

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

## Partie II

### Évaluation de l'effet de scénarios agroenvironnementaux alternatifs à l'aide de SWAT

A. MICHAUD<sup>1</sup>, \*I. BEAUDIN<sup>1</sup>, J. DESLANDES<sup>1</sup>, F. BONN<sup>2</sup> et C.A. MADRAMOOTOO<sup>3</sup>

**RÉSUMÉ** - A. Michaud, I. Beaudin, J. Deslandes, F. Bonn et C.A. Madramootoo, *Variabilité spatio-temporelle des flux de sédiments et de phosphore dans le bassin versant de la Rivière aux Brochets, au sud du Québec*. *Agrosol.* 17 (1) : 21-32. La réduction de 41 % des flux de phosphore (P) à la baie Missisquoi, portion septentrionale du Lac Champlain, a fait l'objet d'une entente entre les gouvernements de la province de Québec et de l'état du Vermont. L'entente interpelle particulièrement le secteur agricole, puisque 80 % des apports diffus de P à la baie ont été associés au parcellaire en culture. À l'aide de SWAT (Soil and Water Assessment Tool), une modélisation du fonctionnement hydrologique, des processus d'érosion et de la mobilité du phosphore a été réalisée à l'échelle du bassin versant de la Rivière aux Brochets (630 km<sup>2</sup>), principal contributeur québécois du phosphore dans la baie. La présente étude vise à utiliser SWAT pour identifier les scénarios d'interventions agroenvironnementales susceptibles de rencontrer les charges-cibles de phosphore prévues par l'entente Québec-Vermont. La forte discrimination spatiale de la vulnérabilité du territoire aux exportations diffuses de phosphore a mis en relief la pertinence de cibler l'implantation de pratiques agricoles de conservation ou d'ouvrages de conservation des sols afin d'en optimiser les retombées environnementales. L'implantation ciblée de cultures de couverture sur les 10 % les plus vulnérables du parcellaire résulte en une réduction de 21 % des exportations globales de phosphore à l'exutoire du bassin versant, alors qu'une implantation aléatoire des mêmes pratiques sur une superficie

équivalente ne provoque qu'une réduction de 6 %. L'étude de différents scénarios de gestion du parcellaire indique que la rencontre de l'objectif de 41 % de réduction des exportations de P serait tributaire d'une implantation généralisée (50 % du parcellaire en cultures annuelles) de pratiques culturales de conservation, de même que d'une conversion ciblée de 10 % les plus vulnérables du parcellaire en cultures de couverture ou en prairie permanente. La rencontre des charges-cibles de phosphore, établies dans l'entente Québec-Vermont, ferait par ailleurs appel à des investissements, de façon complémentaire, dans la protection systématique des plaines inondables et des zones riveraines, dans l'implantation ciblée de structures de contrôle du ruissellement ainsi qu'à l'incorporation hâtive des engrais de ferme sur le parcellaire en cultures annuelles.

**Mots clés** : SWAT, modélisation, sédiments, phosphore, systèmes culturaux, scénarios, PGB, PAAC.

**ABSTRACT** - A. Michaud, I. Beaudin, J. Deslandes, F. Bonn and C.A. Madramootoo, *Spatio-temporal variability of sediment and phosphorus exports within the Pike River watershed, southern Québec. Part II - Evaluation of agri-environmental scenarios with SWAT*. *Agrosol.* 17 (1) : 21-32. An agreement between the governments of the province of Québec and the state of Vermont calls for a 41% decrease in phosphorus (P) loads reaching Missisquoi Bay, the northern portion of Lake Champlain. The agreement par-

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

ticularly targets the agricultural sector, since 80% of non-point source P inputs to the bay are associated with cultivated lands. In order to identify sustainable cropping practices likely to help meet the target P loads, the SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model was employed to assess hydrological processes, erosion and P mobility on the bay's principal Québec P contributing area, the 630 km<sup>2</sup> Pike River watershed. Strong in-watershed spatial clustering of vulnerability to non-point source exports highlights the need for targeted implementation of sustainable agricultural practices and soil conservation works, to derive the greatest environmental benefits. Planting cover crops over the 10% most vulnerable lands would result in a 21% drop in overall P exports at the watershed outlet, whereas the same 10% randomly distributed over the watershed would only contribute to a 6% drop in P exports. The study of different field-scale management scenarios indicated that achieving the targeted 41% reduction in P exports, would require the widespread (half the land devoted to annual crops) implementation of sustainable cropping practices, and the conversion of a specific 10% of the territory to either cover crops or permanent prairie-land. Meeting the P target-loads would require additional investments in the protection of flood-plains and riparian strips, the targeted construction of runoff-control structures, and the rapid soil incorporation of manures on lands dedicated to annual crops.

**Keywords :** SWAT, modeling, sediment, phosphorus, cropping systems, scenarios, BMP.

## Introduction

La baie Missisquoi, portion septentrionale du Lac Champlain, fait l'objet d'une action concertée de la part d'intervenants de l'état du Vermont et de la province de Québec visant à soustraire le plan d'eau aux épisodes récurrents de prolifération de cyanobactéries. La réduction des charges de phosphore (P) à la baie constitue une priorité d'intervention et a fait l'objet d'une entente entre les deux gouvernements, ciblant une réduction de 41 % des apports de phosphore à la baie. La problématique

de la mobilité du phosphore interpelle particulièrement le secteur agricole, dans la mesure où il est estimé que 80 % des apports diffus de P proviennent du parcelaire agricole du bassin versant (Hegman *et al.*, 1999). Une modélisation de l'hydrologie, des processus d'érosion et de la mobilité du phosphore a été effectuée à l'échelle du bassin versant de la Rivière aux Brochets (630 km<sup>2</sup>) (Beaudin *et al.*, 2006), principal contributeur québécois de P à la baie Missisquoi, en vue de soutenir la planification et la mise en œuvre d'actions agroenvironnementales concertées visant la mise en valeur du bassin versant et de la Baie Missisquoi. Le modèle a mis en relief une forte discrimination de la distribution spatiale des exportations de phosphore à l'échelle du bassin. Selon les conditions actuelles de régie des sols et des cultures, plus de 50 % des exportations de phosphore à l'exutoire du bassin ont été associées à des zones contributives correspondant à environ 10 % du bassin. La variabilité spatiale de l'activité hydrologique et de la mobilité du phosphore de la région à l'étude a aussi été mise en relief dans le cadre de dispositifs expérimentaux à l'échelle de la parcelle (Michaud et Laverdière, 2004), du bassin versant (Michaud *et al.*, 2004) et du territoire (Deslandes *et al.*, 2004). De telles observations relatives aux gradients spatiaux de l'activité hydrologique de surface sont aussi rapportées ailleurs en Amérique du Nord (Zollweg, 1996; Gburek, 2000) et dans les pays scandinaves (Kronvang *et al.* 1997; Ulen et Persson, 2003).

Dans une perspective opérationnelle, la forte discrimination spatiale de la mobilité du phosphore et des autres matières contaminantes des eaux de surface milite pour un ciblage spatial des interventions agroenvironnementales. Le modèle hydrologique constitue dès lors un outil privilégié pour cibler la mise en œuvre de pratiques culturelles et d'aménagements hydro-agricoles, de façon à en optimiser les retombées sur la qualité des eaux de surface. Le modèle hydrologique SWAT (Soil and Water Assessment Tool; Arnold et Fohrer, 2005) a été choisi afin d'appuyer le processus décisionnel des intervenants engagés dans la mise en valeur du bassin versant en raison de la finesse de ses unités spatiales et de sa capacité à reproduire l'influence des pra-

tiques culturelles alternatives en fonction des propriétés physico-chimiques spécifiques du parcelaire agricole. La présente étude expose les résultats des simulations de différents scénarios d'interventions agroenvironnementales, à l'échelle du bassin versant de la Rivière aux Brochets. L'efficacité relative des pratiques culturelles et des aménagements hydro-agricoles est estimée par rapport à un scénario de référence simplifié et représentatif des systèmes de production agricole actuellement en place dans le bassin versant (Beaudin *et al.*, 2006). La comparaison de l'efficacité des différentes pratiques culturelles et d'aménagements hydro-agricoles, selon différentes stratégies de ciblage spatial des interventions, vise l'atteinte de charges-cibles de phosphore établies dans l'entente Québec-Vermont (Gouvernement du Québec et Gouvernement de l'état du Vermont, 2002).

