

# Colloque sur le phosphore

---

**Une gestion  
éclairée !**

## **LES OUTILS D'ÉVALUATION ET DE GESTION DU RISQUE, DU BASSIN VERSANT AU CHAMP... DES DIAGNOSTICS PLUS PRÉCIS ET PORTEURS DE SOLUTIONS**

**Aubert Michaud**, agr. M.Sc.

Chercheur, Physique et conservation des sols

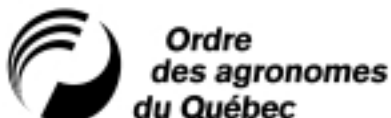
Institut de recherche et développement en agroenvironnement (IRDA)

[aubert.michaud@irda.qc.ca](mailto:aubert.michaud@irda.qc.ca)

Collaborateur : Roger Rivest, agr.

Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de  
l'Alimentation du Québec

M. Aubert Michaud est agronome et candidat au doctorat à la FSAA de l'Université Laval Il est chercheur en conservation des sols et de l'eau à l'IRDA. Il a travaillé de nombreuses années à titre de conseiller agricole au MAPAQ, où il a coordonné des activités de formation continue, d'encadrement de réseaux d'essais à la ferme, de promotion et de mise en œuvre de programmes d'aide financière à l'égard de la conservation des sols et de l'eau. Ses recherches en cours portent principalement sur le contrôle des sources diffuses de contamination de l'eau dans le cadre d'actions concertées en bassins versants agricoles.



# LES OUTILS D'ÉVALUATION ET DE GESTION DU RISQUE, DU BASSIN VERSANT AU CHAMP... DES DIAGNOSTICS PLUS PRÉCIS ET PORTEURS DE SOLUTIONS

## Introduction

---

La conciliation des objectifs de productivité agricole et de protection de l'environnement questionne aujourd'hui nos modèles et méthodes de production. En matière de services-conseils agronomiques, l'intégration de la dimension environnementale dans le processus décisionnel à la ferme ou en gestion du territoire amène l'agronome à se familiariser avec de nouveaux outils de gestion, à travailler à de nouvelles échelles, à passer d'un cadre d'action individuel à des interventions concertées et enfin, à interagir avec plus d'intervenants, dans un contexte de multidisciplinarité professionnelle. La description du système de transfert du phosphore en milieu agricole est un exercice complexe qui sollicite particulièrement ces aptitudes. C'est une démarche qui fait appel à des connaissances sur les systèmes de production agricole, la condition des sols et la sensibilité de l'écosystème aquatique. Le bassin versant est l'échelle naturelle de travail pour faire le lien entre ces composantes du paysage agricole. Enfin, au-delà des aspects scientifiques et techniques, la réduction des exportations diffuses de phosphore en milieu agricole est un défi qui se mesure d'abord à l'échelle humaine, qui appelle au consensus social, à l'action concertée et cohérente de nombreux intervenants.

La présente conférence présente certains concepts et outils pertinents à la description du système de transfert du phosphore, dans une perspective de gestion des bassins versants agricoles. Les projets de recherches multidisciplinaires ciblés sur la problématique d'eutrophisation de la Baie Missisquoi en ont largement inspiré le traitement. Depuis 1997, diverses initiatives de recherche et d'intervention agroenvironnementale ont cours dans cette *région-laboratoire* d'étude du phosphore en milieu agricole. Avec la participation d'intervenants locaux du secteur agricole, les équipes de l'IRDA, du MAPAQ, des universités McGill, de Sherbrooke, Laval et du Vermont, de même que le Centre d'expertise hydrique du Québec conduisent des projets de recherche à différentes échelles d'études, de la parcelle expérimentale jusqu'au bassin versant. Celles-ci ont pour objectif de développer une meilleure compréhension de la dynamique globale du phosphore dans les systèmes de production agricole, les sols et l'écosystème aquatique de la région. Dans une perspective d'appui scientifique aux initiatives communautaires de mise en valeur des tributaires de la Baie

Missisquoi, le développement et la validation d'indicateurs de gestion des pertes de phosphore est le principal résultat attendu de ces projets. Cette présentation trace un premier bilan des connaissances acquises et formule certaines recommandations pertinentes aux démarches de diagnostic et d'intervention agroenvironnementale ciblées sur le contrôle des exportations diffuses de phosphore en milieu agricole.

### **Une contamination de plus en plus diffuse, de moins en moins confuse...**

En raison de la dominance des apports diffus de phosphore en milieu agricole, le bassin versant constitue l'unité naturelle d'analyse et de diagnostic agroenvironnemental ciblée sur le contrôle du processus d'eutrophisation de l'écosystème aquatique. Alors que les sources ponctuelles de phosphore en milieu agricole contribuent à un taux relativement constant aux exportations de P, elles trouvent leur origine en des endroits précis et identifiables, tels que les bâtiments d'élevage, les cours d'exercice et les sites d'entreposage ou de manutention des fumiers. Elles ont un impact plus marqué sur la qualité de l'eau des ruisseaux et rivières en période d'étiage, alors que le débit du cours d'eau est à son plus bas. Les sources diffuses de phosphore sont, quant à elles, disséminées sur l'ensemble du territoire du bassin versant et nécessitent des événements de ruissellement importants pour se manifester. Malgré leur nature épisodique, les charges de P transportées en solution ou en suspension dans les eaux de ruissellement, lorsque le bassin versant est soumis à une intense activité hydrologique, contribuent à la majeure partie des exportations annuelles de P.

Dans un cadre d'intervention ciblé sur le contrôle de l'eutrophisation d'un plan d'eau, comme c'est le cas pour la Baie Missisquoi, la récupération des usages de l'eau est liée à la réduction de la **concentration** en P dans le plan d'eau. Ce sont toutefois les **charges** de P en provenance du bassin versant, en relation avec le **seuil** de tolérance du plan d'eau, qui constituent le critère de référence pour guider l'analyse et la planification de l'intervention. En fait, les charges de P documentées pour les bassins versants tributaires de la Baie Missisquoi ne sont pas plus élevées, sinon moindres, que celles observées dans d'autres bassins agricoles à vocation intensive au Québec, ou ailleurs en Occident (Tableau 1). C'est la vulnérabilité du plan d'eau et surtout les usages qui lui sont associés qui commandent l'urgence de la situation. Les études du bilan de masse du P dans le Lac Champlain (VDEC et NYDEC, 1997) ont permis de cibler un objectif de réduction annuelle des charges de P des tributaires de la Baie Missisquoi à 70 tonnes par année. Cette réduction des importations de P dans la Baie devrait y ramener la concentration moyenne de

P de 0,035 mg P/l au critère-cible de 0,025 mg P/l, de façon à soustraire les eaux de la Baie au processus d'eutrophisation. Pour le Vermont comme pour le Québec, l'effort de réduction des charges de P se situe ainsi à environ 35 % des charges annuelles de P. Cet objectif, récemment entériné dans le cadre de l'entente Québec-Vermont sur la réduction de charges de phosphore dans la Baie Missisquoi, interpelle particulièrement le monde agricole. En effet, plus de 90 % des charges de P à la Baie (167 t P/an) sont attribuées à des sources diffuses, alors que 79 % du phosphore provenant de sources diffuses est attribuable à l'agriculture, qui occupe 26 % du territoire du bassin versant de la Baie (Hegman *et al.*, 1999).

**Tableau 1 : Coefficients d'exportation de phosphore de sources agricoles diffuses rapportées dans diverses études québécoises, nord-américaines et européennes réalisées en bassins versants expérimentaux**

Localisation	Utilisation du territoire	Coeff. d'exportation (kg P-Total/ha-an)	Source
<b>Bassins de la Baie Missisquoi et du Lac Champlain</b>			
Bassin Ruisseau-aux-Castors	Agricole	1.57	Michaud, 2001
Bassins Brochets et Missisquoi	Mixte	1.40	Hegman et al., 1999
Bassin LaRoche	Mixte	4.80	Hegman et al., 1999
Autres bassins du Lac Champlain (USA)	Mixte	0.42	Hegman et al., 1999
<b>Bassins au Québec</b>			
Ruisseau Turmel, Beauce	Agricole	1.5-2.3 (1.15)*	CART et al., 1998
Ruisseau Saint-Esprit, Lanaudière	Agricole	2.56	Papineau et Enright, 1997
Grillade, Bellechasse	Agricole	1.84	Duchemin et Bernard, 2001
<b>Revue de littérature</b>			
<b>Conditions climatiques applicables au Québec</b>			
Revue littérature avant 1993	Agricole	0.10-7.17 (0.50)**	Budd et Meals, 1994
Revue littérature 1993-1999	Agricole	0.09-2.66 (1.26)*	Hegman et al., 1999
<b>Europe et Etats-Unis</b>			
Angleterre	Prairies	1.80	Loehr (1974)
Angleterre	Légumes	0.70-0.90	Johnes et al. (1994)
Allemagne et Suisse	Prairies	0.40	Loehr (1974)
Ohio (USA)	Maïs-labour	6.20	Loehr (1974)
Ohio (USA)	Maïs-semis direct	3.00	Loehr (1974)
Bassin de la Garonne (France)	Agricole	2.68	Probst (1985)
Finlande	Agricole	0.42-0.86	Pietilainen et Rekolainen (1991)

\*: Moyenne;

\*\* : Meilleure estimation.

## **Une contamination à mobilité réduite, dans les deux sens...**

Compte tenu du bilan des interventions agroenvironnementales dans le Nord-Est américain ciblées sur la réduction des charges diffuses de P, un objectif de réduction de l'ordre de 35 % des charges actuelles pose un sérieux défi à relever pour les communautés rurales du bassin

versant. L'expérience nord-américaine a en effet démontré que la contamination bactériologique ainsi que les charges de sédiments et d'azote répondent plus rapidement aux interventions agroenvironnementales que les charges de phosphore. (Meals, 1992). Des interventions soutenues pendant plus de dix ans dans les bassins versants Laplatte et Saint-Alban au Vermont, par exemple, n'ont pas permis de réduire les exportations de phosphore (Jokela *et al.*, 2002). Les succès observés au Québec en matière de réduction des contaminations d'origine agricole semblent confirmer cette tendance. L'intervention ciblée sur la réduction des charges de sédiments dans le ruisseau Perron au Lac Saint-Jean (10 km<sup>2</sup>) a permis le rétablissement rapide des populations de truites mouchetées dans ce petit bassin versant agricole (Paquin, 1996). En Beauce, des réductions significatives des charges ammoniacales et bactériologiques ont été mesurées dans le bassin versant du ruisseau Turmel (5 km<sup>2</sup>), sans toutefois observer de réduction de la charge de phosphore (CART, 1998). Dans Lanaudière, malgré l'adoption généralisée de pratiques agricoles de conservation dans le bassin versant, les eaux du ruisseau Saint-Esprit (22 km<sup>2</sup>) n'ont pas démontré d'améliorations tangibles au plan des exportations de phosphore (Papineau et Enright, 1997). La difficulté de réduire les exportations diffuses de P tient en grande partie au fait que le P est retenu et tend à s'accumuler dans les sols et l'écosystème aquatique. Bien que les charges de P charriées en rivière dépendent en bonne partie des stocks de P entreposés dans les sols et le réseau hydrographique en amont, elles n'en représentent cependant qu'une mince fraction. En matière de diagnostic agroenvironnemental, la relative inertie du P implique que la description du système de transfert de phosphore du bassin versant doive quantifier non seulement les exportations de P, mais aussi les apports et le stockage en cours de route, depuis la ferme, dans les parcelles cultivées et enfin jusqu'au cours d'eau.

La relative inertie du P appelle aussi au réalisme dans la formulation d'objectifs de réduction des exportations diffuses de P, à l'égard de la superficie de bassin ciblée, comme en termes de période requise pour l'atteinte des résultats. On doit manifestement s'attendre à un déphasage important entre la mise en place des mesures de conservation et la réduction tangible des exportations. Pour la Baie Missisquoi, le plan d'action Québec-Vermont s'appuie sur une période de 20 ans pour réduire les exportations de P en deçà du seuil ciblé. En termes de priorisation d'interventions agroenvironnementales ailleurs au Québec, le constat de la difficile réversibilité des exportations de P de sources agricoles diffuses milite pour une stratégie préventive, visant le maintien ou la récupération d'usages de l'eau dans des bassins versants ciblés. Compte tenu de la dynamique du processus d'eutrophisation, l'élaboration des plans d'action doit s'articuler sur la base d'objectifs de réduction des charges de P et du seuil de

tolérance spécifique du milieu aquatique ciblé. Dans un cadre d'action concertée en bassin versant, les activités de caractérisation de l'écosystème aquatique doivent ainsi accompagner, sinon précéder l'évaluation des pressions agroenvironnementales sur le territoire en amont. Elles permettent en effet de supporter la toute première étape du processus décisionnel, soit de confirmer la pertinence de l'intervention et d'exprimer sur une base quantitative les objectifs de l'intervention.

## **Diagnostic terre-à-terre ?**

---

Le processus décisionnel en matière d'intervention agroenvironnementale ciblée sur le phosphore requiert des indicateurs de gestion quantitatifs, pertinents et accessibles, qui permettent de décrire et d'établir des relations entre l'état de l'environnement aquatique, la pression exercée par les systèmes de production et la vulnérabilité du parcellaire en culture. Les activités de caractérisation du milieu aquatique permettent d'évaluer la sévérité de la problématique et de quantifier les objectifs de réduction de charges de P. Elles n'expliquent cependant pas l'origine des exportations de P dans le bassin versant. Le principal objectif de la partie terrestre du diagnostic est d'identifier les portions du territoire, de l'entreprise agricole ou de la parcelle particulièrement vulnérables aux exportations de P, afin d'y intervenir en priorité, et ainsi assurer des retombées optimales aux investissements dans les pratiques et les aménagements de conservation. Les deux principaux constats à retenir des études réalisées en Amérique du Nord, pertinentes à la dynamique des exportations diffuses de P en bassins versants agricoles, sont les suivants :

- La répartition spatiale des exportations diffuses de P est généralement très **hétérogène** à l'échelle du bassin versant. Une portion relativement restreinte de la superficie du bassin contribue de façon dominante au bilan des exportations de P.
- Cette répartition reflète la **combinaison** des effets de facteurs **Sources**, prédisposant à l'accumulation de P potentiellement mobilisable à la surface du sol, et de facteurs **Transport**, prédisposant à la prise en charge du P sous forme dissoute et particulaire dans le ruissellement. L'un comme l'autre, ces facteurs tendent à présenter des gradients spatiaux démarqués dans le territoire, reflétant l'intensité des systèmes de production et les particularités hydrologiques du paysage.

