % respectivement, pour les deux périodes successives d'évaluation. La concentration moyenne en PRS ajustée au modèle pour la période 2001-2003 (94 µg L⁻¹) n'est cependant pas significativement différente de l'année de référence (108 µg L⁻¹). Les taux de MES démontrent pour leur part une diminution significative en période d'évaluation 1999-2001 (-30 %), alors que la moyenne ajustée au modèle de régression pour 2001-2003 n'est pas significativement différente de la période de référence (p > 0,05). Rappelons que les coefficients de variation des flux de MES

modélisés pour la période de référence (CV = 41 %) et la période d'évaluation 2001-2003 (CV = 38 %) demeurent excessivement élevés et limitent l'interprétation des tendances temporelles dans les concentrations et les flux modélisés de MES dans le ruisseau. La saisonnalité des crues contribuerait par ailleurs à masquer l'effet des aménagements hydro-agricoles pour la période 2001-2003, qui se distingue par des crues printanières tardives, au caractère érosif plus marqué que les crues sur sol gelé des périodes précédentes. Les concentrations modélisées en Ca affichent pour leur part une nette tendance à l'augmentation (p < 0,0001) au cours des deux périodes d'évaluation.

La baisse des concentrations en PTOT modélisées pour les deux périodes d'évaluation, sur une base comparative pondérée pour les débits du ruisseau, est attribuée à l'effet des interventions agroenvironnementales réalisées dans le bassin. Les influences respectives des aménagements hydro-agricoles ou des interventions à l'égard de la gestion de la fertilité des sols et des modes d'épandage des engrais de ferme sur la dynamique du P peuvent difficilement être discernées. Cependant, les tendances observées dans l'évolution de la qualité de l'eau supportent la thèse d'une influence dominante des aménagements hydro-

agricoles sur la mobilité du P dans le bassin versant :

- 1) la réponse de la qualité de l'eau aux interventions est relativement rapide et reflète le calendrier de mise en œuvre des aménagements hydro-agricoles;
- 2) la majeure partie de la diminution des concentrations en P est associée aux formes particulières de P plutôt qu'à sa fraction soluble, ce qui suggère une atténuation des processus de transport plutôt qu'une réduction à la source des apports de P;
- 3) l'augmentation significative de l'activité du Ca dans l'eau de surface en période d'évaluation témoigne de cheminements hydrologiques favorisant les voies hypodermique et souterraine. Les concentrations en Ca demeurent en effet significativement plus élevées (p < 0,0001) pour les deux périodes d'évaluation, indiquant qu'une proportion relativement plus élevée de l'eau a transité par le sol lors des crues du ruisseau.

La réduction moyenne des concentrations en PTOT de l'ordre de 25 % dans les strates de débits élevés et de crues, est attribuée à l'influence de l'aménagement hydro-agricole du bassin sur les volumes et la capacité de transport du ruissellement de surface dans le secteur du bas-

Tableau 3. Paramètres de régression des modèles d'analyse de covariance des concentrations en phosphore total (PTOT), phosphore réactif soluble (PRS), matières en suspension (MES) et Ca pour les périodes de référence (1997-1999) et d'évaluation (1999-2002 et 2001-2003), utilisant le débit du ruisseau au Castor à l'exutoire comme co-variable.

Variable 1 dépendante	Ordonnée à l'origine			Pente du modèle			Paramètre - Périodes d'évaluation					
	(a)			(b)			a ₂ (1999-2001)			a ₃ (2001-2003)		
	Estim.	Erreur-type	Pr > t ²	Estim.	Erreur-type	Pr > t	Estim.	Erreur-type	Pr > t	Estim.	Erreur-type	Pr > t
PTOT	2,202	0,038	<,0001	0,477	0,039	<,0001	-0,155	0,047	0,001	-0,100	0,050	0,049
PRS	1,685	0,049	<,0001	0,553	0,052	<,0001	-0,123	0,064	0,059	-0,058	0,065	0,370
MES	4,955	0,057	<,0001	0,300	0,059	<,0001	-0,156	0,072	0,032	0,049	0,075	0,518
Ca	4,808	0,027	<,0001	-0,269	0,028	<,0001	0,142	0,034	<,0001	0,201	0,036	<,0001