## Méthodologie

### Description du site d'étude

Le bassin versant de la Rivière aux Brochets draine un territoire de 630 km<sup>2</sup>. Cette rivière prend sa source dans le piedmont appalachien, dominé par la forêt, et termine son cours dans les paysages relativement plats, à vocation agricole, des Basses-Terres du Saint-Laurent. Les conditions climatiques, les caractéristiques physiographiques et les systèmes de production agricole propres au bassin versant ont été décrits par Beaudin *et al.* (2006). D'une précipitation annuelle moyenne de 1154 mm, dont 326 mm sous forme de neige, le bilan hydrologique estimé à l'échelle du bassin pour la période 2000-2003 chiffre le volume d'eau annuel moyen exporté à 476 mm, dont 218 mm seraient associés au ruissellement. Globalement, environ la moitié de la superficie du bassin versant est dédiée à l'agriculture. Compte tenu du gradient spatial des paysages, la portion aval présente une activité agricole plus intensive que les terres de l'amont, ce qui se traduit par des systèmes culturels dominés par le maïs et un bilan d'apport de phosphore à la surface du sol de l'ordre de 47 kg P/ha, comparativement à 21 kg P/ha en amont.

Les engrais de ferme constituent 67 % des apports de P sur le parcellaire agricole, complétés par des apports en engrais minéraux (33 %). Dans les conditions de régie du parcellaire propres au scénario de référence, l'exportation moyenne de phosphore total (P total) pour la superficie en culture a été estimée à 1,3 kg P/ha. Combinée aux utilisations urbaine et forestière du territoire, l'exportation annuelle de P total est estimée à 0,74 t P/an à l'exutoire de la Rivière aux Brochets. Cette charge est représentative des estimations produites par le Comité canado-américain de gestion du Lac Champlain (Lake Champlain Basin Program) qui situe les charges spécifiques de P de la Rivière aux Brochets parmi les plus élevées de l'ensemble du bassin versant du Lac Champlain.

## Modélisation des scénarios agroenvironnementaux

La modélisation de l'influence de différents scénarios de pratiques et d'aménagements de conservation (PAAC) sur le bilan hydrique et les exportations de sédiments et de phosphore a été réalisée à l'échelle du bassin versant de la Rivière aux Brochets pour la période 2000-2003. L'approche retenue a consisté à substituer les itinéraires techniques de gestion des sols et des cultures du scénario de référence, utilisés pour la calibration du modèle (Beaudin *et al.*, 2006), par de nouveaux itinéraires propres à l'implantation des PAAC. Les variables climatiques, descripteurs biophysiques et paramètres de calage du modèle hydrologique utilisés pour le scénario de référence ont été maintenus pour modéliser l'influence des différents scénarios agroenvironnementaux. Une période commune de modélisation pour les scénarios de référence et d'intervention permet ainsi de comparer l'influence relative des PAAC sur les exportations diffuses de sédiments et de nutriments selon différentes échelles spatiales, de l'unité de réponse hydrologique (URH) à l'ensemble du bassin versant, de même qu'à différentes échelles temporelles, du pas de temps journalier à pluriannuel.

Quatre types de PAAC, touchant différents aspects du système de production, ont fait l'objet de simulations hydrologiques. Le

**Tableau 1. Caractéristiques du parcellaire ciblé pour la simulation des scénarios agroenvironnementaux à des taux de ciblage de 10, 50 et 100 %.**

		% des superficies agricoles ciblées, par vulnérabilité décroissante aux exportations de P					
		10 % ciblé		50 % ciblé		100 % ciblé	
<b>Aire totale (ha)</b>		1 726		9 115		18 379	
<b>Utilisation du sol</b>	<b>Maïs</b>	91 %		92 %		67 %	
	<b>Soja</b>	4 %		4 %		8 %	
	<b>Céréale</b>	4 %		5 %		24 %	
	<b>Prairie</b>	0 %		0 %		0 %	
		<b>Moy.</b>	<b>É.T.</b>	<b>Moy.</b>	<b>É.T.</b>	<b>Moy.</b>	<b>É.T.</b>
<b>Caractéristiques des URH</b>	<b>Ruissellement (mm)</b>	256	72	255	79	238	98
	<b>Exportation de sédiments (t/ha)</b>	5,7	5,1	2,3	4,0	1,4	2,7
	<b>Exportation de P soluble (kg/ha)</b>	0,38	0,28	0,38	0,23	0,31	0,19
	<b>Exportation de P total (kg/ha)</b>	7,1	5,8	3,2	4,4	1,9	3,0
	<b>Fertilisation minérale et organique (kg-P/ha)</b>	53	60	67	51	58	44
	<b>Pente moyenne (m/m)</b>	0,041	0,023	0,021	0,029	0,017	0,028
	<b>Facteur d'érodabilité (0,013(tonne métrique m<sup>2</sup> h)/(m<sup>3</sup> tonne métrique cm))</b>	0,24	0,11	0,22	0,10	0,21	0,09

\* Les moyennes présentées dans le tableau sont pondérées en fonction des superficies des URH. Moy. = moyenne et É.T. = écart-type

premier type de scénario modifie le mode de gestion des engrais de ferme, le deuxième fait intervenir de nouvelles rotations des cultures, le troisième touche les travaux aratoires et le dernier type de scénario fait intervenir des aménagements hydro-agricoles du parcellaire. De façon générale, la faisabilité de ces PAAC a été documentée au Québec dans le cadre de recherches en parcelles ou en réseau d'essais à la ferme. L'influence respective de chacune des PAAC sur le cycle de l'eau et la mobilité des sédiments et du phosphore a d'abord été modélisée sur une base individuelle. En second lieu, l'influence de scénarios mixtes, combinant différentes PAAC, a fait l'objet de simulations. Pour les PAAC simulées individuellement comme pour les scénarios mixtes, les effets sur le bilan hydrologique, l'érosion et la mobilité du phosphore ont été modélisés selon des niveaux croissants d'implantation, soit 10, 50 et 100 % du total des superficies en cultures annuelles produites dans le bassin versant. Dans le but d'évaluer l'effet d'un ciblage des zones du parcellaire les plus vulnérables, la modélisation associée à une attribution aléatoire des PAAC aux différentes URH agricoles du bassin a été comparée à une attribution ciblée sur les URH démontrant les taux d'exportation de P les plus élevés dans le scénario de référence. Le tableau 1 présente les caractéristiques ainsi que les superficies

impliquées par l'application ciblée des PAAC sur les URH les plus vulnérables aux exportations de P alors que la figure 1 illustre leur distribution spatiale dans le bassin.

## Modalités d'épandage des engrais de ferme

Les capacités de modélisation journalière de SWAT ont été mises à profit pour quantifier l'effet de différentes périodes et de délais d'incorporation des engrais de ferme sur le bilan des exportations de P. Une analyse préliminaire de la sensibilité du modèle hydrologique a démontré que le délai d'incorporation s'avérait un facteur de risque de mobilité du phosphore beaucoup plus important que la saisonnalité de l'épandage. La modélisation des scénarios de gestion des engrais de ferme s'est ainsi centrée sur l'influence des délais à l'incorporation, en faisant varier la période de temps comprise entre l'épandage et le travail du sol. Dans un premier temps, les délais d'incorporation simulés dans le scénario de référence ont été systématiquement ramenés à moins de 24 heures pour l'ensemble des apports sur les cultures annuelles. Seules les dates des apports organiques ont été modifiées, de façon à précéder le travail du sol d'une journée. La comparaison des résultats de cette modélisation avec celle du scénario de référence permet de déduire l'effet net d'une optimi-