Alors que la pollution agricole de sources diffuses était reconnue, dans les années 1970, comme principale source d'eutrophisation des eaux de surface, notamment dans le bassin des Grands Lacs (PLUARG, 1980), le besoin d'appuis stratégiques aux initiatives de réduction des sources diffuses de P a amené les milieux de recherche nord-américains à développer différents outils de modélisation ou d'indexation du risque de pertes de P. Les modèles AGNPS (Agricultural Nonpoint Pollution Model ; Bingner *et al.*, 2001) et SWAT (Soil and Water Assessment Tool ; Arnold *et al.*, 1998), par exemple, sont des outils utilisés par certains états américains pour estimer les charges de phosphore et autres sources de contamination, dans le cadre de l'application de la politique environnementale nationale basée sur des charges quotidiennes maximales (TDML) par bassin versant. Les outils de modélisation du devenir du P dans les bassins versants permettent de mieux comprendre la migration du phosphore à travers les écosystèmes terrestre et aquatique en milieu rural. La complexité des processus biophysiques à simuler, et surtout l'importance des banques de données pertinentes aux pratiques agricoles, aux sols, à la qualité de l'eau nécessaires pour faire tourner, calibrer et valider les modèles, ont cependant limité leur utilisation dans le contexte de projets d'intervention en bassins versants agricoles.

En réponse au besoin d'outils de gestion adapté au contexte décisionnel en agriculture, le Service américain de conservation des ressources naturelles (NRCS) en collaboration avec les équipes de recherche nord-américaines ont développé une approche d'indexation des risques de pertes de phosphore à l'échelle de la parcelle. Le « P-index » (Lemunyon and Gilbert, 1993), ou l'indice de risque de pertes en phosphore (IRP), et les adaptations qui en ont découlé aux Etats-Unis (Gburek *et al.*, 2000), (NCRS-Iowa, 2001) et au Québec (Bolinder, 1998) s'appuient sur des concepts généralement admis dans la pratique agronomique et environnementale pour qualifier de façon relative la vulnérabilité du parcellaire aux exportations de phosphore. Conceptuellement, la vulnérabilité relative d'une parcelle donnée est exprimée par une combinaison de facteurs *Sources* et *Transport*. Les facteurs *Sources* décrivent les conditions qui prédisposent à l'accumulation de P potentiellement mobile à l'exportation en surface de la couche arable. La richesse du sol est un facteur *Source*, de même que les pratiques culturales et de fertilisation qui prédisposent à l'accumulation de P à la surface du sol. Les facteurs *Sources* sont donc particulièrement influencés par le calendrier des opérations culturales et de fertilisation et expriment l'importance des stocks de P **potentiellement** disponibles pour l'exportation hors de la parcelle. Pour qu'il y ait exportation effective de P, il faut qu'il y ait une prise en charge et le transport du P par l'écoulement des eaux de surface ou souterraines. Le

modèle de l'IRP qualifie ainsi l'intensité des processus d'érosion et de ruissellement par l'équation universelle de pertes de sol (USLE; Wischmeier et Smith, 1978) et l'indice de ruissellement CN (Curve number; SCS, 1972; Monfet, 1979). Ces indicateurs du facteur *Transport* sont privilégiés en raison de leur utilisation généralisée en gestion des sols et de l'eau en Amérique du Nord depuis les années 1970.

Conceptuellement, les approches de modélisation ou d'indexation des risques d'exportations de P s'appuie sur le même principe, soit l'expression de l'effet combiné de la gestion des sols et des facteurs hydrologiques sur la mobilisation du P par les eaux de ruissellement. Si les bases conceptuelles font relativement consensus, c'est la pondération à allouer aux différentes composantes de l'IRP ainsi que leur interaction qui demeurent problématiques à valider. En raison de l'important défi logistique que présente une telle entreprise, les indices proposés n'ont pas profité à ce jour de validation exhaustive en bassin versant agricole. La principale réalisation à cet égard demeure celle de Sharpley (1995) qui a relié de façon significative l'IRP aux pertes de phosphore mesurées sur 16 ans dans 30 bassins versants du Sud-Ouest américain.

Quelle que soit l'évolution en matière de développement d'indicateurs agroenvironnementaux de la mobilité du phosphore chez nos voisins américains ou outre-mer, les particularités du climat et des systèmes de production québécois commandent une certaine prudence dans la transposition des modèles. En effet, si nous disposons au Québec d'un indicateur agroenvironnemental validé à l'égard de l'enrichissement des sols en P, l'interprétation des facteurs hydrologiques comporte, quant à lui, beaucoup plus d'incertitudes. Au plan climatique, l'importance des événements hivernaux et printaniers dans le bilan annuel du ruissellement et des exportations de P est encore peu documentée dans la littérature scientifique. L'aménagement des terres au Québec, somme toute inédit en Amérique du Nord, pose aussi certaines limites à la transposition des résultats de recherche réalisées outre-frontières. Le redressement systématique et la haute densité de cours d'eau aménagés à des fins agricoles qui voisine les 2 km/km<sup>2</sup> dans les zones de production intensive, le cadastre allongé et étroit de même que l'importante superficie en drainage souterrain, confèrent à nos bassins versants une grande efficacité à évacuer les volumes d'eau excédentaires. Ces modifications du régime hydrique des bassins versants a permis l'allongement de la saison de production et un accroissement marqué de la productivité des systèmes de production agricole. En matière de mouvements diffus de phosphore dans les bassins versants, un retrait rapide des eaux se traduit cependant par une plus grande agressivité du ruissellement à détacher et à charrier les sédiments de la



couche arable. Ces processus sont reconnus comme responsables de la plus grande part des exportations diffuses de P sous forme particulaire. Une évacuation rapide des eaux excédentaires implique aussi un temps de réaction plus court des formes solubles de phosphore avec la matrice du sol, ce qui réduit l'efficacité des processus de rétention des formes solubles de P dans la couche arable du sol.

Un autre élément problématique de l'adaptation de l'approche de l'IRP aux conditions hydrologiques du Québec tient au fait que les indices ne sont produits que sur la base des propriétés de la parcelle. Cette approche s'appuie sur le concept que les processus actifs à la seule échelle du champ expliquent le vulnérabilité relative de la parcelle aux processus de ruissellement. Les champs peuvent donc ainsi être comparés sur la base des composantes de l'IRP, sans égards à leur position dans le réseau hydrologique du bassin. Concluant sur leurs propres recherches et celles d'autres équipes, Gburek *et al.* (2000) ont jugé cette hypothèse non fondée et ont proposé une nouvelle formulation des composantes hydrologiques de l'IRP, basée sur l'estimation de superficie contributive au ruissellement de surface et formulée en termes de distance aux cours d'eau et de périodes de retour hydrologiques. L'évaluation des facteurs hydrologiques à une échelle plus large que la parcelle est d'autant plus pertinente au Québec en raison du profil de nos précipitations. Chez nos voisins du sud, l'intensité généralement plus élevée des précipitations fait en sorte que la capacité d'infiltration du sol y contrôle plus souvent la production de ruissellement. Compte tenu de l'intensité généralement modérée des précipitations au Québec (< 15 mm/h), la répartition surface/souterraine de l'écoulement y est plutôt contrôlée par le développement de l'état de saturation du sol. C'est donc le caractère cumulatif des précipitations et les particularités du paysage qui conditionnent les cheminements hydrologiques, notamment une position basse dans le relief, la proximité de la nappe phréatique, un sous-sol peu perméable, la proximité ou la convergence des cours d'eau. L'interprétation de la composante hydrologique du diagnostic agroenvironnemental dépasse ainsi les limites de la parcelle agricole; elle implique une prise en compte des particularités biophysiques du paysage qui compose le bassin versant.

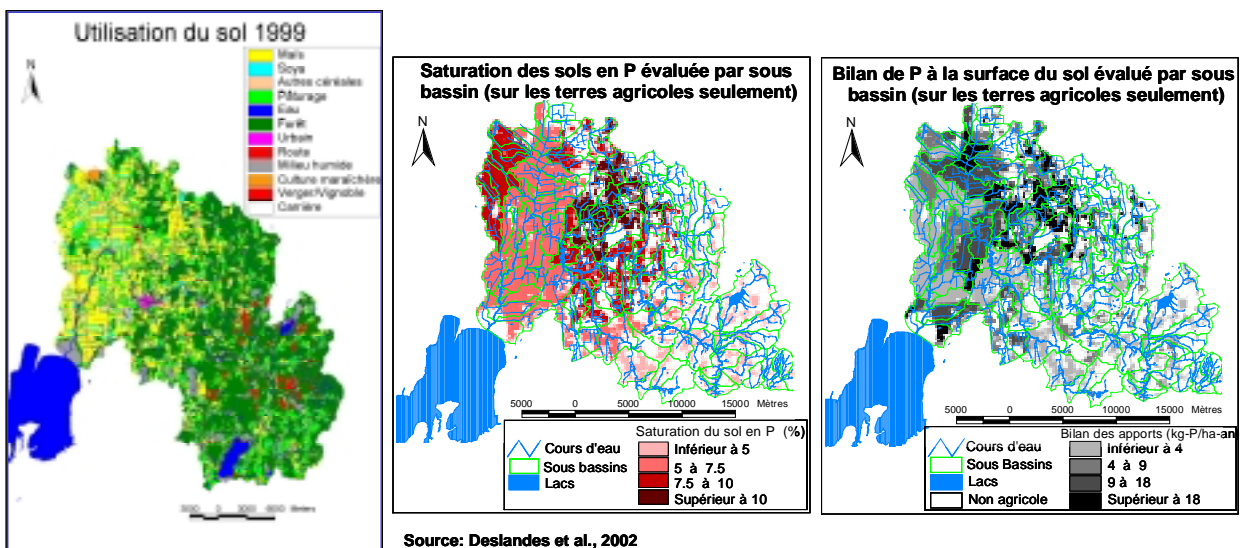
En concluant sur les acquis et les limites des concepts développés à ce jour à l'égard du devenir du P dans les bassins versants agricoles, certaines balises peuvent être posées à l'égard du développement de systèmes d'information destinés à appuyer l'intervention agroenvironnementale :

- L'estimation des pressions exercées par les systèmes de production agricole et la vulnérabilité biophysique du territoire sur la base d'indicateurs *Sources* et *Transport* est bien adaptée à la caractérisation de la problématique et à l'élaboration de plans d'action.
- Il est avantageux de procéder séparément à l'évaluation et à la représentation spatiale des indicateurs *Sources* et *Transport* et de les associer selon un mode multiplicatif plutôt qu'additif, de façon à mettre en relief leur interaction. Les zones critiques, combinant des niveaux importants de P potentiellement mobile et une intense activité hydrologique, sont alors particulièrement mises en relief.
- Des évaluations séparées des facteurs *Sources* et *Transport* permettent de supporter leur développement selon des échelles spatiales distinctes. La parcelle et l'exploitation agricole constituent des unités de gestion adaptées à la représentation et à l'agrégation spatiale des facteurs *Sources*. Le sous-bassin hydrographique, ou l'unité de réponse hydrologique qui traduit l'influence du paysage sur les cheminements de l'eau, constitue une échelle naturelle de développement d'indicateurs *Transport*.
- Il faut aussi retenir que les systèmes d'information n'ont pas pour unique fonction de diagnostiquer les problèmes, mais également d'évaluer éventuellement le mérite des scénarios d'intervention et de générer des données pertinentes à leur mise en œuvre. Puisqu'on ne peut présumer a priori des choix de gestion de l'agriculteur ou des gestionnaires du territoire, le système doit offrir convivialité et souplesse dans la mise à jour des données d'entrée. Aussi, l'intégration spatiale des caractéristiques du paysage agricole et des systèmes de culture permet de produire de nouvelles données techniques, fort utiles à la conception et à la mise en œuvre d'interventions, notamment en matière d'aménagements hydroagricoles.
- Enfin, rappelons que la fonction des indicateurs agroenvironnementaux est d'évaluer, sur une base relative et spatiale, la vulnérabilité du territoire aux pertes de phosphore, et non pas de se substituer aux mesures des charges de P dans le milieu aquatique. Dans une perspective d'appui au processus décisionnel de l'intervention à l'échelle du bassin versant, il y a bien sûr intérêt à mettre en relation l'évolution des indicateurs relatifs aux milieux terrestre et aquatique, de façon à supporter la formulation ou la révision des objectifs, le ciblage et l'évaluation environnementale des interventions.

## **Facteurs Sources : rien ne se perd, rien ne se crée!**

Les activités de recherche dans le bassin versant de la Rivière-aux-Brochets ont mis en relief les distributions spatiales contrastantes des facteurs *Sources* et *Transport* à différentes échelles d'étude. Des portions relativement restreintes du territoire ou du parcellaire présentent ainsi une activité hydrologique accrue ou des bilans d'apports en P fortement excédentaires. Dans l'ensemble, la spécialisation et la concentration des exploitations de productions animales expliquent les gradients spatiaux observés dans les *Sources* et l'enrichissement des sols en P. Les patrons spatiaux du relief et des propriétés des sols associées aux paysages du bassin exercent, pour leur part, le contrôle hydrologique sur les exportations de P.