1. Modèle : $\log[CP_i] = a + a_i + b(\log Q_i) + e_i$

où : $[CP_i]$ est la concentration du paramètre de qualité d'eau (ug L⁻¹) pour la $i^{\text{ème}}$ période et le $j^{\text{ème}}$ échantillon;

a est l'ordonnée à l'origine du modèle pour l'année de référence;

a_i est l'effet de la $i^{\text{ème}}$ période sur l'ordonnée à l'origine du modèle;

b est la pente du modèle;

Q_i est le débit à l'exutoire (mm jr⁻¹) pour la $i^{\text{ème}}$ période et le $j^{\text{ème}}$ échantillon;

e_i est le terme d'erreur associé à la $i^{\text{ème}}$ période et au $j^{\text{ème}}$ échantillon.

2. Pr > |t| : probabilité associée au test Ho : Estimateur = 0.

Tableau 4. Moyennes ajustées au modèle de covariance pour un débit de pointe moyen de 4,0 mm jr⁻¹ des concentrations en phosphore total, phosphore réactif soluble, matières en suspension et calcium en solution pour les périodes de référence (1997-1999) et d'évaluation (1999-2002 et 2001-2003).

Période (oct.-sept.)	PTOT ¹ ($\mu\text{g L}^{-1}$)	PRS ($\mu\text{g L}^{-1}$)	MES (mg L^{-1})	Ca (mg L^{-1})
1997-1999	318 a	108 a	140 a	43 a
1999-2001	223 b	81 b	98 b	60 b
2001-2003	253 b	94 ab	156 a	69 b

1. Les moyennes suivies d'une lettre différente sont significativement différentes au seuil de 5 %.

sin où l'activité hydrologique de surface est présumée la plus intense. Concrètement, la superficie influencée par l'aménagement des structures de captage ne couvre que 22 % de la superficie globale du bassin versant, mais en constitue la portion la plus hydrologiquement active. Dominés par une texture lourde, ces champs situés en position basse du relief longeant la branche principale du ruisseau ne bénéficient pas de drainage souterrain et démontrent des indices de ruissellement parmi les plus élevés du bassin (figure 1d). Les propriétés de cette portion du parcellaire suggèrent une contribution relativement élevée au volume de ruissellement exporté hors du bassin versant lors des crues, comparativement aux champs drainés souterrainement ou occupant une position plus élevée dans le relief du bassin. L'échantillonnage spatial des branches et tronçons du ruisseau Au Castor a démontré la vulnérabilité relativement plus élevée du secteur aménagé aux exportations diffuses de P (Michaud et al. 2004c). Les branches de cours d'eau drainant les sous-bassins en position élevée dans le paysage contribueraient plutôt à la dilution des concentrations en P dans la branche principale du ruisseau, reflétant le gradient longitudinal bien démarqué à l'échelle du bassin dans l'élévation, la nature du substratum et la perméabilité des sols. Enright et Madramootoo (2004a) ont pour leur part observé à l'échelle de la parcelle qu'en moyenne 80 % du volume d'eau exportée des champs drainés souterrainement transitait par la voie des drains dans des conditions géophysiques propres au bassin versant du ruisseau Au Castor. Ces observations mettent en relief une activité hydrologique de surface relativement plus

importante générée par le parcellaire non drainé, en position basse du relief du bassin, et ciblé pour la mise en place des structures de contrôle du ruissellement.

L'influence des aménagements hydro-agricoles sur la dynamique du ruissellement et la mobilité du P est associée globalement au laminage des crues à forte composition de ruissellement de surface et au bris de la connectivité hydrologique entre les champs et le ruisseau. L'action complémentaire des bandes riveraines et des structures de captage aurait ainsi favorisé l'écoulement hypodermique et souterrain et réduit la capacité de transport de ruissellement de surface, provoquant la sédimentation des formes particulières de P avant leur entrée dans le cours d'eau. Les influences relatives des structures de captage et des aménagements riverains dans l'interception et le laminage des épisodes de ruissellement de surface demeurent cependant difficilement quantifiables. Pour leur part, les lisières riveraines réduisent la connectivité hydrologique entre le ruisseau et les zones basses des champs, où le ruissellement de surface est le plus susceptible d'être généré. Plusieurs études ont démontré que les zones saturées de sol, à l'origine du ruissellement de surface, s'étendaient sur une portion relativement restreinte du parcellaire, de part et d'autre des voies d'eau (Zollweg 1996, Zollweg et al. 1996, Gburek et al. 2000). Dans le cas du ruisseau au Castor, à l'instar du parcellaire en culture du Sud-Ouest québécois, la division cadastrale et l'aménagement du drainage de surface favorisent l'évacuation du ruissellement de surface par les fossés plutôt que par les rives des cours