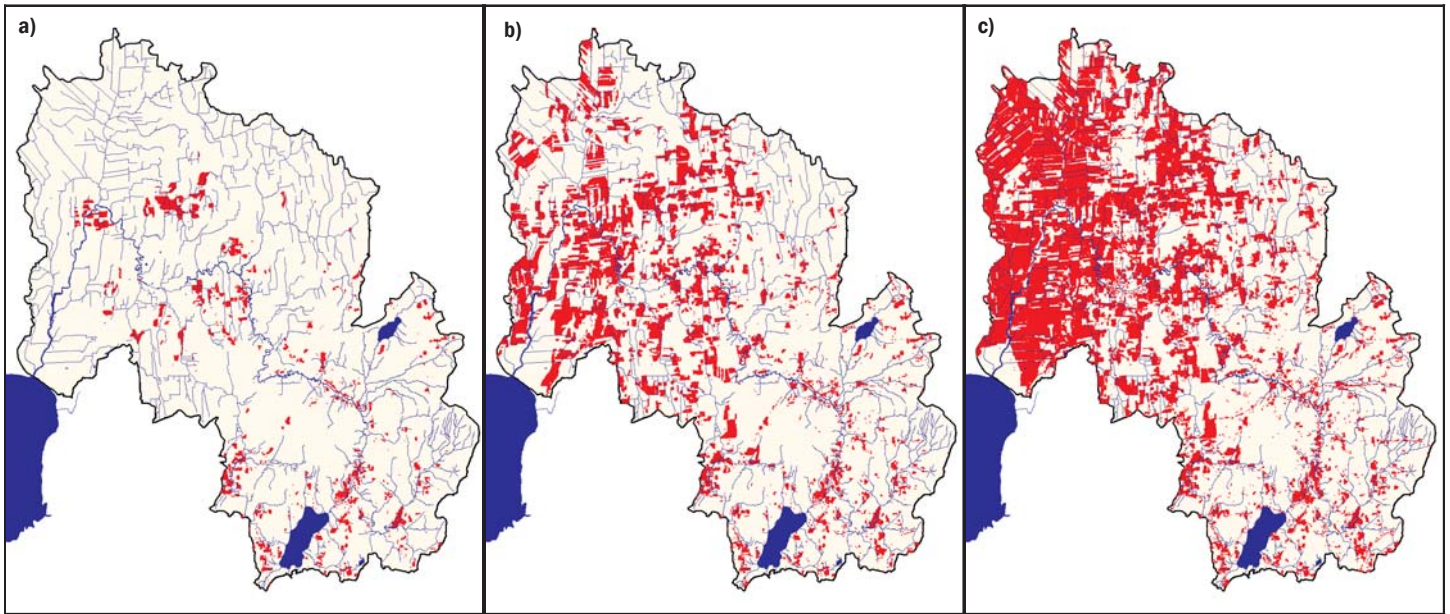


Figure 1. Représentation de la distribution spatiale des URH en cultures annuelles ciblées par l'application des PAAC à des taux de 10 (a), 50 (b) et 100 % (c).

sation des délais d'incorporation des engrais de ferme. À titre indicatif, les délais printaniers et automnaux à l'incorporation du scénario de référence, fixés par l'application d'une règle de 48 heures sans précipitation précédant l'épandage et le travail du sol, se situent entre 6 et 16 jours pour la période 2000-2003. Les précipitations pendant ces périodes varient entre 4 et 87 mm et affectent environ 25 % de la superficie du bassin versant (Beaudin *et al.*, 2006).

En second lieu, des ajustements aux périodes d'épandage des engrais de ferme ont été intégrés aux itinéraires techniques propres aux cultures de couverture et à la culture sur résidus. L'optimisation des délais d'incorporation (< 24 h) a alors été systématiquement appliquée dans les itinéraires techniques propres à ces PAAC.

### Cultures de couverture

Les scénarios de cultures de couverture sont basés sur une conversion des superficies en cultures annuelles en l'une ou l'autre des pratiques suivantes : 1) l'implantation de légumineuses et graminées fourragères pérennes; 2) la culture d'une céréale à paille associée à un trèfle rouge intercalé, et; 3) la culture d'une céréale à paille suivie d'une couverture de crucifères implantées à la dérobée. Les itinéraires techniques introduits dans le modèle ont été ajustés afin de tenir compte de la nouvelle régie

des épandages d'engrais de ferme. Alors que le scénario de référence épand 45 % des volumes d'engrais de ferme au printemps, 36 % en post-levée et 19 % à l'automne, l'épandage du scénario de cultures de couverture est plutôt centré sur une application en pré-semis (55 % des apports) et après la récolte de la céréale à paille, vers la mi-août. Les paramètres de croissance des cultures de couverture ont par ailleurs été ajustés de façon à refléter les rendements documentés au Québec (Institut de la statistique du Québec, 2002). Pour la prairie, la pratique d'épandage du scénario de référence est appliquée, soit trois épandages qui suivent les coupes de foin. De plus, l'ensemble des scénarios impliquant des cultures de couverture ont nécessité l'ajustement du coefficient de rugosité de Manning (N) (tableau 2), du numéro de courbe (CN) ainsi que des paramètres de couverture des cultures.

### Culture sur résidus

En tenant compte du type de sol, trois pratiques de cultures sur résidus ont été retenues et appliquées aux différentes cultures annuelles : 1) un travail réduit du sol comportant un déchaumage primaire à l'automne (DA); 2) un travail réduit du sol comportant un déchaumage printanier (DP) et; 3) le semis direct (SD), ne comportant aucun travail du sol autre que l'enfouissement de l'engrais de ferme en post-levée des cultures.

Afin de tenir compte de la faisabilité réduite de la culture sur résidus dans les sols présentant un mauvais drainage, ces trois pratiques culturales ont été attribuées selon les cultures et les groupes hydrologiques, tel que défini par le

Tableau 2. Caractéristiques des pratiques culturales associées aux différentes combinaisons de cultures et de groupes hydrologiques du sol utilisées en modélisation pour les scénarios de référence et de cultures sur résidus.

Scénarios	Cultures	Groupe hydrologique	Travail de printemps	Travail d'automne	Manning	Application de fumier
Référence		All	Cultivateur	Charrue à versoir	0,12	45 % printemps 36 % été 19 % automne
	Maïs	A, B	Semis direct	Aucun	0,325	100 % été
		C	Herse à disques	Aucun	0,32	55 % printemps 45 % été
D		Cultivateur	Herse à disques	0,30	45 % été	
Travail réduit	Céréale	A, B	Semis direct	Aucun	0,22	100 % été
		C	Herse à disques	Aucun	0,21	55 % printemps 45 % été
		D	Cultivateur	Herse à disques	0,20	45 % été
	Soja	A, B	Aucun	Aucun	0,25	Aucune
		C	Semis direct	Herse à disques	0,25	Aucune
		D	Cultivateur	Herse à disques	0,20	Aucune

« NRCS Soil Survey Staff » (1996). Pour les céréales à paille et le maïs, le semis direct a été attribué aux sols des groupes hydrologiques A et B, alors que le déchaumage de printemps et d'automne a été respectivement attribué aux groupes C et D. Pour le soja, le semis direct a d'abord été modélisé pour tous les groupes hydrologiques. Les modélisations préliminaires ont cependant démontré que le semis direct du soja sur les sols des groupes hydrologiques C et D n'offre qu'une réduction marginale des exportations de P total. Le déchaumage printanier ou automnal, de la même manière que pour les itinéraires techniques des cultures de maïs ou de céréales, a donc été retenu pour le scénario de cultures sur résidus du soja.

Compte tenu de la mobilité accrue du phosphore laissé en surface du sol, la régie des épandages des engrais de ferme a été adaptée aux différentes pratiques culturales de conservation. Pour l'ensemble des scénarios de cultures sur résidus, le délai d'incorporation des engrais de ferme est optimisé (< 24 h). En semis direct du maïs, les épandages ont été déplacés en post-lévé de cultures et comportent un enfouissement superficiel, simulant l'effet des jeux de coutres et de disques associé aux rampes d'épandage basse pression. En pratique de déchaumage automnal, la régie des épandages associée au scénario de référence est maintenue. En pratique de déchaumage printanier, les volumes d'engrais de ferme destinés à l'épandage d'automne dans le scénario de référence ont été déplacés au printemps, précédant le déchaumage, et à l'été en post-lévé de la culture. Pour les céréales à paille en semis direct, l'épandage se limite aux applications printanières, en simulant un enfouissement superficiel par rampe basse pression.