**Figure 1 : Utilisation du sol, saturation des sols et bilan d'apports en phosphore à la surface du sol du bassin versant de la Rivière-aux-Brochets**



L'étude des bilans d'apports en relation avec l'évolution du stock de P dans les sols constitue une démarche incontournable du diagnostic agroenvironnemental du bassin versant. Témoignant des interventions agroenvironnementales dans les bassins LaPlatte et Saint-Alban au Vermont, Jokela *et al.* (2002) concluent que l'équilibre à long terme des bilans d'apport de P à la ferme est nécessaire pour atteindre des réductions tangibles des apports de P au Lac Champlain. Le phosphore a un comportement conservateur : rien ne se perd, rien ne se crée en matière de mouvements de P dans le bassin versant. Il n'est pas sujet aux pertes dans l'atmosphère ou aux processus de biodégradation, comme c'est le cas par exemple pour l'azote, les pesticides ou la contamination bactériologique. Ainsi, il est possible de *boucler* le

bilan de masse du P en quantifiant les stocks générés et prélevés dans les systèmes de production, accumulés dans les sols ou exportés dans le réseau hydrographique. L'interprétation de la mobilité et des impacts potentiels du P s'appuie ainsi sur des seuils critiques d'accumulation ou d'exportation dans les milieux terrestres et aquatiques. Au Québec, nous disposons d'outils agronomiques validés à l'égard de l'interprétation des stocks terrestres de P. L'indice de saturation des sols, exprimé sur la base du ratio Mehlich-3 P/AL (Giroux et Tran, 1996; Tran et Giroux, 1990), combiné à l'évaluation des apports et des prélèvements à l'échelle du bassin, permettent de mettre en relief les secteurs présentant des risques élevés de P potentiellement mobilisable et d'en projeter l'évolution dans le temps.

### **Sources et bilans du P: un gradient à l'échelle du territoire**

---

Un aperçu de la disparité spatiale des *Sources* de P à l'échelle du bassin versant de la Rivière-aux-Brochets a été produit par Deslandes *et al.* (2002) dans le cadre de l'initiative de recherche FCAR/IRDA sur les indicateurs agroenvironnementaux du P. La Rivière-aux-Brochets, identifiée comme principal contributeur de P à la Baie Missisquoi (Hegman *et al.*, 1999) draine un bassin d'une superficie de plus de 630 km<sup>2</sup>. L'étude a permis de généraliser la production d'indices *Sources* et *Transport* pour l'ensemble du territoire en faisant appel à la télédétection, l'intégration spatiale de banques de données à référence spatiale et le recours aux composantes hydrologiques du logiciel SWAT (Arnold *et al.*, 1993). La représentation de la vulnérabilité du territoire aux pertes de phosphore a été estimée sur la base d'unités de réponse hydrologique (URH) d'une superficie moyenne de 5 km<sup>2</sup> (500 ha) et mise en relation avec des indicateurs de qualité du milieu aquatique. La variabilité relative de 18 sous-bassins d'échantillonnage aux exportations de P a été estimée au moyen de 10 campagnes ponctuelles d'échantillonnage, réalisées lors des principaux épisodes de forte activité hydrologique de l'automne 2000 et du printemps 2001.

Globalement, le bilan des apports de phosphore à la surface du sol pour l'ensemble des superficies en culture du bassin de la Rivière-aux-Brochets apparaît modéré, présentant une moyenne de 8,3 kg P/ha par année. Sur une base massique, les apports de P en engrais de ferme, estimés à 435 t P/an, représentent près du double des apports en engrais minéraux (233 t P/an) et équivalent approximativement aux prélèvements des cultures (426 t P/an). La représentation des stocks terrestres de P s'est, pour sa part, appuyée sur l'analyse spatiale des résultats de dosage de 1 417 échantillons de sol, géoréférencés à l'échelle de la municipalité.

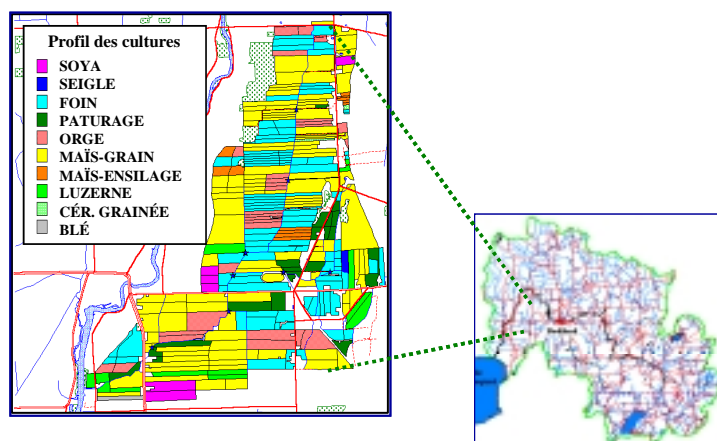
La figure 1 illustre la distribution spatiale des indices de saturation des sols et des bilans d'apports en phosphore estimés à l'échelle des URH du bassin versant. Dans l'ensemble, la distribution spatiale des bilans et des indices de saturation met en relief une corrélation significative entre ces deux facteurs *Sources* ( $r = 0,59$ ,  $p < 0,05$ ). Cette relation bilan-enrichissement met en relief des dynamiques contrastantes entre les sous-bassins à l'amont et à l'aval de Bedford. Un gradient similaire dans l'occupation du territoire fait en sorte que la vocation agricole (superficie en culture/superficie totale) explique à elle seule une grande partie de la variabilité des concentrations en P observées aux stations d'échantillonnage ( $r = 0,78$  et  $0,87$ ,  $< 0.001$ , respectivement pour les fractions totales et solubles). En intégrant les contributions du taux de saturation des sols ou des bilans d'apport en P, l'explication de la variabilité des concentrations en P dans les sous-bassins d'échantillonnage atteint respectivement 75 %, 66 % et 74 % pour les fractions totales, solubles et biodisponibles de P. L'étude démontre ainsi une dominance des facteurs *Sources* sur les facteurs *Transport* à expliquer les mouvements diffus de P à l'échelle du bassin versant. Bien que les indicateurs de l'activité hydrologique, tels que l'indice CN de ruissellement ou l'élévation des sous-bassins dans le relief, aient aussi démontré des contributions significatives à l'explication de la variabilité des pertes de P, leur effet est en bonne partie confondu à celui des facteurs *Sources*. En somme, l'indice de ruissellement, tout comme les indices d'apports et d'enrichissement des sols, témoignent du même gradient spatial dans l'intensité des systèmes de production caractérisant le bassin de la Rivière-aux-Brochets et traduisent la variabilité spatiale observée dans les apports de P à la rivière. Quant au recours à cette approche pour le diagnostic d'autres bassins versants agricoles au Québec, retenons que l'étude démontre la pertinence et la faisabilité de caractériser les bilans de masse du P et les gradients spatiaux dans l'enrichissement des sols, sur la base de données généralement accessibles pour l'ensemble du territoire agricole québécois.

### **Les données agronomiques : l'heure juste**

Si les données de recensement agricole reflètent les tendances dans l'enrichissement du territoire en P, ce sont en définitive les données agronomiques, à l'échelle du parcellaire, qui permettent de donner vraiment l'heure juste à l'égard des bilans de masse du P et de supporter le service-conseil aux entreprises agricoles. L'étude conduite sur le bassin versant du Ruisseau-aux-Castors (Michaud *et al.*, 2002), a permis de décrire les relations entre les apports, les prélèvements et la teneur des sols en P dans un cadre typique de production

laitière et de grandes cultures du Sud-Ouest québécois. La vulnérabilité aux exportations de P de ce petit tributaire de la Rivière-aux-Brochets, à vocation exclusivement agricole, avait été soulignée par une étude diagnostique de la Rivière-aux-Brochets (Caumartin et Vincent, 1994). Conduite parallèlement à un projet de mise en valeur du milieu riverain initié par l'équipe du MAPAQ du Bureau de renseignements agricoles de Bedford, en collaboration avec les 24 entreprises agricoles du bassin, l'étude avait pour objectif de caractériser la dynamique du P dans ce petit bassin versant de 11 km<sup>2</sup>. Concrètement, l'étude a décrit et mis en relation spatiale la gestion et les particularités biophysiques du parcellaire avec la qualité de l'eau des branches et du tronçon principal du réseau hydrographique.

**Figure 2. : Utilisation des sols dans le bassin versant expérimental du Ruisseau-aux-Castors pour l'année de référence 1999 et localisation dans le bassin de la Rivière-aux-Brochets**



Source: Michaud et al., 2002

Globalement, les données agronomiques témoignent d'un bilan d'apports moyen en P pour l'ensemble du bassin de l'ordre de 12,2 kg P/ha pour la saison de production 1998, qui passe à 9,3 kg P/ha pour la saison 1999. Ces bilans modérés reflètent la vocation laitière et céréalière du bassin, alors que les apports en P des engrais de ferme (moyenne de 12,8 kg P/ha) demeurent inférieurs aux prélèvements des cultures (moyenne de 16,8 kg P/ha). Les données à l'échelle du parcellaire permettent de préciser la distribution spatiale des bilans d'apports (Figure 3). Dans les faits, un nombre restreint de parcelles présentent des bilans fortement excédentaires. La qualification des apports minéraux et organiques à l'échelle du parcellaire démontre que les engrais de ferme contribuent pour une large part aux excédents de P, plus particulièrement en 1999, alors que les conditions climatiques ont affecté à la baisse les

superficies d'épandage automnal. L'évolution des apports minéraux entre 1998 et 1999 témoignent toutefois d'une nette tendance à la baisse, reflétant la mise à jour des plans de fertilisation entreprise par les agriculteurs, avec le support-conseil de l'équipe du MAPAQ de Bedford.

Les apports excédentaires de P, associés aux engrais de ferme, reflètent la pratique courante dans le bassin de combler les besoins en azote des cultures par l'apport de fumier. À la ferme, des taux d'épandages ciblés sur les besoins en azote sont justifiés au plan économique. Les rapports N/P des engrais de ferme sont généralement bien en deçà du rapport N/P des besoins de cultures. Au plan environnemental, cette pratique sera problématique pour les eaux du Ruisseau-aux-Castors, si elle conduit à un enrichissement excessif des sols. Les données d'analyses de sol des parcelles du bassin indiquent qu'environ le tiers de celles-ci ont atteint le seuil de vulnérabilité de 10 % (Mehlich-3 P/Al), alors que le seuil critique de 20 % est atteint auprès de 6 % d'entre elles (Figure 3). L'absence de corrélation significative à l'échelle du parcellaire observée entre les bilans d'apports actuels et la richesse des sols témoigne d'une rotation des superficies d'épandage. Celle-ci se charge, en pratique, de redistribuer les apports excédentaires de P provenant des engrais de ferme au fil des ans. Les saturations en P des sols reflètent ainsi le cumul, dans le temps, des apports excédentaires d'engrais de ferme. Puisque ces derniers sont généralement liés aux contraintes historiques de disponibilité de superficies d'épandage des fermes d'élevage spécialisé, les apports excédentaires donnent lieu à l'émergence de patrons spatiaux dans l'enrichissement des sols du bassin versant. Dans le cas du Ruisseau-aux-Castors, ces contraintes ont favorisé l'enrichissement des sous-bassins localisés à l'est, dans la partie la plus élevée du bassin. La prise en compte des taux de saturation des sols en phosphore dans les plans de fertilisation et les scénarios de valorisation des engrais de ferme y deviennent donc particulièrement pertinents.

**Tableau 2 : Apports, prélèvements et bilan global des apports à la surface du sol à l'échelle du bassin versant expérimental du Ruisseau-aux-Castors pour les saisons de production 1998 et 1999**

	SAISON DE PRODUCTION 1998				
	APPORTS		PRÉLÈVEMENTS DES CULTURES	BILAN D'APPORTS <sup>(1)</sup>	APPORTS EXCÉDENT. <sup>(2)</sup>
	ENGRAIS DE FERME	ENGRAIS MINÉRAUX			
AZOTE (kg -N/ha)	38,2	104,7	106,5	36,4	59,3
PHOSPHORE (kg -P/ha)	13,1	16,0	16,9	12,2	14,9
	SAISON DE PRODUCTION 1999				
AZOTE (kg -N/ha)	36,6	95,3	103,2	28,7	59,6
PHOSPHORE (kg -P/ha)	12,5	13,5	16,7	9,3	13,9

(1) Sommation des bilans à l'échelle du parcellaire, incluant les bilans négatifs (prélèvements > apports)  
(2) Sommation des bilans à l'échelle du parcellaire, excluant les bilans négatifs (prélèvements > apports)