d'eau. La caractérisation des parcours du ruissellement de surface de trois champs drainés par la branche principale du ruisseau Au Castor a démontré que la portion de la superficie totale du champ égouttée vers la bande riveraine du ruisseau variait de 11 à 59 % (Michaud et al. 2004b). Dans ce contexte, les structures de captage aménagées à l'exutoire des fossés sont susceptibles d'atténuer une portion importante de la lame de ruissellement de surface provenant des champs lors des crues. La rétention du stock de P en amont du réseau hydrographique favorise par ailleurs l'atténuation de la concentration en P en période de débits élevés du ruisseau, lors d'évènements hydrologiques typiquement associés à la remise en suspension de sédiments et au relargage du stock de P dans la colonne d'eau du ruisseau.

Conclusion

Malgré une importante variabilité inter-annuelle dans les conditions météorologiques et climatiques, l'analyse de covariance des paramètres de qualité de l'eau en fonction des débits du ruisseau a permis de différencier les relations concentration-débit du phosphore observées lors des crues à l'exutoire du bassin versant pour trois périodes successives de suivi de l'écosystème aquatique. Des concentrations en P pondérées pour le débit, relativement plus basses en période d'évaluation comparativement à la période de référence, sont attribuées à l'aménagement hydro-agricole des zones les plus hydrologiquement actives du bassin versant, combinant l'implantation de bandes riveraines arbustives et d'ouvrages de contrôle du ruissellement de surface. Cette réduction des concentrations en P, suivant l'aménagement hydro-agricole du bassin, est observée malgré un accroissement de la proportion des cultures annuelles dans le bassin au cours des périodes d'évaluation.

Une implication pratique de cette étude est que l'aménagement hydro-agricole du parcellaire est une composante importante à intégrer aux stratégies

intégrées de réduction des exportations diffuses de P. Deux mises en garde s'imposent cependant à l'égard de l'efficacité de tels dispositifs à plus long terme. D'une part, un corollaire à l'accumulation du P dans les zones favorables à la sédimentation, notamment dans les bandes riveraines et les fossés, est une atténuation du taux de rétention avec le temps. L'implantation de pratiques culturales de conservation qui favorisent une bonne condition physique des sols et l'infiltration de l'eau dans la couche arable, demeure un investissement-clé dans le contrôle efficace et durable du ruissellement à l'échelle du champ.

D'autre part, rappelons que la première ligne de défense agroenvironnementale repose sur l'application des principes de fertilisation intégrée des cultures. Le contrôle à long terme de l'enrichissement des sols et une régie des sols qui soustrait les engrais de ferme et minéraux à l'action du ruissellement, demeurent des composantes essentielles d'une stratégie intégrée de réduction des exportations diffuses de P. La complémentarité des interventions à l'égard des facteurs *Source* et *Transport* de la mobilité du phosphore demeure à la base d'un effet durable des actions concertées en milieu agricole pour prévenir la dégradation des écosystèmes aquatiques.

Remerciements

Cette étude est dédiée à la mémoire d'Alain Desrochers (1955-2004), dont les compétences, le cœur à l'ouvrage et la franche camaraderie ont été des apports essentiels à cette vaste expérience à l'échelle humaine.



Alain Desrochers (1955-2004)

Cette étude a été réalisée avec le soutien financier de la Direction générale des politiques agricoles du MAPAQ et de la Coopérative de solidarité du bassin versant de la rivière aux Brochets. Les auteurs remercient François Godin et l'équipe du Centre d'expertises hydriques du Québec pour leur collaboration aux mesures hydrométriques. Des sincères remerciements sont aussi adressés aux 24 entreprises agricoles du bassin versant du ruisseau Au Castor, de même qu'à Alain Desrochers, Daniel Ménard, Germain Pinard et Mireille Moller, de l'équipe du Centre de services de Bedford du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec. Cédric Audette et Johanne Côté, stagiaires à l'ITA de La Pocatière, de même que Marie-Hélène Campagna et Nathalie Fortin, stagiaires à l'Université Laval ont aussi apporté une contribution fort appréciée au projet. Enfin, les auteurs remercient Pierre Audesse et l'équipe du laboratoire de physico-chimie de l'IRDA pour la prise en charge du volet analytique du projet, de même que Jacques Dion et Jacques Desjardins pour le support aux opérations sur le terrain.