La simulation de ces différentes pratiques culturales a impliqué non seulement l'ajustement des paramètres de modélisation hydrologique mais également le recours à de nouveaux outils de travail du sol (tableau 2). Le choix de ces outils impose des changements dans la profondeur du travail et dans le coefficient de mixage de la couche de sol travaillée, ce qui affecte la distribution du P dans la couche arable. Les coefficients de rugosité du sol (N) ont

aussi été ajustés de façon à refléter l'état des surfaces non labourées et la présence de résidus. Enfin, le modèle actualise journalièrement les numéros de courbe (CN), qui influencent le ruissellement, et le facteur de couverture des cultures (facteur C de MUSLE) en fonction de la croissance des plantes, à partir d'indices initiaux représentatifs des états de surface.

### Aménagement hydro-agricole

La simulation des effets des aménagements hydro-agricoles à l'échelle du bassin versant de la Rivière aux Brochets a été calculée de façon empirique à partir de coefficients d'efficacité de piégeage (CEP). L'attribution d'une efficacité de piégeage à une URH donnée a pour effet d'atténuer l'exportation journalière de sédiments ou de phosphore qui sera transmise au réseau hydrographique du modèle.

La principale difficulté associée à cette approche est de documenter l'efficacité de piégeage des aménagements ciblés dans le contexte agroclimatique propre au bassin versant. Les efficacités de piégeage retenues pour la modélisation reflètent essentiellement les observations rapportées par Michaud *et al.* (2005) dans le cadre de

l'étude du bassin versant expérimental du Ruisseau au Castor. Le suivi de la qualité de l'eau à l'exutoire du bassin versant, localisé dans la portion aval de la Rivière aux Brochets, a démontré une réduction moyenne de 25 % de la concentration en phosphore total lors des crues du ruisseau suite à l'implantation de bandes riveraines arbustives et de fossés-avaloirs. Cette réduction significative des concentrations en P total suivant l'aménagement de la portion du parcellaire la plus active au plan hydrologique, en position basse du relief, a été attribuée principalement au piégeage des sédiments et du phosphore dans ces installations qui interceptent le ruissellement avant son entrée dans le cours d'eau (figure 2). Les contributions respectives des bandes riveraines et des fossés-avaloirs au piégeage des sédiments et du phosphore ont été attribuées à partir de coefficients rapportés dans la littérature (Lawrance *et al.*, 2002; Jarrett, 2001; Edwards *et al.*, 1999; Duchemin et Majdoub, 2004) de même qu'en fonction des proportions du parcellaire en culture qui s'égoutte vers la bande riveraine (33 %) ou vers le fossé-avaloir (67 %). Cette répartition des cheminements du ruissellement est basée sur les modèles numériques de terrain de haute précision réalisés dans la région à l'étude (Duguet *et*

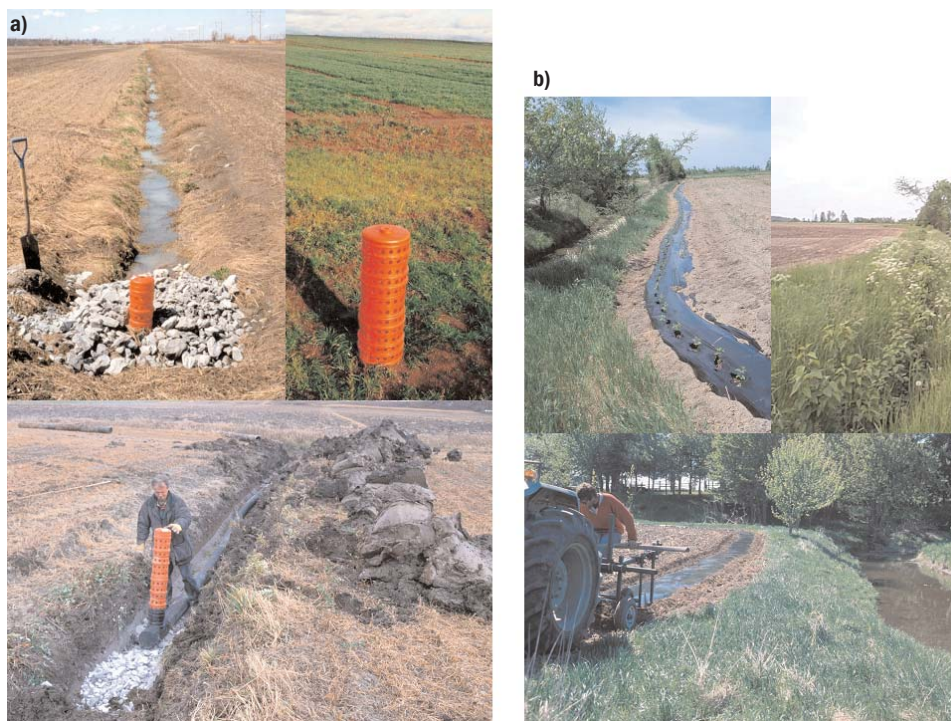


Figure 2. Installation d'avaloirs (a) et de bandes riveraines (b) dans le bassin versant de la Rivière aux Brochets.

al., 2002). Sur ces bases, le coefficient d'efficacité de piégeage global, estimé à 25 % à l'échelle du bassin versant, a été fractionné en deux composantes, soit 9 % pour les bandes riveraines aménagées en bordure du cours d'eau et 16 % pour les fossés-avaloirs. De plus, ces CEP n'ont été appliqués qu'à la fraction particulière du phosphore exporté de l'URH.

### Scénarios mixtes

La modélisation hydrologique de scénarios agroenvironnementaux mixtes implique l'intégration de différents types de PAAC et leur application à des portions variables, choisies de manière aléatoire ou ciblée, du parcellaire en culture. La procédure utilisée met à profit la structure spatiale du modèle SWAT, qui permet de combiner différents itinéraires techniques de gestion du parcellaire et de les associer aux URH désirées. La stratégie à la base de la sélection et de la distribution spatiale des PAAC a été guidée par trois critères :

- i) Une réduction annuelle moyenne de 41 % des exportations de phosphore total est ciblée à l'échelle du bassin versant de la Rivière aux Brochets, telle qu'établie dans l'entente Québec-Vermont;
- ii) La priorité est accordée à la simulation de PAAC dans les portions du parcellaire les plus vulnérables aux exportations de phosphore. Le flux annuel moyen en P total, établi à l'échelle de l'URH dans le scénario de référence, est alors utilisé comme critère de ciblage pour l'application des PAAC. Un statut prioritaire a aussi été assigné aux plaines inondables bordant le tronçon principal de la Rivière aux Brochets. Compte tenu des limitations du modèle SWAT à simuler la représentation spatiale de ce phénomène, la cartographie des plaines inondables réalisée par le Centre d'expertise hydrique du Québec (MDDEP, 2005) a été utilisée pour identifier les URH inclus dans la zone inondable;
- iii) Les PAAC présentant le moins de contraintes voient leur implantation généralisée à l'échelle du bassin versant, alors que les PAAC les plus con-

traignantes sont réservées aux URH ou aux sous-bassins qui présentent un degré de vulnérabilité élevé aux exportations de P. De façon à générer des scénarios réalistes qui minimisent les contraintes et optimisent les retombées environnementales, une approche progressive a été retenue dans la sélection et le ciblage des PAAC :

- a) Les scénarios agroenvironnementaux de base impliquent la protection des plaines inondables (290 ha), l'implantation généralisée de bandes riveraines et de fossés-avaloirs et l'optimisation des délais d'incorporation des engrais de ferme (tableau 4, scénarios 1 à 8);
- b) Les scénarios de conversion aux pratiques culturales de conservation font intervenir l'implantation de cultures sur résidus et de cultures de couverture, sans toutefois affecter la rotation des cultures principales (tableau 4, scénarios 9 à 16);
- c) Les scénarios de substitution des cultures impliquent la conversion des superficies en cultures annuelles les plus vulnérables, en céréales à paille comportant une culture de couverture associée ou à la dérobée (tableau 4, scénarios 17 à 25).

Dans l'ensemble de ces trois groupes de scénarios, l'aménagement de structures de contrôle du ruissellement (fossés-avaloirs) n'est simulé que pour les sous-bassins situés dans la portion aval du bassin et présentant un degré relativement élevé d'activité hydrologique de surface en raison de la nature des sols et de la dominance des cultures annuelles.