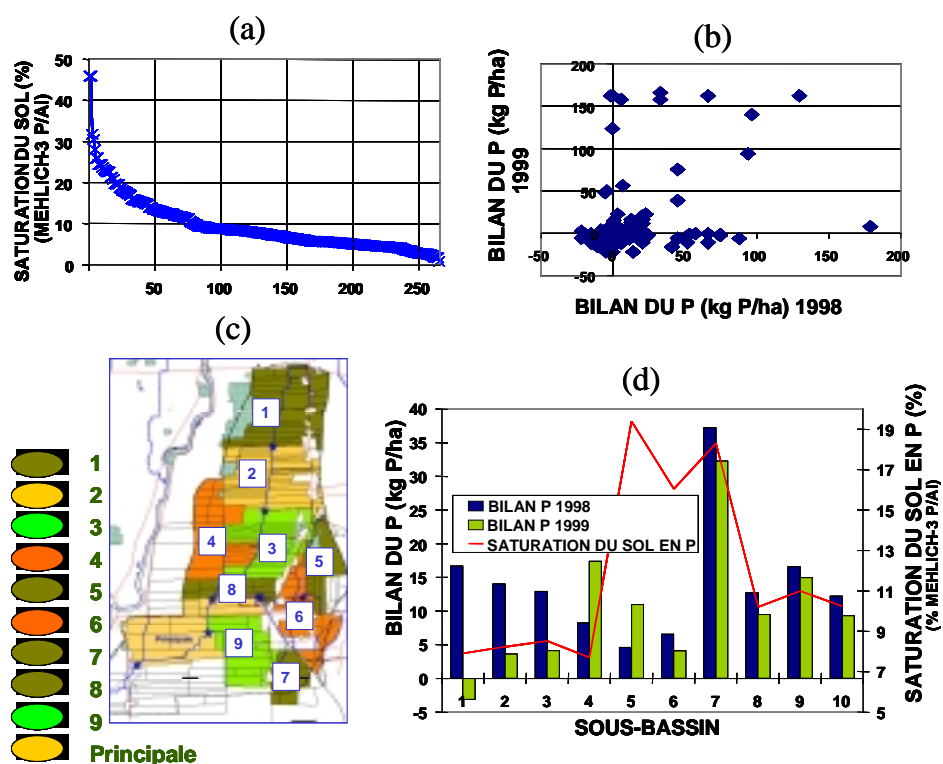
## **Des apports à la mode ?**

Si la saturation des sols en P traduit en bonne partie la mobilité du phosphore en surface de la parcelle, plusieurs études ont aussi démontré que le mode et la période des apports de P constituent des facteurs *Sources* déterminants à considérer dans le diagnostic agroenvironnemental. Un facteur particulièrement important est l'accroissement de la mobilité du P suivant l'application d'engrais de ferme, particulièrement dans le cas où celui-ci ne serait pas enfoui. La solubilité élevée du P contenu dans les fumiers, la faible densité des particules organiques et leur présence en surface de la fine couche de sol réactive au ruissellement, contribuent à l'accroissement des charges de P biodisponible. Quelques études québécoises ont mis en relief cette problématique très pertinente au climat et aux systèmes de production québécois. Gangbazo (1991) a mesuré sous des conditions de pluie simulée un accroissement de la charge d'orthophosphates dans le ruissellement proportionnel au taux d'épandage de lisier, alors que l'enfouissement annulait pratiquement la charge de P. En parcelles expérimentales à Lennoxville, l'incorporation de doses agronomiques de lisier de porc au printemps ou en post-levée n'a cependant pas contribué à des charges significativement plus élevées de N et P, dans les ruissellement comme dans les drains souterrains, qu'un traitement de fertilisation minérale. (Gangbazo *et al.* 1997). Grando (1996) a mesuré des charges élevées de phosphore, suite à l'épandage non enfoui de lisier en post-levée sur céréales dans une étude réalisée en parcelles sous des conditions de pluie simulée. En parcelles sous conditions



naturelles, Karemangingo *et al.* (1997) ont aussi documenté des réductions de l'exportation de P liées à l'incorporation des lisiers.

Figure 3 : Saturations des sols (a) et bilans d'apports en phosphore (b) à l'échelle de la parcelle, de même que leurs valeurs pondérées (d) à l'échelle des sous-bassins d'échantillonnage (c)



Un volet de l'étude du Ruisseau-aux-Castors, réalisé sur 36 parcelles expérimentales sous des conditions de pluie simulée, a permis de quantifier les effets d'une dose agronomique de lisier sur les risques d'exportation du P pour trois séries de sol typiques du bassin versant. L'apport de 60 kg P/ha de lisier de porc appliqué en surface du sol sur prairie, ou légèrement incorporé (< 5 cm) sur sol nu, a contribué à une augmentation de 89 % de la concentration en phosphore total du ruissellement. L'effet de l'application du lisier sur la concentration en P du ruissellement s'est cependant avéré moins déterminant que les propriétés inhérentes des sols à l'étude. En effet, c'est plutôt la richesse des sols qui a démontré le meilleur pouvoir explicatif des pertes de P et de sa biodisponibilité (Michaud et Laverdière, 2002). Ces observations illustrent la difficulté de différencier les effets de la richesse des sols et des modalités d'apports sur les risques d'exportation du phosphore. En conditions naturelles, l'effet de la richesse du sol héritée des antécédents en matière de fertilisation se confond avec l'effet des applications récentes

d'engrais de ferme. L'approche la plus réaliste à l'égard de la documentation de la composante *Sources* liée aux modalités d'apport des engrais de ferme est fort probablement la représentation par classes des différentes combinaisons de gestion, tel que préconisé par Lemunyon et Gilbert (1993) et Gburek *et al* (2000). En raison de la prédominance des événements de ruissellement à la fin de l'hiver et au début du printemps au Québec, l'épandage automnal non enfoui mérite une cote de pression agroenvironnementale particulièrement élevée.

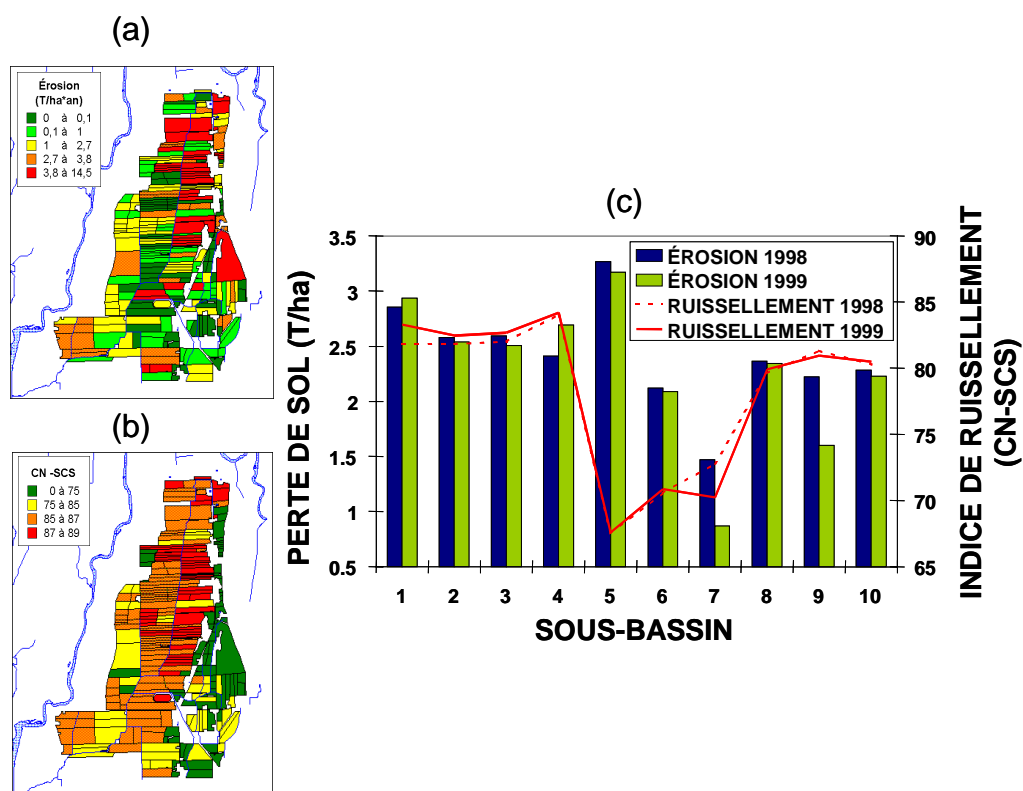
### **Les mouvements de phosphore : d'abord une histoire d'eau**

Retenons à priori que le transport du phosphore dans le bassin versant est sous contrôle hydrologique. La gestion des engrais de ferme et des engrais minéraux conditionne les quantités de P potentiellement mobilisables, mais c'est l'eau qui est la composante *active*, la source d'énergie du système de transfert du phosphore dans le bassin versant. Il est généralement admis que le ruissellement de surface contribue à la plus grande partie de l'exportation de P, alors que l'écoulement souterrain favorise l'immobilisation du P en permettant un plus grand temps de contact du P avec la matrice du sol. La **répartition surface/souterraine de l'écoulement** est donc le processus dynamique et variable dans le temps qui gouverne en grande partie l'exportation du P à l'échelle du bassin versant. L'importance du contrôle hydrologique sur les exportations de P a amené les équipes de recherche nord-américaines et européennes à considérer le concept de *superficies contributives variables au ruissellement* (variable-source area, VSA) dans l'explication du mouvement du P à l'échelle des bassins versants (Ward, 1984). Ce concept découle d'observations en bassins versants expérimentaux démontrant que la majeure partie du ruissellement est associée aux zones saturées de sol à proximité des fossés et de cours d'eau. Dans un bassin expérimental de 26 ha de la Baie de Chesapeake, Zollweg (1996) a estimé que les zones responsables de ruissellement de surface s'étendaient sur une largeur maximale de 30 m de part et d'autre des voies d'eau. S'appuyant sur ce concept, Zollweg *et al.* (1996) ont démontré que pratiquement tout le ruissellement de surface provenait d'environ 15 % de la superficie totale du bassin. Dans le cadre d'une étude en bassin versant dans la même région, Gburek *et al.* (2000) ont estimé que le ruissellement et l'exportation de P provenaient tout au plus d'une zone de 60 m de part et d'autre du cours d'eau.

La perte de sol (USLE) et l'indice de ruissellement (CN) sont les indicateurs les plus utilisés pour qualifier les facteurs *Transport* à l'échelle de la parcelle. Leur estimation fait appel à une base similaire de données pertinentes aux systèmes de cultures et aux propriétés physiques des sols. Cependant, leurs modes de calcul mettent en relief des processus distincts. L'équation USLE produit des estimations de pertes brutes de sol qui ne tiennent pas compte des processus de déposition à l'intérieur même du champ. Les estimations de l'USLE sont largement influencées par l'inclinaison et la longueur des pentes et attribuent un poids important aux textures franches de sol, à dominance limoneuse et de sable très fin. L'indice de ruissellement (CN) estime quant à lui la proportion relative des précipitations qui sera exportée en surface du sol. La réponse hydrologique d'une parcelle en culture est particulièrement sensible au groupe hydrologique attribué au sol, principalement sur la base de sa capacité d'infiltration et de sa perméabilité.

Dans l'étude du bassin versant de la Rivière-aux-Brochets, tout comme dans l'étude du bassin expérimental du Ruisseau-aux-Castors, il est fort pertinent de noter que les estimations théoriques de pertes de sols selon l'USLE et d'indices CN de ruissellement n'apparaissent pas corrélés. Dans le cas du bassin de la Rivière-aux-Brochets, le gradient spatial dans l'utilisation du sol explique en partie les estimations contrastantes des indices d'érosion et de ruissellement. Dans le bassin du Ruisseau-aux-Castors, les rotations de culture sont relativement homogènes dans le territoire à l'étude. La relative opposition des indices de vulnérabilité au ruissellement et à l'érosion traduit plutôt les particularités biophysiques contrastantes du bassin. Le bas de versant du bassin du Ruisseau-aux-Castors, longeant la branche principale du ruisseau, comprend en effet des sols plus lourds, au sous-sol moins perméable, mais au relief relativement plat. Cette position dans le relief et les propriétés du sol conditionne une activité hydrologique plus importante que pour les sols situés en haut de versant du bassin. Ces derniers présentent en effet des textures plus légères et un sous-sol plus perméable. Bien qu'ils démontrent, sur une base théorique, une vulnérabilité plus élevée aux pertes de sol en raison de leur relief ondulé, les coefficients CN y sont nettement moins élevés (Figure 4).

Figure 4 : Estimations de perte de sol selon l'équation universelle de pertes de sols (a) et indices CN de ruissellement (b) à l'échelle de le parcelle, de même que leurs valeurs pondérées à l'échelle des sous-bassins d'échantillonnage (c)



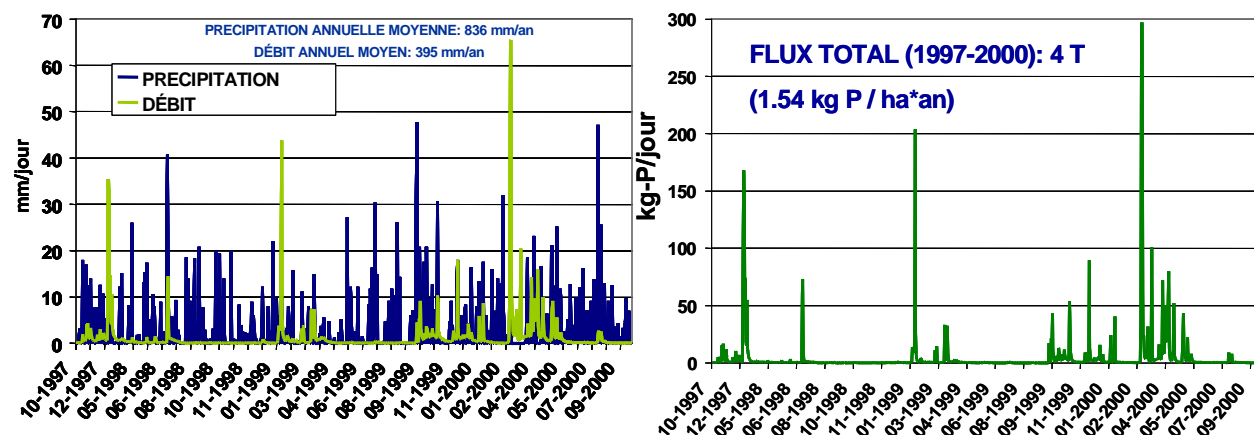
A l'échelle du bassin de la Rivière-aux-Brochets (630 km<sup>2</sup>) comme à celle du Ruisseau-aux-Castors (11 km<sup>2</sup>), l'indice de ruissellement (CN) a démontré un pouvoir explicatif significatif de la variabilité spatiale des exportations de P, ce qui n'est pas le cas des estimations de pertes de sols. Conceptuellement, ces observations témoignent du contrôle hydrologique des exportations de P et mettent en relief l'importance d'identifier les mécanismes prédisposant aux cheminements hydrologiques de surface. L'influence déterminante de l'état de saturation des sols au Québec sur la production de ruissellement, plutôt qu'en réponse à des précipitations intenses comme c'est plus fréquemment le cas chez nos voisins du Sud, expliquerait le meilleur pouvoir explicatif de l'indice de ruissellement.