Références bibliographiques

- Arnold J.G., R. Srinivasab, R.S. Muttiah et J. Williams. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment I. Model development. *Journal of American Water Resource Association* 34: 73-89.
- Beaudin, I., J. Deslandes, A. R. Michaud et G. Lévesque. 2004. Application of SWAT to the Pike river watershed for diffuse phosphorus transport. 57^e congrès annuel de l'Association canadienne des ressources hydriques. Montréal, 16-18 juin. 8 p.
- Blais, S. 2002. La problématique des cyanobactéries (algues bleu-vert) à la baie Missisquoi en 2001. *Agrosol* 13(2) : 103-110.
- Cann, D.B., P. Lajoie et P.C. Stobbe. 1948. Soil survey of Shefford, Brome and Missisquoi counties in the province of Quebec. King's printer, Ottawa.
- Caumartin, J. et R. Vincent. 1994. Diagnostic environnemental de la rivière aux Brochets. Direction des écosystèmes aquatiques. Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec. 94 p. plus cartes et annexes.
- Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ). 2000. Logiciel de traitement de données hydrométriques (BDH), Version 1.0.
- Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ). 1998. Relevés hydrométriques de la station No 030420, rivière aux Brochets.
- Deslandes, J., A. R. Michaud, et F. Bonn. 2002. Développement et validation des indicateurs agroenvironnementaux associés aux pertes diffuses de phosphore dans le bassin versant de la rivière aux Brochets. *Agrosol* 13(2) : 111-123.
- Dorioz, J.-M., P. Quéting, J. Lazzarootoo et A. Orand. 2004. Bilan du phosphore dans un bassin versant du Lac Léman : conséquences pour la détermination des flux exportés. *Rev. Sci. Eau* 17-3 : 329-354.
- Dorioz, J.M. et A. Ferhi. 1993. Non-point pollution and management of agricultural areas: phosphorus and nitrogen transfer in an agricultural watershed. *Wat. Res.* 28-2: 395-410.
- Duguet, F., A. R. Michaud, J. Deslandes, R. Rivest et R. Lauzier. 2002. Gestion du ruissellement et de l'érosion pour limiter les pertes en phosphore en bassin versant agricole. *Agrosol* 13(2) : 14-148.
- Duchemin, M. et R. Majdoub (2004). Les bandes végétales filtrantes : de la parcelle au bassin versant. *Vecteur Environnement* 37(2) : 36-50.
- Enright, P. et C.A. Madramootoo. 2004a. Phosphorus losses in surface runoff and subsurface drainage waters on two agricultural fields in Quebec. p. 160-170. *In* R.A. Cooke (ed.) Drainage VIII - Proceedings of the Eight International Drainage Symposium. ASAE, St. Joseph, MI, USA.
- Enright, P. et C. A. Madramootoo, 2004b. Communication personnelle.