## Résultats

Le tableau 3 détaille les bilans hydriques et les exportations de P et de MES annuels moyens simulés pour la période 2000-2003 sur l'ensemble du bassin versant de la Rivière aux Brochets, suivant l'implantation ciblée ou aléatoire de chacune des PAAC, à des taux d'adoption de 10, 50 et 100 %. Ces résultats traduisent l'influence des PAAC sur les exportations globales de sédi-

ments et de phosphore à l'exutoire du bassin versant et incluent les contributions des URH non ciblées par les PAAC (forêt, marais, zones urbaines, etc.).

### Modalités d'épandage des engrais de ferme

L'élimination des délais d'incorporation des engrais de ferme, associés aux itinéraires techniques du scénario de référence, s'est traduite en une réduction globale de 3 % des exportations de P à l'échelle du bassin versant. Plusieurs facteurs inhérents à la modélisation contribuent à minimiser le risque de transport événementiel du phosphore provenant des épandages récents. D'une part, les périodes du scénario de référence, comprises entre l'épandage et le travail du sol, demeurent relativement courtes (4 à 16 jours) et ne génèrent qu'une portion limitée de la hauteur d'eau ruisselée annuellement (4 à 87 mm). De plus, seuls 25 % de la superficie en cultures annuelles est affectée par le scénario optimisant les délais d'incorporation. Notons également que le taux d'incorporation à l'épandage des engrais de ferme, recommandé par les concepteurs de SWAT (Neitsch *et al.*, 2002) et utilisé dans le scénario de référence, a été fixé à 80 %. Le pourcentage de réduction des exportations de P est néanmoins très variable à l'échelle des URH et reflète les variations des précipitations reçues entre l'épandage des matières fertilisantes et le travail du sol, la perméabilité du sol de l'URH et la quantité d'engrais de ferme appliquée. En conséquence, seule une portion limitée du parcellaire a vu des réductions sensibles des exportations de P. Celles-ci peuvent toutefois atteindre 2,5 kg P/ha ou 70 % de réduction par rapport aux exportations simulées dans le scénario de référence pour certaines URH associées à une faible perméabilité du sol et à des taux élevés d'apport de P provenant d'engrais de ferme.

### Cultures de couverture

À l'échelle du bassin versant, la simulation des scénarios de cultures de couverture n'affecte l'hydrologie que de façon marginale. À l'échelle de l'URH cependant, une réduction moyenne de 100 mm du ruissellement est associée à la conversion des URH en cultures annuelles, à prairie de

**Tableau 3. a) Effets des pratiques culturales de conservation (a) et de l'aménagement hydro-agricole (b) sur le bilan hydrique et les exportations de matières en suspension et de phosphore prédits par SWAT à l'exutoire du bassin versant de la Rivière aux Brochets selon des taux d'implantation croissants, de même qu'une distribution spatiale aléatoire ou ciblée.**

	Résultats des scénarios présentés par type et par taux d'application *																					
	Référence	Incorp. immédiate des fumiers	Culture pérenne (prairie de graminées)					Culture de couverture associée (céréale à paille et trèfle intercalaire)					Culture de couverture à la dérobée (céréale à paille et crucifère)					Culture sur résidus (travail réduit et semis direct)				
			100 %	10 % C	50 % C	10 % A	50 % A	100 %	10 % C	50 % C	10 % A	50 % A	100 %	10 % C	50 % C	10 % A	50 % A	100 %	10 % C	50 % C	10 % A	50 % A
Évapotranspiration (mm)	566	575	575	567	570	567	571	567	566	567	566	567	567	566	567	566	567	561	566	565	567	564
Ruissellement (mm)	218	218	191	215	204	215	204	204	217	211	217	211	202	216	210	216	210	208	217	213	217	213
Débit (mm)	476	476	469	476	473	476	472	476	476	476	476	476	476	476	476	476	476	481	477	478	477	479
Exportation de P total (kg)	46974	44910	17363	35624	22377	43568	32725	15017	35495	20708	43326	31144	21085	37161	25016	43922	34138	31708	42356	35199	45158	39333
P soluble (%)	25 %	25 %	73 %	33 %	55 %	27 %	37 %	59 %	32 %	48 %	26 %	33 %	50 %	31 %	44 %	26 %	32 %	30 %	27 %	30 %	25 %	27 %
Exportation de sédiments (t)	31267	31267	4417	21500	10031	28436	18615	5885	21759	10558	28500	18960	9963	22958	13376	28889	20955	17433	26331	20295	29717	24500
Réduction de P total (%)		3 %	63 %	24 %	52 %	7 %	30 %	68 %	24 %	56 %	8 %	34 %	55 %	21 %	47 %	6 %	27 %	32 %	10 %	25 %	4 %	16 %
Réduction de sédiments (%)		0 %	86 %	31 %	68 %	9 %	40 %	81 %	30 %	66 %	9 %	39 %	68 %	27 %	57 %	8 %	33 %	44 %	16 %	35 %	5 %	22 %

#### b) Résultats des scénarios par type et par taux d'application\*

Référence	Bandes riveraines					Structures de contrôle du ruissellement (fossés-avaloirs)					
	100 %	10 % C	50 % C	10 % A	50 % A	100 %	10 % C	50 % C	10 % A	50 % A	
Exportation de P total (kg)	46 974	43 046	45 105	43 864	45 831	44 809	40 638	44 298	42 092	45 589	43 771
Exportation de sédiments (T)	31 267	27 783	29 646	28 606	30 274	29 383	25 646	28 958	27 109	30 075	28 490
Réduction de P total (%)		7 %	2 %	5 %	1 %	3 %	12 %	4 %	9 %	1 %	5 %
Réduction de sédiments (%)		9 %	3 %	6 %	1 %	4 %	16 %	5 %	11 %	1 %	7 %

\* C = Choix ciblé des URH et A = Choix aléatoire des URH

graminées et de légumineuses fourragères. L'influence des cultures de couverture sur les hauteurs d'eau ruisselées se répercute de façon marquée sur les exportations de MES et de P à l'échelle du bassin versant. Une réduction d'environ 80 % des exportations prédites de sédiments à l'exutoire du bassin est associée à la conversion des cultures annuelles en prairie ou en céréale associée avec le trèfle (tableau 3a). Une diminution légèrement inférieure est notée pour le scénario des céréales à paille avec une culture à la dérobée (68 %). Rappelons toutefois que la culture de trèfle ou la chaume de crucifères sont enfouies au printemps dans les scénarios de cultures de couverture et de cultures à la dérobée. Il en résulte donc une période où le sol est à nu au printemps. En conséquence, le modèle attribue à ces scénarios des taux annuels de ruissellement et d'érosion relativement plus élevés qu'en prairie permanente.

Malgré une exportation relativement plus élevée de sédiments, le scénario de céréales

avec le trèfle rouge intercalé est associé à une exportation de P (15 017 kg) moins élevée que la prairie permanente (17 363 kg). Ces tendances dans les flux prédits de sédiments et de P sont attribuables aux effets des régies distinctes des sols et des engrais de ferme sur la mobilisation simulée du phosphore soluble. Les algorithmes du modèle simulent en effet une stratification du P dans la couche superficielle du sol en prairie, ce qui se traduit par un enrichissement du ruissellement en phosphore soluble. L'épandage après la troisième coupe de foin, pendant une période plutôt active au plan hydrologique, se traduit également par une exportation en P soluble relativement plus importante. De plus, les scénarios de cultures de couverture associées ou à la dérobée simulent l'incorporation de l'engrais de ferme et l'abandon de l'épandage automnal. Le modèle attribue ainsi une exportation de P soluble moins importante à ces scénarios qu'à la prairie. À titre indicatif, la conversion théorique de 100 % des

cultures annuelles en prairies amènerait un accroissement de la fraction de phosphore soluble prédite de 25 à 73 % à l'exutoire du bassin versant (tableau 3a). Cette proportion est plutôt de 59 % pour la culture de couverture associée et de 50 % pour la culture de couverture à la dérobée. Ce gradient dans la spéciation des formes de P prédites reflète les observations citées dans la littérature en dispositifs d'étude en parcelles expérimentales sous pluie simulée et sous précipitations naturelles dans la région (Michaud et Laverdière, 2004) et ailleurs en Amérique du Nord (Sharpley et Halvorson, 1994; Young et Mutchler, 1976).