### A l'eau, comment ça va ?

La superficie de bassin versant expérimental de Ruisseau-aux-Castors (11 km<sup>2</sup>) constitue une échelle de travail bien adaptée pour décrire l'influence des facteurs hydrologiques sur la

dynamique du phosphore. Le jaugeage hydrométrique et le suivi de la qualité de l'eau de la station principale, localisée à l'exutoire du bassin, a en effet mis en relief l'effet des fluctuations du régime hydrique sur l'intensité et les formes de P exporté. Considérant les trois années de suivi, les exportations annuelles moyennes en P réactif soluble, en P biodisponible et en P total ont été estimées respectivement à 0,57, 0,93 et 1,54 kg P/ha. À titre indicatif, les exportations de nitrates et de sédiments se chiffraient pour la même période à 23 kg/ha et à 0,82 t/ha. Pour les trois années à l'étude, le volume total d'eau jaugé à l'embouchure du bassin correspond à 1 186 mm de hauteur d'eau. La figure 5 illustre la distribution temporelle des précipitations et des débits journaliers mesurés pour la période 1997-2000, exprimée sur une base commune d'unités (mm/jour). La répartition très inégale dans le temps des volumes de ruissellement se traduit par une distribution épisodique des charges de sédiments et d'éléments nutritifs. Sur une base journalière, pour l'ensemble des trois années à l'étude, 75 % de l'exportation de P-total se concentre dans une période de 58 jours, correspondant à 6 % de la durée globale du jaugeage.

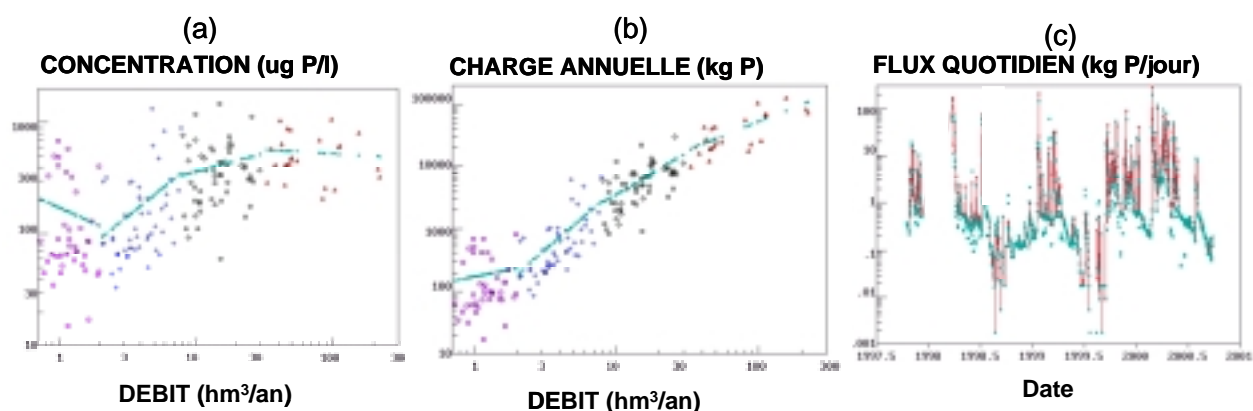
**Figure 5 : Distribution temporelle des précipitations et des débits journaliers (a) et charges de phosphore total (b) pour la période de jaugeage 1997-2000 au bassin versant du Ruisseau-aux-Castors**



La teneur en sédiments du Ruisseau-aux-Castors, comme en toutes les formes de P, apparaît fortement influencée par le débit du cours d'eau. La figure 6a illustre les relations entre la concentration et la charge en P total en fonction du débit du ruisseau, telles que modélisées sur la base de l'ensemble des échantillonnages ponctuels de la qualité de l'eau à la station principale avec le support du logiciel FLUX (Walker, 1998). La variabilité des concentrations et des formes de P observée dans le ruisseau reflète en grande partie l'activation de différents cheminements hydrologiques actifs dans le transport du P. Les mouvements épisodiques et

intenses de P se produisent lorsque la *connectivité hydrologique* s'établit entre les portions saturées du champ, les fossés, les berges et le cours d'eau. Au Québec, ces conditions se rencontrent assurément à la fin de l'hiver et au début du printemps, alors que la plus grande partie des exportations annuelles de P et de sédiments sont associées aux événements de ruissellement liés à la fonte des neiges et de précipitations sur sol gelé ou saturé. En période de culture (mai à septembre), c'est l'accumulation des précipitations qui contrôle le développement d'un état de saturation des sols et l'activation des processus d'exportation de P. Dans le bassin du Ruisseau-aux-Castors, par exemple, des précipitations entre 30 et 75 mm, cumulées sur une période de cinq jours, ont été requises pour induire une réponse au cours d'eau de l'ordre de 5 mm pendant la période de culture.

**Figure 6 :** Modélisation des charges de phosphore total à la station principale du Ruisseau-aux-Castors sur la base de la relation concentration - débit (a), de la relation charge - débit (b) résultant en estimations de flux quotidien (c)



**Tableau 3 :** Répartition des charges journalières de sédiments, de phosphore et de nitrates selon les strates de débits et les périodes de végétation (mai à septembre) et de recharge (octobre à avril) du Ruisseau-aux-Castors

STRATE <sup>(1)</sup> DE DÉBITS	PÉRIODE SAISONNIÈRE	DISTRIBUTION		PRÉCIPITATION		DÉBITS		MES		P-Total		P-Biod.		P réactif sol.		Nitrates	
		TEMPORELLE	(% annuel)	(mm)		Discharge		Charge ann.		Charge ann.		Charge ann.		Charge ann.		Charge ann.	
				(mm)	(%)	(mm)	(%)	(kg/ha)	(%)	(kg/ha)	(%)	(kg/ha)	(%)	(kg/ha)	(%)	(kg/ha)	(%)
DÉBIT DE CRUE	RECHARGE	2.9	55	7	153	39	411	50	0.80	52	0.41	44	0.28	49	5.7	25	
DÉBIT DE CRUE	VEGETATION	2.1	81	10	55	14	140	17	0.29	19	0.14	16	0.10	18	6.7	29	
DÉBIT ÉLEVE	RECHARGE	22.4	155	19	107	27	153	19	0.28	18	0.25	27	0.12	21	4.7	21	
DÉBIT ÉLEVE	VEGETATION	8.0	91	11	40	10	57	7	0.10	7	0.09	10	0.05	8	3.7	16	
ÉTIAGE	RECHARGE	24.7	143	17	18	5	28	3	0.03	2	0.02	2	0.01	2	0.7	3	
ÉTIAGE	VEGETATION	39.8	297	36	23	6	31	4	0.03	2	0.02	2	0.01	2	1.5	6	
<b>TOTAL</b>		<b>100</b>	<b>822</b>	<b>100</b>	<b>395</b>	<b>100</b>	<b>819</b>	<b>100</b>	<b>1.54</b>	<b>100</b>	<b>0.93</b>	<b>100</b>	<b>0.57</b>	<b>100</b>	<b>23.0</b>	<b>100</b>	

(1) La période du 13 décembre au 26 mars 1998 (verglas), correspondant à 276 mm de précipitations, est exclue du bilan des précipitations, débits et exportations.

S'inspirant du concept de typologie des crues développé par Dorioz *et al.* (1998), les séries chronologiques de charges de phosphore et de sédiments ont été découpées afin de mieux décrire l'influence des conditions hydrologiques sur l'exportation de P hors du bassin versant. L'examen de la relation entre la concentration en P du Ruisseau-aux-Castors et son débit, couplé aux observations sur le terrain relatives à l'activité du ruissellement de surface et des drains souterrains, suggère différents régimes d'exportation du P. La figure 7 présente ce modèle conceptuel des cheminements hydrologiques du P dans le bassin versant, pour des débits du ruisseau représentatifs d'un régime de base ( $< 0,06 \text{ m}^3/\text{s}$ ), élevé ( $0,06 - 0,44 \text{ m}^3/\text{s}$ ), puis à un régime de crue ( $> 0,45 \text{ m}^3/\text{s}$ ). La répartition des charges annuelles moyennes de P selon les strates et les périodes de débits pour l'ensemble de la période de suivi du Ruisseau-aux-Castors est décrite au tableau 3, de même qu'à la figure 8.

En conditions **d'écoulement de base**, le régime de transport du P est associé à des concentrations hautement solubles et biodisponibles, reflétant la dominance des contributions de sources ponctuelles. L'exportation de P durant ces conditions est généralement inférieure aux apports, conduisant à une accumulation relativement constante des apports ponctuels dans le réseau hydrographique. On observe ainsi une tendance des concentrations en P du Ruisseau-aux-Castors à diminuer avec la croissance du débit, témoignant d'un phénomène de dilution des contributions en P des sources ponctuelles en régime d'écoulement de base. Avec la hausse du débit, un équilibre est éventuellement atteint entre les apports ponctuels et l'exportation de P. Dorioz et Blanc (2001) évaluent les charges ponctuelles de P sur la base de ce flux limite de P. S'inspirant de cette approche, la charge ponctuelle de P dans le Ruisseau-aux-Castors se situe à environ  $200 \text{ kg P}/\text{an}$ , soit environ 5 % de la charge annuelle totale de P, ce qui s'avère cohérent avec les estimations produites par 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.

Figure 7 : Modèle conceptuel des cheminements hydrologiques du phosphore dans le bassin versant du Ruisseau-aux-Castors selon des régimes hydriques de crue, de débit élevé et d'étiage

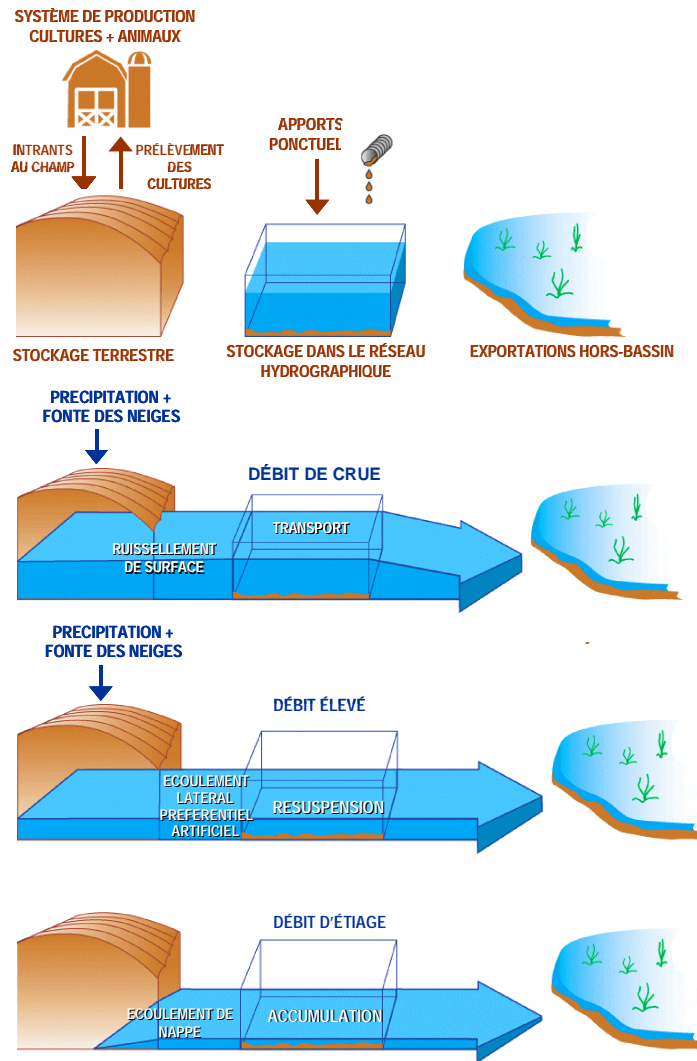
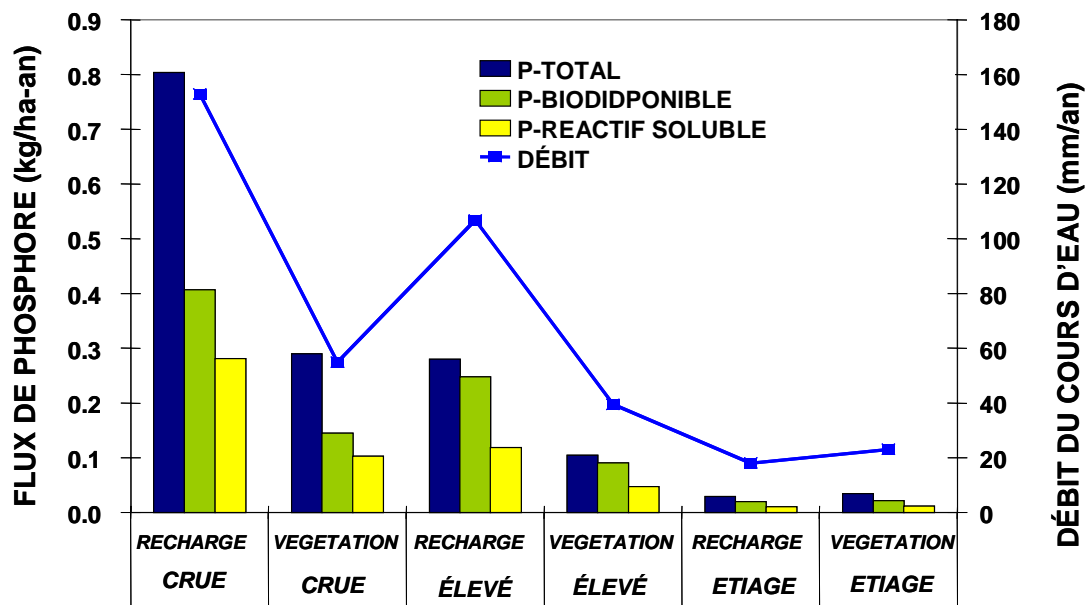




Figure 8 : Répartition des charges et des formes de phosphore selon les strates de débits et des périodes de végétation (mai à septembre) ou de recharge (octobre à avril) à l'exutoire du Ruisseau-aux-Castors (1997 - 2000)



La **strate de débits élevés** témoigne d'une activité hydrologique dominée par des transferts hypodermiques et souterrains. Les observations sur le terrain nous indiquent qu'à ce niveau, les processus d'érosion ou de ruissellement de surface ne sont plus, ou pas encore, manifestement actifs dans les champs du bassin versant. Environ 25 % des exportations annuelles de P et 37 % de la charge biodisponible sont associés à cette strate de débit du cours d'eau (Tableau 3). Notons par ailleurs la nature particulière de cette charge (57 %) et surtout sa biodisponibilité très élevée (88 %). Deux régimes d'exportation de P sont associés à cette strate de débit, soit en condition d'accroissement du débit ou lors de sa récession. Suivant les épisodes de crue du ruisseau, alors qu'on passe d'un cheminement en surface du ruissellement à une évacuation souterraine des eaux, on observe généralement un ralentissement marqué dans la récession du débit. Sur cette base de découpage hydrologique des hydrogrammes de ruissellement, Lapp *et al.* (1998) ont associé entre 9,5 et 21,3 % des charges annuelles en orthophosphates à un cheminement souterrain des exportations dans le bassin versant du ruisseau Saint-Esprit dans Lanaudière. Durant cette période, les drains souterrains et le ruissellement hypodermique contribuent vraisemblablement à une portion dominante des exportations. Les écoulements latéraux suivant les semelles de labour, favorisés par de longues pentes perpendiculaires au réseau hydrographique (Brunelle et Savoie, 2000), contribuent aussi

pour une portion significative des mouvements de phosphore. Par ailleurs, on ne peut exclure pendant cette période des contributions non érosives du ruissellement qui se manifestent en bordure immédiate des rives de cours d'eau, dans les sections les plus basses et saturées du bassin versant.