- Gburek, W.J., A.N. Sharpley et G.J. Folmar. 2000. Critical areas of phosphorus export from agricultural watersheds, *In* A.N. Sharpley, Ed., *Agriculture and phosphorus management: the Chesapeake bay*, Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.
- Grabow, G.L., J. Spooner, L.A. Lombardo and D.E. Lione. 1999. Detecting water quality changes before and after BMP implementation: Use of SAS for statistical analyses. NEQEP Notes, No 93, North Carolina State Water Quality Group Newsletter, NCSU, Raleigh, NC.
- Grenon, L., J.-M. Cossette, M. Deschênes et L. Lamontagne. 1999. Étude pédologique du comté de Rouville, Québec. Agriculture et Agroalimentaire Canada, Direction générale de la recherche, Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures. 264 p.
- Hegman, W., D. Wang et X.C. Borer. 1999. Estimation of Lake Champlain basin wide non-point source phosphorus export. *Technical report no. 31. Lake Champlain Basin Program Publication Series*.
- Helmers, M.J., D.E. Eisenhauer, T.G. Franti et M.G. Dosskey. 2005. Modeling sediment trapping in a vegetative filter accounting for converging overland flow. *Trans. Of the ASAE* 48 (2) 541-555.
- Heatwaite, A.L., P. Haygarth et R. Dils. 2000. Pathways of phosphorus transport, *In* A.N. Sharpley, Ed., *Agriculture and phosphorus management: the Chesapeake bay*, Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.
- Jamieson, A., C. Madramootoo et P. Enright. 2002. Phosphorus losses in surface and subsurface runoff from a snowmelt event on an agricultural field in Quebec. *Can. Biosystems Eng.* 45: 1.1-1.7.
- Lawrence, R., S. Dabney et R. Schultz. 2002. Improving water and soil quality with conservation buffers. *J. Soil Water Cons.* 57 : 2, pp. 37A-43A.
- Meals, D. 2000. Lake Champlain basin agricultural watersheds, section 319 National Monitoring Program Project. Final report. Vermont Department of Environmental Conservation. Waterbury, Vermont.
- Michaud, A. R., J. Deslandes et J. Desjardins. 2004a. Réseau d'actions concertées en bassins versants agricoles : ruisseau Walbridge, ruisseau Fourchette et rivière Laguerre. Phase I (calibrage) et II (aménagement). Rapport final. Fonds d'action québécois pour le développement durable. 106 p.
- Michaud, A. R., J. Deslandes, M. Duchemin et J. Desjardins. 2004b. L'aménagement riverain : un investissement-clé dans l'égouttement des sols, la productivité des cultures et une eau propre. Colloque «Des arbres sur ma ferme». Société de l'arbre du Québec. Drummondville, 19-20 février. Diaporama électronique et Cahier de conférence (résumé), p. 14.
- Michaud, A.R. et M.R. Laverdière. 2004c. Cropping, soil type and manure application effects on phosphorus export and bioavailability. *Can. J. Soil Science* 84(3) : 295-305.
- Michaud, A. R., R. Lauzier et M. R. Laverdière. 2002. Description du système de transfert du phosphore dans le bassin versant du ruisseau Au Castor. *Agrosol* 13(2) : 124-139.
- Michaud, A.R., M.R. Laverdière et R. Lauzier. 2004c. Temporal and spatial variability in non-point source phosphorus in relation to agricultural production and terrestrial indicators: the Beaver brook case study, Pike river basin, Quebec. *In* T.O. Manley, P.L. Manley and T.B. Mihuc, (ed.), *Lake Champlain: Partnerships and research in the new millennium*. Kluwer Academic/Plenum pub. New York NY. p. 97-121.
- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). 1997, 2000 et 2003. Fiches d'enregistrement des exploitations agricoles.
- Ministère de l'Environnement du Québec (MENV). 2003. Données météorologiques pour les stations de Farnham (7022320) et Philipsburg (7026040). Direction du suivi de l'état de l'environnement. Suivi de l'information sur le milieu atmosphérique (SIMAT).
- Monfet, J. 1979. Évaluation du coefficient de ruissellement à l'aide de la méthode SCS modifiée. Service de l'hydrométrie, ministère de l'Environnement du Québec, Publication No HP-51, Québec.
- Murphy, J., et J.R. Riley. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphates in surface waters. *Anal. Acta* 27:31-36.
- Québec et Vermont. 2002. Entente entre le gouvernement du Québec et le gouvernement de l'État du Vermont concernant la réduction du phosphore dans la baie Missisquoi. Québec, ministère de l'Environnement, Direction régionale de la Montérégie. 4 p.
- Statistical analysis system (SAS). 2000. SAS 8.0 for Windows. SAS Institute Inc. Cary, NC.
- Walker, W.W. 1987. Empirical methods for predicting eutrophication in impoundments. Report 4: Applications manual Tech. Rep. E-81-9. Prep. For U.S. Army Corps Eng. Waterways experiment station, Vicksburg, MS.
- Walker, W. 1998. *Flux, Stream loads computations, version 5.0*. Environmental laboratory USAE Waterways Experiment Station. Vicksburg, Mississippi, USA.
- Zollweg, J.A. 1996. Field study to support hydrologic modeling and analysis of watershed function at the microscale, *In Watershed Restoration Management*, American Water Resources Association, Syracuse, NY, p. 129-134.
- Zollweg, J.A., W.J. Gburek et T.S. Steenhuis. 1996. SMORMOD – A GIS-integrated rainfall-runoff model, *Trans. ASAE*, 39: 1299-1307.