La comparaison des réductions des charges de MES et de P associées à des taux croissants de conversion aux cultures de couverture (tableau 3a), de façon ciblée ou aléatoire, met en relief l'effet du ciblage spatial des PAAC sur le bilan global des exportations. La conversion en prairie de 10 % de la superficie en cultures annuelles la plus vulnérable se traduit en une réduction de l'ordre de

24 % des exportations de P et de 31 % des MES à l'exutoire du bassin versant. Une conversion aléatoire du même ordre n'entraîne environ que le tiers de ces réductions. Les mérites du ciblage spatial dans l'application des PAAC reflètent la forte discrimination spatiale de la vulnérabilité du parcelaire du bassin versant à l'étude et concordent avec les résultats généralement rapportés dans la littérature (Sharpley *et al.*, 1994; Daniel *et al.*, 1994).

### Culture sur résidus

Par rapport au scénario de référence en pratique conventionnelle, la conversion vers le travail du sol réduit des URH en cultures annuelles a amené des réductions moyennes de 44 % et de 32 % des exportations de sédiments et de phosphore à l'exutoire du bassin versant (tableau 3a). Lorsque seules les exportations issues des superficies en cultures annuelles sont con-

sidérées, les réductions des charges annuelles d'eau, de MES et de P atteignent en moyenne 35 mm, 43 % et 53 % respectivement. Ces efficacités prédites sont aussi cohérentes avec les observations généralement rapportées en Amérique du Nord dans le cadre d'études en parcelles sous pluie naturelle et simulée (McDowell *et al.*, 1984; McGregor *et al.*, 1999; Meyer *et al.*, 1999; Franti *et al.* 1999; Dabney *et al.*, 2000).

**Tableau 4. Exportations prédites de sédiments, phosphore soluble et phosphore total à l'exutoire du bassin versant de la Rivière aux Brochets associées aux scénarios agroenvironnementaux et pourcentage de réduction sur la base des exportations prédites dans le scénario de référence.**

N° scénario	Culture de couverture à la dérobée	Culture sur résidus et culture de couverture associée	Incorpo. immédiate des fumiers	Culture pérenne (prairie)	Bandes riveraines	Fossés-avaloirs	Ruissellement		Sédiments		P total		P soluble	
							mm	%	kt	%	t	%	t	%
<b>Scénario de référence</b>							181		30,5		46,1		1,7	
<b>Scénario agroenvironnemental de base</b>														
1				PI			181	0 %	30,2	1 %	45,8	1 %	11,8	0 %
2			TOUT				182	0 %	30,5	0 %	44,9	3 %	11,2	4 %
3					TOUT		181	0 %	27,8	9 %	43,0	7 %	11,7	0 %
4						TOUT	181	0 %	25,6	16 %	40,6	12 %	11,7	0 %
5			TOUT	PI			182	0 %	30,2	1 %	44,6	3 %	11,3	4 %
6					TOUT	TOUT	181	0 %	22,9	25 %	37,5	19 %	11,7	0 %
7			TOUT	PI	TOUT		182	0 %	27,4	10 %	41,6	10 %	11,3	4 %
8			TOUT	PI	TOUT	TOUT	182	0 %	22,5	26 %	36,3	21 %	11,3	4 %
<b>Scénario avec conversions aux pratiques agricoles de conservation</b>														
9		TOUT					171	6 %	16,1	47 %	30,1	35 %	9,2	22 %
10		TOUT	TOUT	PI	TOUT		171	6 %	14,3	53 %	27,9	40 %	9,2	21 %
11		C 10 %	TOUT	PI	TOUT		180	0 %	22,9	25 %	37,6	19 %	11,1	5 %
12		C 10 %	TOUT	PI	TOUT	TOUT	180	0 %	18,9	38 %	32,9	29 %	11,1	5 %
13		A 50 %	TOUT	PI	TOUT		176	3 %	21,0	31 %	34,8	25 %	10,3	12 %
14		A 50 %	TOUT	PI	TOUT	TOUT	176	3 %	17,3	43 %	30,5	34 %	10,3	12 %
15		C 50 %	TOUT	PI	TOUT		176	3 %	17,2	44 %	31,4	32 %	10,4	12 %
16		C 50 %	TOUT	PI	TOUT	TOUT	180	1 %	14,2	53 %	27,7	40 %	11,3	4 %
<b>Scénario avec substitutions de cultures</b>														
17	C 10 %						180	1 %	22,2	27 %	36,3	21 %	11,6	1 %
18	C 10 %		TOUT	PI	TOUT		180	1 %	19,9	35 %	32,9	29 %	11,2	5 %
19	C 10 %	A 45 %	TOUT	PI	TOUT		175	4 %	15,6	49 %	28,0	39 %	10,3	12 %
20	C 10 %	C 45 %	TOUT	PI	TOUT		176	3 %	14,3	53 %	26,7	42 %	10,4	11 %
21	C 10 %	A 45 %	TOUT	PI	TOUT	C 10 %	175	4 %	15,0	51 %	27,2	41 %	10,3	12 %
22	C 10 %	A 45 %	TOUT	PI	TOUT	TOUT	175	4 %	12,9	58 %	24,9	46 %	10,3	12 %
23	C 50 %		TOUT	PI	TOUT		173	4 %	11,2	63 %	22,4	51 %	10,9	7 %
24	C 50 %	+ 50 %	TOUT	PI	TOUT		168	8 %	8,3	73 %	18,9	59 %	9,7	17 %
25	C 50 %	+ 50 %	TOUT	PI	TOUT	TOUT	168	8 %	6,8	78 %	17,3	63 %	9,7	17 %

\* Pourcentage de réduction par rapport au scénario de base; C = application ciblée du PAAC sur un % des cultures annuelles; A = application aléatoire du PAAC sur un % des cultures annuelles; PI = plaines inondables; TOUT = PAAC appliquée sur la totalité de la superficie agricole; + 50 % et + 45 % indiquent que la PAAC est appliquée à la superficie agricole restante qui représente 50 % et 45 % des terres agricoles du bassin.



L'impact des différents niveaux de ciblage spatial dans l'implantation de la culture sur résidus par rapport au bilan global des exportations de sédiments et de phosphore à l'échelle du bassin versant est aussi présenté au tableau 3a. Similairement aux projections des effets des cultures de couverture, la conversion des 1726 ha (10 %) en cultures annuelles les plus vulnérables du bassin en cultures sur résidus entraîne des réductions d'environ 5000 t/an de MES (16 %) et de 4 600 kg P/an (10 %) alors qu'une conversion de 50 % des superficies amène des réductions de 35 et 25 % des MES et du P respectivement.

### Aménagement hydro-agricole

L'application, sur les 1726 ha (10 %) les plus vulnérables du bassin versant, de coefficients de piégeage du P de 7 % pour les bandes riveraines et de 16 % pour les structures de contrôle du ruissellement amène des réductions des exportations de P à l'exutoire du bassin de l'ordre de 3 et 5 % pour les bandes riveraines et les fossés-avaloirs respectivement (tableau 3b). Dans une perspective opérationnelle, l'interprétation de l'efficacité des aménagements hydro-agricoles intégrés aux scénarios agroenvironnementaux doit tenir compte du contexte spécifique des interventions réalisées dans le bassin versant du Ruisseau au Castor, soit l'aménagement, sur la portion du parcellaire la plus active au plan hydrologique (42 % de la superficie totale du bassin), de fossés-avaloirs aux exutoires

des champs non-drainés souterrainement (50 structures/10 km<sup>2</sup>) et l'implantation de quatre kilomètres de bandes riveraines permanentes d'environ trois mètres de large en haut des talus du tronçon principal du cours d'eau.

### Scénario agroenvironnemental de base

Les effets des scénarios mixtes de PAAC sur le bilan hydrique, l'érosion et la mobilité du phosphore sont rapportés au tableau 4. La substitution des superficies en cultures annuelles périodiquement inondées, par des prairies permanentes (scénario n° 1), sans apport d'engrais de ferme, résulte en une réduction de l'ordre de 1 % des exportations de P à l'exutoire du bassin. Cette estimation très conservatrice est basée sur la seule substitution des itinéraires techniques des superficies en plaine inondable (290 ha ou 0,5 % de la superficie du bassin) et fait abstraction des hauteurs d'eau attribuables au refoulement du réseau hydrographique, non modélisé dans le cadre de la présente étude. Globalement, la conversion des zones inondables en prairies, combinée à l'optimisation du délai d'incorporation des matières fertilisantes, l'implantation de bandes riveraines et l'aménagement de structures de contrôle du ruissellement, se traduit en une réduction de 21 % des exportations de P à l'exutoire du bassin versant de la Rivière aux Brochets (scénario n° 8).