Suivant les périodes d'étiage, certaines précipitations provoquent des hausses de débit du ruisseau sans cependant activer les processus de ruissellement au champ. Des charges significatives de P, à dominance particulaire et d'une biodisponibilité très élevée, sont alors observées. Ces observations suggèrent l'action de mécanismes de stockage, de transformation et de resuspension du P dans le système de transfert du bassin. La morphologie du bassin versant favorise en effet une abondante sédimentation dans le tronçon principal du cours d'eau, où la colonne de sédiments atteint généralement une profondeur de 75 cm. La croissance abondante de macrophytes et de périphytons dans le ruisseau favorise également la rétention biotique du P et la sédimentation. Une caractérisation sommaire de la colonne de sédiments en trois strates a mis en relief des propriétés relativement stables en fonction de la profondeur. La nature colloïdale des sédiments (48 % argile, 50 % limon), une richesse modérée en P (38 - 71 ug/g Mehlich-3 P) reflétant les sols du bassin, et un taux relativement bas de pouvoir de fixation (350 - 500 ug/g Mehlich-3 Al) suggèrent une relative affinité des sédiments à participer dans la colonne d'eau aux processus de resuspension et d'adsorption de formes solubles de P.

L'importance de la fraction particulaire du P (57 %) exportée lors de conditions hydrologiques à forte composition hypodermique et souterraine est de nature à surprendre, mais reflète les observations rapportées par Jamieson *et al.* (2002) sur des champs présentant des conditions de sol et de culture typiques du bassin versant du Ruisseaux-aux-Castors. Des concentrations en P particulaire atteignant 80 % de la charge totale de P ont en effet été observées dans l'écoulement au drain d'un site argileux de bas de versant, contrastant avec la composition des écoulements du site sablonneux en position haute du relief. Les observations à l'échelle de la parcelle comme en ruisseau mettent ainsi en relief des processus relativement rapides de réorganisation des formes solubles au profit des formes particulières ou d'une mobilité importante des formes particulières de P. L'abondance et la nature colloïdale des sédiments présents dans le système de transport du phosphore du bassin suggère une influence de ces deux facteurs. Il est important de rappeler cependant que ce n'est pas tant la nature soluble ou particulaire de la charge qui compte dans l'évaluation de la problématique agroenvironnementale, mais plutôt le degré de biodisponibilité de la charge globale. En ce sens,

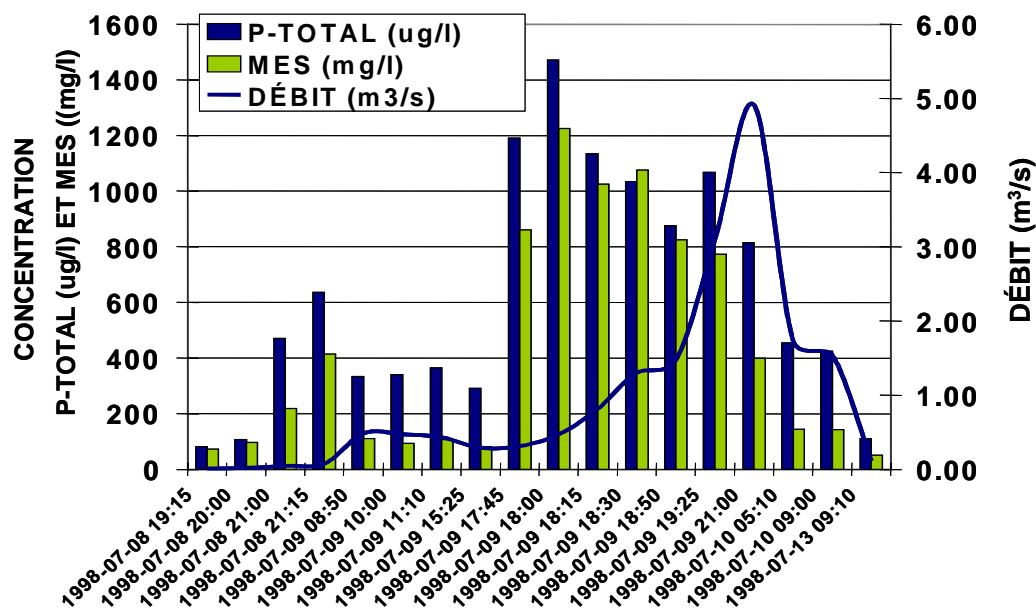
la très forte biodisponibilité (88 %) de la charge en régime de débit élevé du ruisseau est problématique en raison de son impact potentiel sur le milieu aquatique. Si les processus de rétention et de transformation influencent la nature particulaire des exportations dans le ruisseau, les études réalisées au simulateur de pluie dans les champs du bassin versant du Ruisseau-aux-Castors (Michaud et Laverdière, 2002) ont démontré qu'à la source, la biodisponibilité du P particulaire est largement dictée par la richesse des sols en P.

En période de crue du ruisseau, l'ensemble du bassin versant est considéré comme hydrologiquement actif, alors que les processus de ruissellement de surface sont à l'œuvre sur des portions significatives mais variables du bassin versant. Environ 71 % de la charge annuelle en P total est associée aux épisodes de crue qui découlent de conditions coïncidentes favorables, principalement à la fin de l'hiver et tôt au printemps. Pour la période d'étude, celles-ci incluent la fonte rapide d'un lourd couvert de neige en mars 1998, d'abondantes précipitations de pluie et de neige fondante sur sol gelé en janvier 1999 ainsi qu'une durée et qu'une quantité exceptionnelle de pluie sur sol saturé en avril 2000. Lors de ces conditions hydrologiques, le flux de P et de sédiments est maximal. La fraction particulaire du P est alors plus importante (65 %) et sa biodisponibilité significativement moins élevée (50 %) qu'en régime de débit élevé ou de base. Cette qualité des eaux de ruissellement reflète vraisemblablement l'érosion active et le transport de sédiments charriés depuis les microdépressions dans les champs, les fossés à écoulement intermittent, ou des zones d'érosion riveraine en bordure des branches et du tronçon principal du Ruisseau-aux-Castors. La pente relativement plate de la relation concentration/débit observée en régime de crue (Figure 6) suggère que la charge particulaire de P n'est alors pas contrôlée par la capacité de transport du ruissellement, mais plutôt par sa capacité de détachement des particules de sol. Une explication à ce phénomène, suggérée par Dorioz et Ferhi (1993) dans le cadre de l'étude du bassin versant du Mercube en Haute-Savoie, tiendrait au fait que le pouvoir érosif du ruissellement sur sol gelé serait tempéré par la consolidation des agrégats du sol.

Au cours de la saison de culture, les périodes de crue se sont concentrées à l'automne 1999 et en mai 2000, reflétant des accumulations importantes de précipitations. Un seul événement de crue a été observé pendant les trois périodes estivales à l'étude, alors que 90 mm de pluie s'est abattu sur le bassin entre les 7 et 11 juillet 1998. La figure 9 décrit l'évolution des concentrations en P total et des matières en suspension (MES), alors que le ruisseau entre dans une transition rapide du débit, d'un niveau de base à élevé, puis à un régime de crue.

L'évolution des concentrations en P total et des sédiments en fonction des débits du ruisseau révélés par les échantillonnages ponctuels de l'eau, confirme la typologie des régimes de transport du P décrite plus tôt. Les pointes de concentrations en P total et en sédiments, qui devancent les deux pointes de débits du cours d'eau, sont caractéristiques d'une crue à forte composante du ruissellement. La première pointe de concentration en P total et en matières en suspension (MES), alors que le débit du ruisseau atteint tout juste le seuil de crue, témoigne d'apports en provenance des stocks de sédiments et de phosphore accumulés dans le réseau hydrographique. La deuxième pointe dans les concentrations en TP et TSS, plus étendue dans le temps, résulte de l'arrivée massive du ruissellement de surface dans le cours d'eau. Des concentrations maximales en phosphore total (1 472 ug P/l) et matières en suspension (1 226 mg MES/l) sont alors atteintes. En récession du débit, les concentrations en TP et MES démontrent un net effet d'hystérèse, alors qu'elles demeurent sensiblement moins élevées qu'en montée de l'hydrogramme, pour des niveaux de débits similaires. Éventuellement, les concentrations rejoignent les niveaux caractéristiques du débit de base.

Figure 9 : Evolution temporelle du débit et des concentrations en phosphore total et en matières en suspension à la station principale du Ruisseau-aux-Castors entre le 7 et le 11 juillet 1998 en réponse à des précipitations totalisant 90 mm de pluie

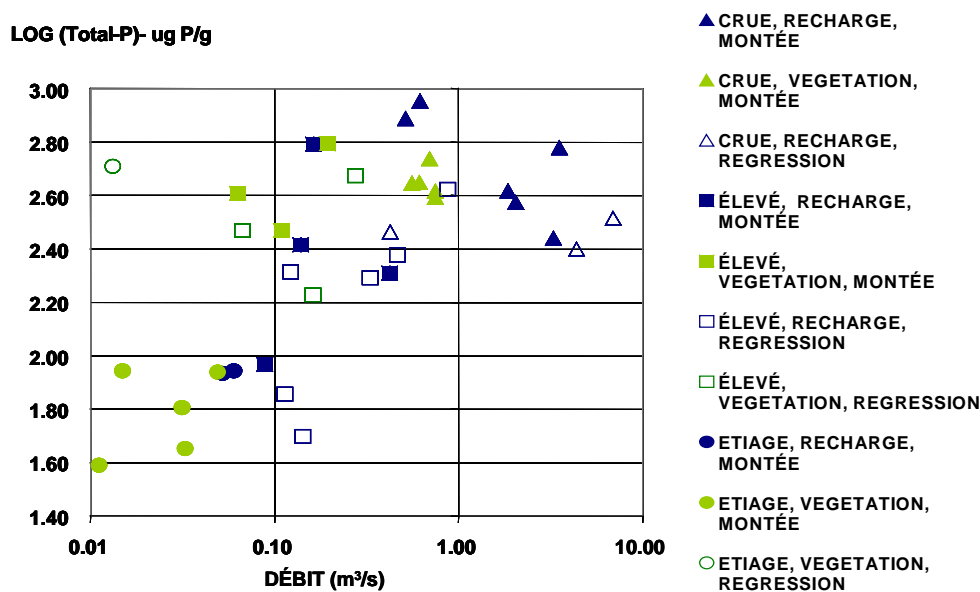


## **Variabilité spatiale des exportations de phosphore : eaux troubles**

---

En matière de diagnostic agroenvironnemental, l'étude de la variabilité temporelle des exportations de P à l'exutoire du bassin versant nous renseigne sur les mécanismes impliqués dans le transport du phosphore. Ce suivi de la qualité de l'eau ne nous informe pas cependant sur la variabilité spatiale des contributions en P du territoire en amont. Une difficulté majeure associée à l'étude de la variabilité spatiale de la qualité de l'eau de différents tributaires est d'isoler cette dernière de la forte variabilité temporelle liée aux fluctuations de débits. À une échelle d'étude aussi fine que le bassin du Ruisseau-aux-Castors, la variabilité temporelle de la concentration en P à l'intérieur d'un événement donné de ruissellement peut s'avérer supérieure à la variabilité spatiale entre les différentes stations d'échantillonnage. L'étude de la variabilité spatiale de la qualité de l'eau à l'intérieur du bassin versant du Ruisseau-aux-Castors a été supportée par 38 campagnes d'échantillonnage de 9 stations secondaires et de la station principale, principalement lors de longs événements printaniers et automnaux de précipitations. La figure 10 illustre la gamme des concentrations en P total et des débits de cours d'eau à la station principale observées au cours des campagnes du programme d'échantillonnage spatial. Globalement, la concentration en P total à la station principale reflète une dépendance marquée aux fluctuations de débit. Les campagnes réalisées en période d'accroissement du débit démontrent par ailleurs des concentrations en P total plus élevées qu'à des débits comparables en période de récession. Cet effet d'hystérèse est particulièrement encouragé par la nature particulière des exportations de P en régime de débit élevé et lors des crues. Cette tendance toutefois ne s'applique pas aux débits de base, alors que la seule campagne réalisée en régression du débit démontre une concentration très élevée en P total, reflétant vraisemblablement un effet d'accumulation des sources ponctuelles de P discuté précédemment. L'effet de saisonnalité sur les campagnes d'échantillonnage spatial (mai à septembre versus octobre à avril), tel qu'illustré en figure 9, ne semble pas affecter la relation concentration P total/débit, reflétant les observations colligées à la station principale pour l'ensemble de la période de suivi 1997-2000.

**Figure 10 : Concentrations en phosphore total et débit à la station principale à l'exutoire du Ruisseau-aux-Castors lors des 38 campagnes d'échantillonnage spatial du réseau de stations secondaires du bassin pour des conditions contrastantes de régimes hydriques du ruisseau (régimes de crue, débit élevé et étiage) de période hydrologique (période de recharge ou en période de végétation), et de progression du débit (montée ou régression)**



L'analyse de variance des observations des campagnes d'échantillonnage a révélé des patrons spatiaux significatifs ( $p < 0,0001$ ) dans les concentrations en phosphore soluble, biodisponible et totale, en régime hydrique de crue comme en régime de débit élevé (Michaud *et al.*, 2002). Tout comme la station principale, les concentrations en P aux stations secondaires se sont montrées fortement influencées par les fluctuations de débits. Globalement, 27 % de la variabilité dans les concentrations en P total des campagnes d'échantillonnage en période de crue est d'ordre spatial, c'est-à-dire expliquée par les différences entre les stations d'échantillonnage. L'effet de la période de l'échantillonnage lié aux conditions hydrologiques variables lors des campagnes d'échantillonnage, compte quant à lui pour 34 % de la variabilité observée dans les concentrations en P total.

Le dispositif d'échantillonnage spatial du bassin versant (Figure 11) permet de comparer l'évolution des concentrations en P de l'amont vers l'aval du tronçon principal, de même qu'entre les sous-bassins drainés par différentes branches du réseau hydrographique. L'évolution de la qualité de l'eau entre les stations 1, 2, 3, 8 et 10 témoigne ainsi de la dynamique des apports et du stockage de P et de sédiments dans le cours d'eau principal. Compte tenu du gradient longitudinal bien démarqué dans l'élévation, la roche-mère et la

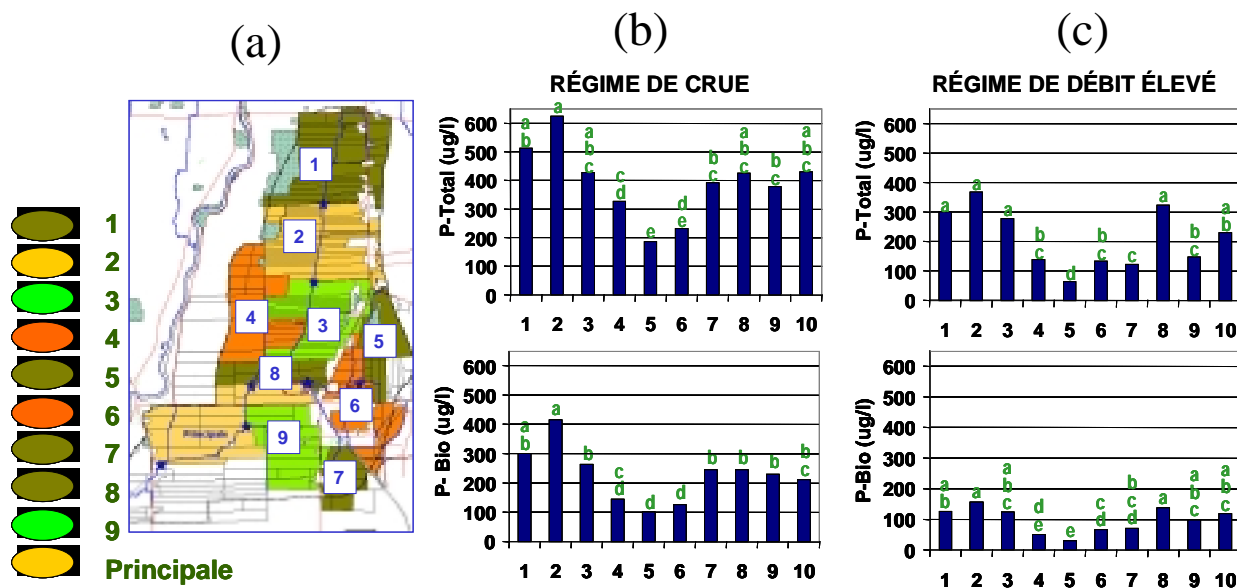
perméabilité des sols du territoire à l'étude, les sous-bassins en amont des stations 5, 6 et 7 témoignent de conditions biophysiques de haut de versant, alors que les stations 1, 4 et 9 sont associées aux propriétés physiques de bas de versant.

### **Le transport du phosphore : l'empreinte du paysage**

---

Conceptuellement, le programme spatial d'échantillonnage du bassin versant du Ruisseau-aux-Castors met en relief l'influence des facteurs *Sources* et *Transport* sur l'exportation du P. Le premier constat de l'étude est que la variabilité spatiale des exportations de P dans le bassin est d'abord contrôlée par des facteurs hydrologiques. En régime de crue comme en régime de débit élevé, les concentrations en P tendent en effet à être moins élevées dans les branches de haut de versant du réseau hydrographique, que dans la portion basse du bassin, et ce, malgré un gradient spatial bien démarqué dans la richesse des sols en P favorisant les parcelles en haute position dans le relief. De tous les indicateurs *Sources* et *Transport* pondérés à l'échelle des sous-bassins d'échantillonnage, l'indice de ruissellement (CN) témoigne ainsi du meilleur pouvoir explicatif de la variabilité des exportations en P. Pour les 20 combinaisons d'années de culture et de sous-bassins, l'indice CN de ruissellement (Monfet, 1979) est corrélé aux concentrations en P total en régime de crue ( $r = 0,66$ ,  $p < 0,05$ ) comme en régime de débit élevé ( $r = 0,67$ ,  $p < 0,05$ ).

Figure 11 : Sous-bassins d'échantillonnage (a) et moyennes ajustées au modèle d'analyse de variance des concentrations en phosphore total (b) et phosphore biodisponible (c) observées aux stations secondaires en régime hydrique de crue et de débit élevé du Ruisseau-aux-Castors

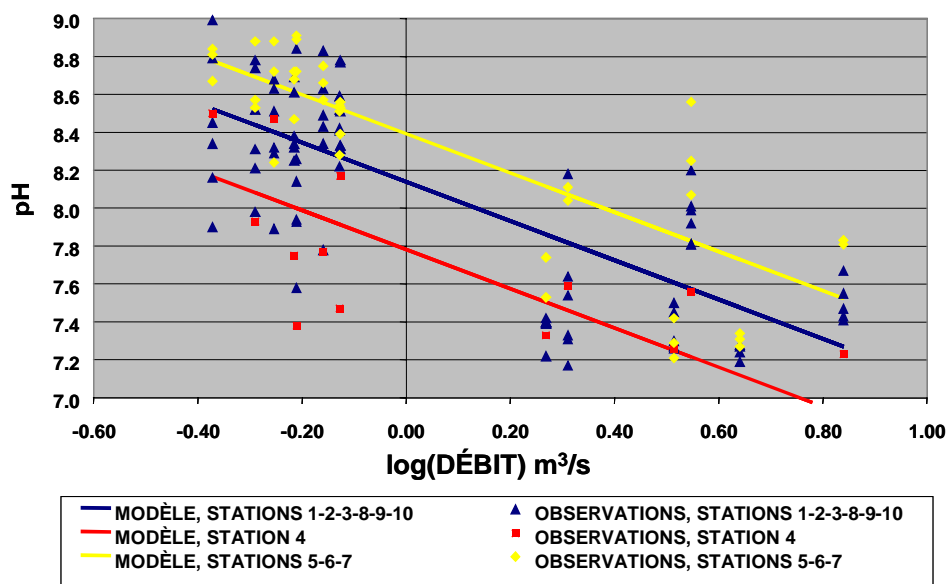


L'analyse en covariance des données de qualité de l'eau (Michaud *et al.*, 2002), utilisant le débit du ruisseau à la station principale comme covariable, a confirmé le contrôle hydrologique des exportations de P. La variabilité observée dans la qualité de l'eau, notamment le pH, indique en effet que des cheminements hydrologiques contrastants étaient à l'œuvre dans les différents sous-bassins lors des échantillonnages en période de crue. Retenons que l'eau qui rejoint le cours d'eau par le biais du ruissellement de surface constitue, pour une large part, de la pluie ou de l'eau de fonte. Lorsque l'eau chemine sous la surface du sol pour atteindre le ruisseau, elle ne présente plus les mêmes propriétés physiques et chimiques (Heathwaite, 2000). À l'exutoire du Ruisseau-aux-Castors, les importantes fluctuations du pH de l'eau témoignent de telles transitions, relativement rapides, du cheminement hydrologique dominant des eaux (Figure 12). Des observations similaires se dégagent du suivi de la qualité de l'eau du bassin Saint-Esprit (Papineau et Enright, 1997), un bassin versant expérimental de Lanaudière suivi par l'équipe de l'Université McGill. Pour le Ruisseau-aux-Castors, les différences significatives de pH de l'eau entre les sous-bassins d'échantillonnage lors des débits de crue du ruisseau sont attribuées à des cheminements hydrologiques contrastants. Les pH significativement plus élevés des sous-bassins 5, 6 et 7 de même que le pH significativement plus bas du sous-bassin 4 reflètent les indicateurs terrestres de répartition surface/souterraine des écoulements,



notamment l'indice CN de ruissellement, la position dans le relief et l'importance des superficies drainées souterrainement.

**Figure 12 :** Observations et modélisation du pH en fonction du débit aux stations secondaires d'échantillonnage en régime de crue du Ruisseau-aux-Castors. L'analyse en covariance attribue des pH significativement plus élevés aux stations 5, 6 et 7, et significativement plus bas à la station 4 ( $p < 0,05$ )



En ce qui a trait à la dynamique du phosphore dans le cours d'eau principal, la variabilité observée dans les concentrations indique une réduction significative ( $P < 0,05$ ) dans les concentrations totales et solubles de P de l'amont (station 2) vers l'aval (station principale). Cette réduction dans les concentrations de P, au fil du tronçon principal, peut résulter des processus de stockage et de transformation du P, tels que suggérés par la variabilité temporelle des exportations de P à la station principale et discutée plus tôt. Les concentrations en P dans le tronçon principal sont aussi vraisemblablement affectées par la dilution des contributions des sous-bassins 4, 5 et 6. McDowell attribue aux processus de sédimentation, de résorption et de dilution du P, une évolution similaire des concentrations en P lors des crues d'un ruisseau en bassin versant agricole. Dans le cas du Ruisseau-aux-Castors, la nature contrastante des paramètres de qualité de l'eau des sous-bassins en haute et basse position de relief, de même que l'important stock de sédiments dans le tronçon principal du ruisseau suggèrent que les processus de dilution, comme de rétention, contribuent tous deux à la tendance amont/aval dans la réduction des concentrations en P.

## **Retour aux Sources...**

---

L'échantillonnage systématique des parcelles du bassin versant du Ruisseau-aux-Castors a révélé un gradient spatial marqué dans l'enrichissement des sols lié à des contraintes historiques d'épandage d'engrais de ferme. Le programme d'échantillonnage spatial a démontré que ce gradient n'expliquait pas la variabilité spatiale observée dans la concentration en P de l'eau de surface, en raison de l'influence déterminante des facteurs hydrologiques. Cependant, les différences significatives observées dans les concentrations en P entre sous-bassins démontrant des niveaux similaires d'activité hydrologique sont attribuées aux facteurs *Sources*, en position haute comme en position basse dans le relief du bassin versant du Ruisseau-aux-Castors.

En position élevée dans le relief, le sous-bassin 7 présente en régime de crue des concentrations significativement plus élevées que les sous-bassins 5 et 6, pour toutes les formes de P. Les trois sous-bassins présentent cependant des caractéristiques similaires au plan des pratiques culturales, du taux de saturation du sol en P, de l'indice de ruissellement et de la position et de l'élévation dans le relief. Le sous-bassin 7 se démarque toutefois de tous les sous-bassins à l'étude par le taux le plus élevé des apports en P. Le bilan d'apports pondéré pour la superficie en culture de sous-bassin se situe en effet à 37 et 32 kg P/ha respectivement pour les années de production 1998 et 1999 (Figure 33). L'enrichissement récent des parcelles par l'apport d'engrais contribue essentiellement au bilan élevé du sous-bassin pour les deux saisons de production. Des concentrations en P significativement plus élevées dans ce sous-bassin, en période d'intense activité hydrologique, reflètent le constat généralement exprimé que l'application d'engrais de ferme a plus d'influence sur la mobilité du P que l'application d'engrais minéraux (Haygarth et Jarvis, 1999). Une concentration plus élevée du ruissellement en provenance du sous-bassin 7, en lien avec des apports importants d'engrais de ferme, reflète par ailleurs les observations relevées lors de l'étude en conditions de pluie simulée sur des sols typiques du bassin versant du Ruisseau-aux-Castors (Michaud et Laverdière, 2002).

L'examen des données des campagnes d'échantillonnage des stations 5, 6 et 7 suggère cependant que les différences dans les concentrations en P ne sont pas indépendantes des conditions hydrologiques. Les concentrations en P total du ruissellement provenant du

sous-bassin 7 apparaissent particulièrement élevées lors des crues les plus intenses. La perte de la connectivité hydrologique entre les champs et le réseau de fossés, de même que la transition à des cheminements hypodermiques et souterrains, expliqueraient une démarcation moins prononcée des concentrations en P avec la diminution de l'activité hydrologique dans le bassin. Une implication pratique de ces observations dans un contexte d'intervention agroenvironnementale traduit toute l'importance d'investir dans des modalités d'épandage qui soustraient les engrais de ferme à l'action du ruissellement de surface et des mouvements rapides de l'eau, latéraux ou préférentiels, dans la couche arable du sol.