### Scénarios avec conversion de pratiques agricoles

Les scénarios agroenvironnementaux n°s 9 à 16, présentés au tableau 4, traduisent l'influence de l'implantation de pratiques culturales de conservation sur des portions variables du parcellaire agricole, selon un ciblage spatial aléatoire ou ciblé. Ainsi, l'adoption de la culture sur résidus sur l'ensemble des URH en culture de maïs et de soya, combinée à l'association de légumineuses fourragères aux céréales à paille cultivées dans le bassin versant, résulte en une réduction de 47 et 35 % des charges de phosphore et de sédiments à l'échelle du parcellaire en culture du bassin (scénario n° 9). En combinant les contributions de la protection des plaines inondables, des modes d'épandage optimisés et des bandes riveraines (scénario n° 10), les réductions prédites des exportations de sédiments et de phosphore atteignent 53 et 40 % respectivement.

Globalement, ces simulations mettent en relief un rapport coût-bénéfice relativement avantageux des pratiques culturales dans l'atténuation des exportations de P prédites, comparativement aux ouvrages de contrôle de ruissellement. La figure 3 illustre l'effet d'une application ciblée et progressive des différentes pratiques culturales de conservation sur les taux d'érosion et de mobilité du P à l'échelle du bassin versant. La discrimination spatiale de la vulnérabilité du parcellaire en culture aux processus

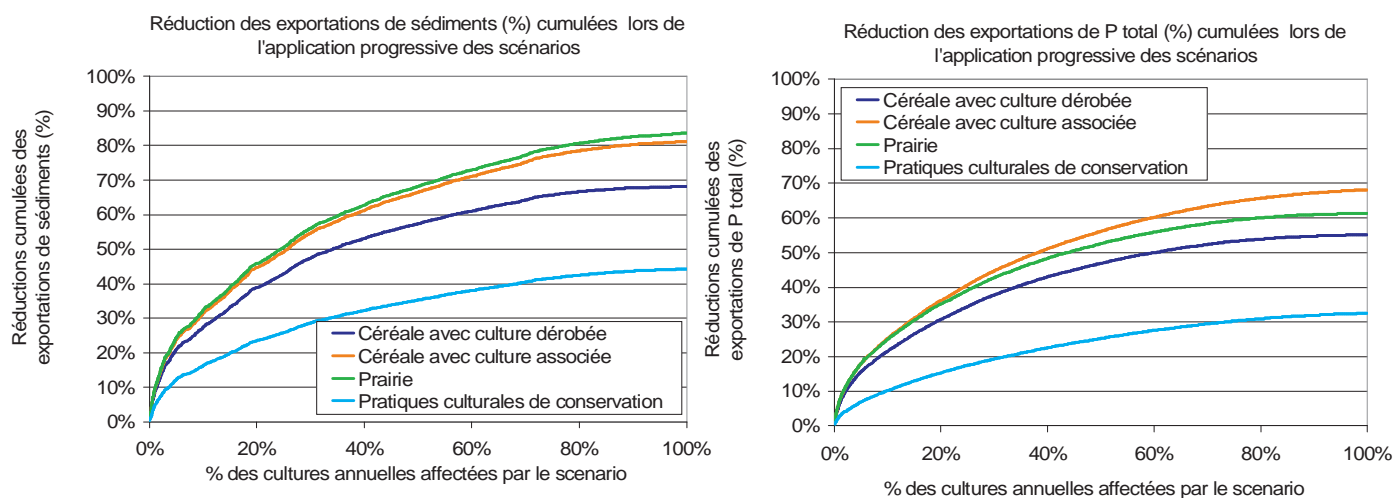


Figure 3. Réduction des exportations de sédiments (a) et de phosphore (b) associée à un taux croissant d'adoption des différents scénarios des PAAC sélectionnés en priorisant les URH les plus vulnérables aux exportations de P.

d'érosion et de mobilisation du phosphore fait en sorte que l'accroissement de l'efficacité des PAAC diminue avec une application à des proportions grandissantes des superficies en cultures annuelles. Ainsi, au-delà d'une application des PAAC à 50 % du parcellaire le plus vulnérable aux exportations de P, les gains associés à l'implantation des pratiques culturales de conservation s'amenuisent. La comparaison des courbes témoigne par ailleurs du potentiel d'atténuation des exportations diffuses de phosphore relativement plus élevé des cultures de couverture, associées ou à la dérochée. Tel que discuté précédemment, l'efficacité de la culture de couverture tient à sa protection anti-érosive, mais aussi aux avantages que la pratique comporte au plan de l'incorporation des engrais de ferme.

### Scénarios avec conversion de cultures

Les scénarios agroenvironnementaux n°s 17 à 25 (tableau 4) rapportent les prédictions du modèle suite à la conversion des superficies en cultures annuelles les plus vulnérables du bassin versant, en cultures de couverture. Compte tenu de l'efficacité élevée des cultures de couverture à réduire les exportations de P selon le modèle, une conversion ciblée de 10 % des superficies en cultures annuelles les plus vulnérables se traduit, à elle seule, en une réduction de 21 % des exportations diffuses de phosphore (scénario 17). Combinée à la conversion en pratiques culturales de conservation sur un 45 % additionnel des superficies en cultures annuelles, de même qu'aux composantes du scénario de base (scénario n° 8), la conversion de 10 % des superficies les plus sensibles en cultures de couverture permet de rencontrer les objectifs de réduction des exportations de P ciblés dans l'entente Québec-Vermont. À cet égard, le scénario n° 21, compatible avec un objectif de 41 % de réduction des apports de P à la baie Missisquoi, apparaît comme le scénario le plus réaliste. La distribution spatiale aléatoire de l'application des pratiques culturales de conservation est en effet représentative d'une réponse volontaire des gestionnaires d'entreprises agricoles, alors qu'une conversion des 10 % des superficies les plus vulnérables, et l'aménagement de structures de contrôle du ruissellement se prêtent bien à des interventions ciblées et

appuyées par un programme adéquat de compensation à caractère écologique.

## Conclusion

Dans une perspective opérationnelle, un premier constat important découlant de la présente étude est la faisabilité de la rencontre des objectifs de réduction de 41 % des charges de phosphore, convenus entre le Vermont et le Québec pour la mise en valeur de la baie Missisquoi. Malgré les incertitudes inhérentes au processus de modélisation hydrologique, les simulations des différents scénarios d'interventions agroenvironnementales mettent en relief que l'atteinte de cet objectif représente un chantier agroenvironnemental de très grande envergure, comportant notamment l'implantation de pratiques culturales de conservation sur la moitié du parcellaire en cultures annuelles, de même qu'une conversion de 10 % du parcellaire le plus vulnérable en cultures de couverture ou en prairie permanente. La rencontre des charges-cibles de phosphore ferait par ailleurs appel à des investissements, de façon complémentaire, dans la protection systématique des plaines inondables et des zones riveraines, dans l'implantation ciblée de structures de contrôle du ruissellement et à l'incorporation hâtive des engrais de ferme sur le parcellaire en cultures annuelles.

La modélisation des différents scénarios agroenvironnementaux souligne l'importance du ciblage spatial lors de l'implantation des PAAC. Globalement, les résultats de modélisation font valoir qu'une application ciblée des PAAC aux portions du parcellaire en cultures annuelles les plus vulnérables, engendre des gains environnementaux trois fois plus élevés qu'une implantation aléatoire sur une superficie équivalente. Quant aux efficacités attribuées aux différentes PAAC, le modèle attribue les plus importantes réductions des exportations de phosphore aux cultures de couverture, suivies de la culture sur résidus, puis des aménagements hydro-agricoles. Le potentiel élevé d'atténuation des exportations diffuses de phosphore, attribué par SWAT aux cultures de couverture (74 % en moyenne sur les URH en cul-

tures annuelles), tient à la combinaison des propriétés anti-érosives de ces cultures et d'un itinéraire technique qui permet l'incorporation des engrais de ferme. Les différentes pratiques de cultures sur résidus réduisent aussi considérablement les exportations de phosphore (46 % en moyenne sur les URH en cultures annuelles). Leur efficacité relative démontre cependant une variabilité plus importante que les cultures de couverture, en raison de l'influence des propriétés du sol sur les hauteurs d'eau ruisselées et de l'accumulation des nutriments dans la couche superficielle du sol qui interagit avec le ruissellement. En ce qui a trait aux aménagements hydro-agricoles, rappelons que les efficacités de piégeage des sédiments et du phosphore utilisées dans la modélisation (25 %) traduisent l'influence d'un type particulier d'aménagement, soit la combinaison de fossés-avaloirs et de bandes riveraines arbustives en bassin expérimental. Un constat découlant des efficacités relatives des PAAC modélisées est la priorité à accorder à l'implantation de pratiques culturales au champ comme première ligne de défense agroenvironnementale. Les structures de contrôle du ruissellement remplissent alors un rôle complémentaire dans le polissage des flux exportés.

Dans une perspective de planification stratégique d'interventions ciblées sur la qualité de l'eau, la structure de la base de données à référence spatiale développée, combinée aux capacités prédictives de SWAT, constitue un outil privilégié d'accompagnement du milieu agricole et des différents intervenants de la communauté dans l'élaboration et la mise en œuvre concertée de plans d'action réalistes, susceptibles de rencontrer les attentes de l'ensemble de la population.

## Remerciements

Les travaux présentés dans cet article ont été rendus possible grâce au soutien financier ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP), 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 particulièrement à remercier Richard Lauzier, Pierre Beaudet et Charles Savoie du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ), Martin Mimeault, Georges Gangbazo et Alain Le Page du MDDEP, et Chantal D'Auteuil de la Corporation bassin versant baie Missisquoi (CBVBM) pour leur support technique et l'apport de données.

## Références

- Arnold, J.G. et N. Fohrer. 2005. SWAT 2000 : current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling. *Hydrological Processes*, vol. 19, pp. 563-572.
- Beaudin, I., J. Deslandes, A. R. Michaud, F. Bonn et C.A. Madramootoo. 2006. Variabilité spatio-temporelle des exportations de sédiments et de phosphore du bassin versant de la Rivière aux Brochets, sud du Québec. Partie I - Paramétrage, calibrage et validation du modèle SWAT. *Agrsolution*, vol. 17 (1) 4-20.
- Dabney, S.M., R.L., Raper, L.D. Meyer et C.E. Murphree. 2000. Management and subsurface effects on runoff and sediment yield from small watersheds. *International Journal of Sediment Research*, vol. 15(2), pp. 217-232.
- Daniel, T.C., A.N. Sharpley, D.R. Edwards, R. Wedepohl, et J.L. Lemunyon. 1994. Minimizing surface water eutrophication from agriculture by phosphorus management. *Journal of Soil and Water Conservation*, supplément vol. 49, pp. 30-38.
- Deslandes, J., A. R. Michaud et F. Bonn. 2004. 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, NY, United States. pp. 271-290.
- Duchemin, M. et R. Majdoub. 2004. Les bandes végétales filtrantes : de la parcelle au bassin versant. *Vecteur Environnement*, vol. 37(2), pp. 36-50.
- 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. *Agrisol*, vol. 13(2), pp. 140-148.
- Edwards, C.L., R.D. Shannon et A.R. Jarrett. 1999. Sedimentation basin retention efficiencies for sediment, nitrogen and phosphorus from simulated agricultural runoff. *Transactions of the ASAE*, vol. 42(2), pp. 403-409.
- Franti, T.G., J.M. Laflen, D.A. Watson. 1999. Predicting soil detachment from high-discharge concentrated flow. *Transactions of the ASAE*, vol. 42(2), pp. 329-335.
- Gburek, W.J., A.N. Sharpley et G.J. Folmar. 2000. Critical areas of phosphorus export from agricultural watersheds. Dans: *Agriculture and phosphorus management: the Chesapeake Bay*. A. N. Sharpley (Ed.). Lewis Publishers, Boca Raton, FL, United States. pp. 83-105.
- Gouvernement du Québec et Government of the state of Vermont. 2002. Agreement concerning the phosphorus reduction in Missisquoi Bay, 5 p. Available on line: [http://www.lcbp.org/PDFs/missbay\\_agreeEN.pdf](http://www.lcbp.org/PDFs/missbay_agreeEN.pdf).
- Hegman, W., D. Wang, et C. Borer. 1999. Estimation of Lake Champlain basinwide nonpoint source phosphorus export. Technical Report No. 31. Lake Champlain Basin Program. Grand Isle, VT, United States. 69 p.
- Institut de la statistique du Québec. 2002. Superficie des grandes cultures, rendement à l'hectare et production, par région administrative. Institut de la statistique du Québec, Gouvernement du Québec, Québec, Canada. Disponible en ligne : [http://www.stat.gouv.qc.ca/donstat/econm\\_finnc/filr\\_bioal/culture/culture/aml10002.htm](http://www.stat.gouv.qc.ca/donstat/econm_finnc/filr_bioal/culture/culture/aml10002.htm)
- Jarrett, A. R. 2001. Designing sedimentation basins for better sediment capture. Dans : *Proceedings of the International Symposium on Soil Erosion Research for the 21<sup>st</sup> Century*. 3 - 5 janvier 2001, Honolulu, Hawaii. J. C. Ascough II et D.C. Flanagan (Eds.), ASAE, St. Joseph, MI, United States. pp. 63-66.
- Kronvang, B., A. Laubel et R. Grant. 1997. Suspended sediment and particulate phosphorus transport and delivery pathways in an arable catchment, Gelbaek stream, Denmark. *Hydrological Processes*, vol. 11, pp. 627-642.
- Lawrence, R., S. Dabney et R. Schultz. 2002. Improving water and soil quality with conservation buffers. *Journal of Soil and Water Conservation*, vol. 57(2), pp. 37A-43A.
- McDowell L.L. et K.C. McGregor. 1984. Plant nutrient losses in runoff from conservation tillage corn. *Soil and Tillage Research*, vol. 4, pp. 79-91.
- McGregor, K.C., R.F. Cullum et C.K. Mutchler. 1999. Long-term management effects on runoff, erosion, and crop production. *Transaction of the ASAE*, vol. 42 (1), pp. 99-105.
- MDDEP. 2005. Cartographie des zones inondables en eau libre, région hydrographique 03 – Saint-Laurent sud-ouest, cartes 1 :10 000 numéro 31H03-100-5101. Centre d'expertise hydrique du Québec, ministère du Développement durable, Environnement et Parcs du Québec, Québec, Canada. Disponible en ligne : <http://www.cehq.gouv.qc.ca/zones-inond/cartographie/>
- Meyer, L.D., S. Dabney, C.E. Murphree et W.C. Harmon. 1999. Crop production systems to control erosion and reduce runoff from upland silty soils. *Transaction of the ASAE*, vol. 42(6), pp. 1645-1652.
- Michaud, A.R., R. Lauzier et M.R. Laverdière. 2004. Temporal and spatial variability in nonpoint source phosphorus in relation to agricultural production and terrestrial indicators : the Beaver brook case study. 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, 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. *Agrisol*, vol. 16(1), pp. 47-59.

- 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.
- 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, United States. 458 p.
- NRCS Soil Survey Staff. 1996. National soil survey handbook, title 430-VI. National Resources Conservation Service, Government Printing Office, Washington, D.C., United States.
- Sharpley, A.N., T.C. Daniel et D.R. Edwards. 1994. Phosphorus movement in the landscape. *Journal of Production Agriculture*, vol. 6(4), pp. 492-500.
- Sharpley, A.N. et A.D. Halvorson. 1994. Management of soil phosphorus. Dans: *Soil processes and water quality*. R. Lal et B.A. Stewart (eds.), Lewis publisher, CRC Press. pp. 7-91.
- Ulen, B. et K. Persson. 2003. Field-scale phosphorus losses from a drained clay soil in Sweden. *Hydrological Processes*, vol. 13: 2801-2812.
- Young R.A. et C.K. Mutchler. 1976. Pollution potential of manure spread on frozen ground. *Journal of Environmental Quality*, vol. 5, pp. 174-179.
- Zollweg, J.A. 1996. Field study to support hydrologic management. Dans: *Watershed restoration management*. AWRA, Syracuse, NY, United States. pp. 129-134.