Dans les sous-bassins localisés en position basse du relief du bassin, la variabilité dans les concentrations en P est aussi attribuée en partie aux facteurs *Sources* de transfert du phosphore. Les concentrations des formes solubles et biodisponibles de P apparaissent en effet significativement moins élevées à l'exutoire du sous-bassin 4, en régime de crue comme en régime de débit élevé. Les données de qualité d'eau y témoignent pourtant d'une importante activité hydrologique de surface, alors qu'on y observe des niveaux significativement plus élevés en MES, des pH plus bas, la plus haute fraction du P sous forme particulaire et la plus faible biodisponibilité du P de tous les sous-bassins à l'étude. Ce profil de qualité de l'eau du sous-bassin, en situation d'intense activité hydrologique, est cohérent avec les indicateurs terrestres de l'activité hydrologique, soit la position la plus basse dans le paysage du bassin, une faible superficie drainée souterrainement (37 %), qui se traduit par des indices de ruissellement (CN) particulièrement élevés (Figure 4). À défaut de trouver une explication auprès des facteurs hydrologiques, les concentrations relativement faibles de P soluble et biodisponible dans le ruissellement de ce sous-bassin sont vraisemblablement tributaires de la faible richesse du parcellaire en P. En fait, le sous-bassin 4 présente la plus faible saturation en phosphore de tous les sous-bassins à l'étude (Figure 3), avec une valeur pondérée pour la superficie des parcelles de l'ordre de 7,7 % (P/AI Mehlich-3). La relativement faible disponibilité à l'exportation du pool de P de ce sous-bassin expliquerait ainsi une concentration relativement faible de P soluble et biodisponible dans le ruissellement, malgré une forte activité de ce dernier. Cette observation est de nature à confirmer la pertinence de l'indice de saturation du sol en P dans le diagnostic agroenvironnemental à l'échelle du bassin versant et met en relief l'importance de considérer la biodisponibilité du P exporté dans le milieu aquatique. Les sous-bassins 4 et 9, par exemple, présentent des caractéristiques similaires à l'égard des facteurs *Transport*, mais contrastantes au plan de l'enrichissement des sols en P (Figure 3). Les différences dans leurs concentrations respectives du ruissellement en P total n'apparaissent

pas significatives ( $p < 0,05$ ), alors que les sous-bassins affichent des différences significatives dans les concentrations en P soluble et biodisponible (Figure 11). Les observations sous des conditions de pluie simulée dans le bassin versant ont aussi mis en relief une influence déterminante de la richesse des sols sur la biodisponibilité du P dans le ruissellement de surface (Michaud et Laverdière, 2002). Ces observations en bassin versant et en parcelles expérimentales militent pour retenir la charge biodisponible de phosphore, plutôt que la charge en phosphore total, comme critère agroenvironnemental dans la formulation d'objectifs, comme dans l'évaluation environnementale d'interventions ciblées sur la prévention de l'eutrophisation.

### **Diagnostic intraparcellaire: intervenir sur mesure**

---

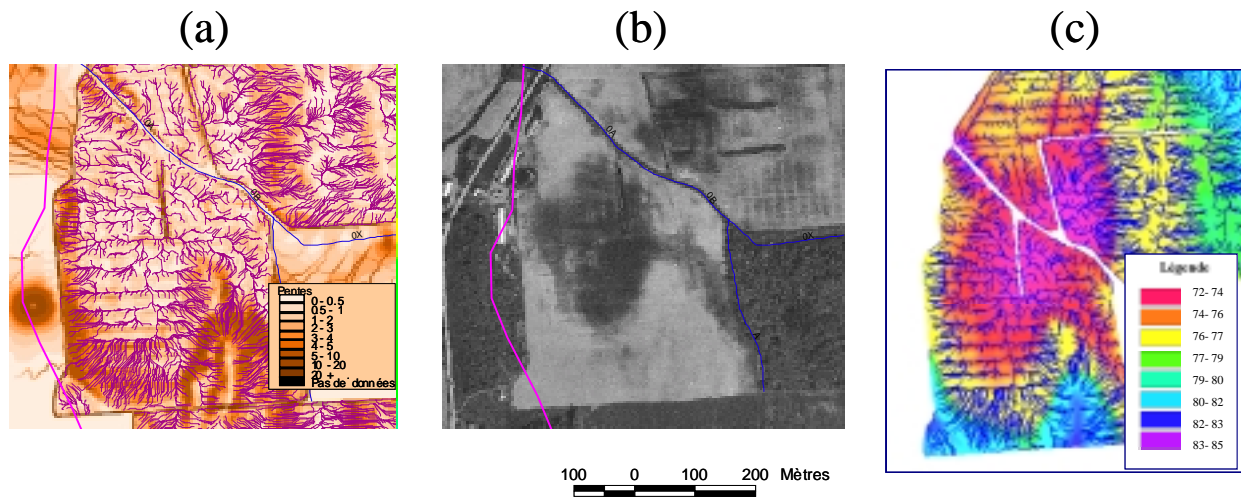
Compte tenu du contrôle hydrologique sur les exportations diffuses de phosphore, l'atteinte de résultats tangibles sur la qualité des eaux de ruissellement est tributaire de pratiques et d'aménagements hydroagricoles. Une stratégie raisonnée de gestion du ruissellement de surface à l'échelle de la parcelle peut s'appuyer sur plusieurs lignes de défense :

- à commencer par une pratique culturale qui favorise la rugosité de surface et l'infiltration de l'eau ;
- un rabattement rapide de la nappe phréatique par le drainage souterrain;
- un drainage de surface qui favorise le morcellement de la lame de ruissellement;
- une évacuation en douceur des pointes de crue printanière par des structures de captage aménagées aux endroits stratégiques;
- et enfin l'aménagement de zones tampon riveraines, qui jouent un rôle de trappe à sédiments et interceptent les sources solubles de contamination.

L'investissement dans l'aménagement hydroagricole d'une parcelle requiert un diagnostic précis des zones hydrologiquement plus actives du champ et du patron de circulation des eaux de ruissellement. Les outils et systèmes d'information utilisés à l'échelle du territoire n'ont généralement pas une résolution spatiale adaptée au travail à l'échelle intraparcellaire. Les développements récents en matière d'acquisition et de traitement de données géoréférencées (Figures 13 et 14) offrent cependant de nouveaux outils forts pertinents au diagnostic et à l'intervention sur la gestion de l'eau, notamment :

- la photo aérienne ou l'imagerie numérique basse altitude saisie au printemps, durant la période de ressuyage ;
- le relevé géoréférencé, à pied d'œuvre aux abords du champ, pour répertorier le parcours du ruissellement et les problèmes d'érosion ;
- et le relief de précision du champ.

**Figure 13 : Le parcours modélisé des eaux de ruissellement (a) extrait du modèle numérique de terrain (c) traduit les zones hydrologiquement actives du parcellaire révélées par les images aériennes (b) (Duguet, 2002)**



Les photographies ou images numériques aériennes captées à des moments stratégiques, lors du ressuyage au printemps, permettent de visualiser la variabilité de l'humidité du parcellaire. Les zones de champ mal égouttées et les zones sèches y apparaissent fortement contrastées. Les champs drainés souterrainement présentent typiquement des images striées, par l'alternance des zones sèches au-dessus des drains et des zones intercalaires plus humides. L'interprétation des images permet de localiser les zones du champ où s'accumulent les eaux de surface ou présentent des déficiences au plan de leur capacité d'infiltration et de la perméabilité du sous-sol.

Les relevés sur le terrain constituent une démarche essentielle du diagnostic de gestion de l'eau à l'échelle de la parcelle. L'utilisation de la technologie GPS permet de localiser précisément les talus de fossés et de cours d'eau érodés, les symptômes de dégradation physique du sol ou encore les mouvements des eaux de ruissellement. La géoréférence des informations et leur représentation dans un système d'information facilitent l'interprétation des

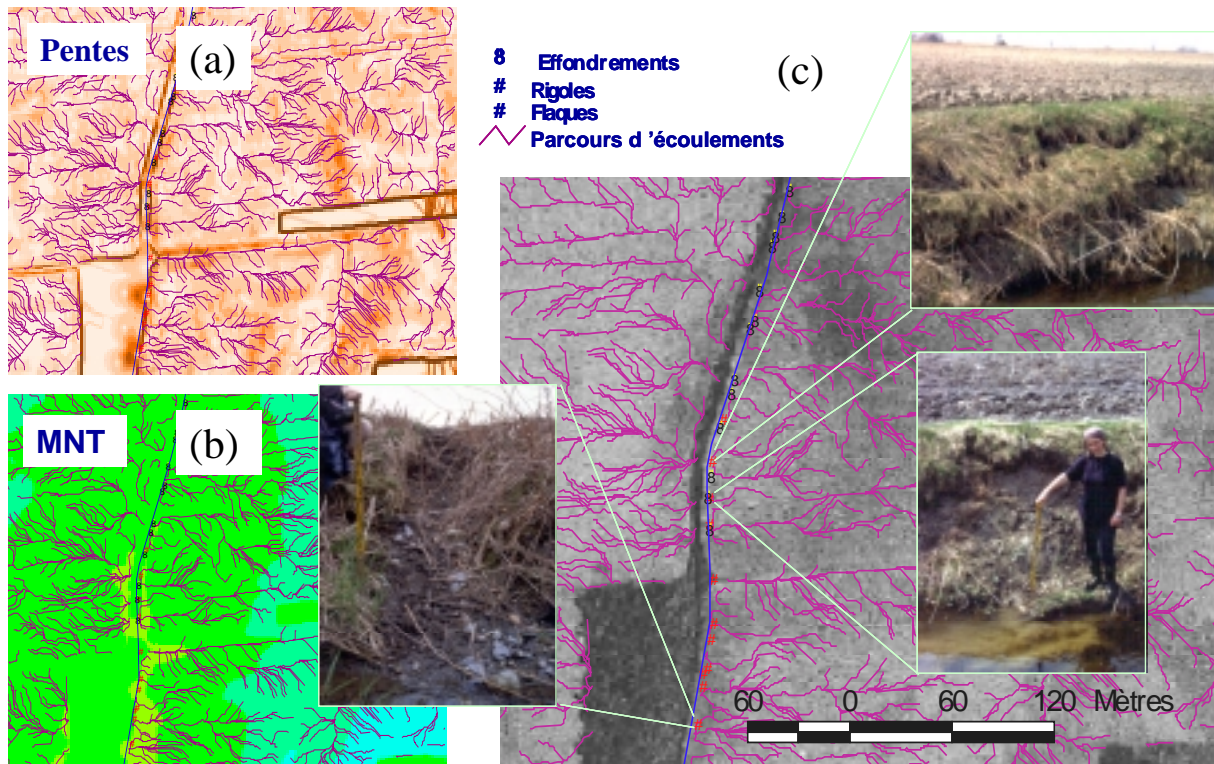
données et la planification ultérieure des interventions. Couplées avec les photos ou images aériennes, les données du diagnostic *terrain* constituent un excellent support pour sensibiliser les propriétaires à la nécessité de procéder à certains aménagements. Cette caractérisation doit être faite tôt au printemps avant les travaux aratoires. L'absence de végétation permet alors d'identifier les zones actives de ruissellement et d'érosion. En précédant les travaux du sol, les observations permettent de remonter le trajet de l'eau dans le champ et de mieux envisager les solutions. La tournée d'observations permet aussi de recueillir des informations à l'égard de la largeur de la bande riveraine, de l'état des talus de cours d'eau, de la nature de la végétation riveraine, de l'ensablement ou de la profondeur des fossés ou de la couverture de résidus de culture au champ. En caractérisant ainsi les tours de champs, les secteurs érodés, tout comme les zones stables, sont une précieuse source d'enseignement. Les relevés réalisés à ce jour en Montérégie démontrent notamment que la profondeur du fossé est un facteur déterminant dans le déclenchement des processus d'érosion.

La caractérisation du relief du champ supportée par la technologie GPS permet, quant à elle, de réaliser des relevés en continu, d'une précision de l'ordre du centimètre. Une méthode d'acquisition en véhicule tout-terrain et de post-traitement des données, développée par la compagnie VIASAT Géo-Technologie de Montréal (Rivest et Gosselin, 2002), est utilisée avec succès en Montérégie-Est depuis trois ans. Environ 120 relevés ont été produits à ce jour sur superficie de plus de 3 000 hectares. Les données du relevé sont importées dans un système d'intégration géographique (SIG) pour produire des modèles numériques de terrain d'une grande fiabilité. Ceux-ci permettent par la suite d'analyser l'érosivité des pentes du terrain et de modéliser les trajets du ruissellement à l'intérieur de la parcelle. Le champ se présente alors comme un ensemble de petits bassins hydrographiques, ce qui facilite l'interprétation des problèmes de concentration du ruissellement et d'érosion. Le recours au relief de précision dans le diagnostic de la gestion de l'eau en Montérégie a permis de tirer certaines conclusions à l'égard des problèmes de gestion de l'eau :

- Dans les sols à faibles pentes, les processus d'érosion résultent fréquemment de l'accumulation du ruissellement de surface au centre de la parcelle, en raison des bords de champs surélevés.
- Malgré des investissements dans le nivellement, les vestiges des fossés demeurent des voies préférentielles pour l'eau dans beaucoup de champs et sont la source des principaux problèmes d'érosion .

- Le regroupement de plusieurs lots et la disparition des fossés produisent des volumes de ruissellement considérables qui nécessitent des structures de plus en plus complexes pour contrer les processus d'érosion.

Figure 14 : Le modèle numérique de terrain, les pentes du relief et le parcours du ruissellement (a et b) indiquent les zones de concentration de ruissellement et où les berges sont vulnérables aux processus d'érosion (Duguet, 2002)



Les observations en bassins versants agricoles québécois témoignent que la majeure partie des exportations diffuses de phosphore, à l'instar des autres sources diffuses de contamination, se produisent lors du *grand coup d'eau* printanier. Celui-ci se concentre généralement dans une période qui précède de quelques semaines l'entrée au champ de la machinerie aratoire. Il y a donc lieu de tirer profit de cette marge de manœuvre pour minimiser l'action de ce *flush* printanier, par des pratiques culturales et des aménagements hydroagricoles qui laminent la pointe de crue, favorisent l'infiltration dans le sol, provoquent la sédimentation dans les zones de concentration du ruissellement ou interceptent les charges hypodermiques et de surface dans des lisières riveraines. Le recours aux technologies géomatiques supporte la localisation et l'interprétation des zones de champ problématiques à l'égard de la concentration du

ruissellement et des processus d'érosion. Celles-ci permettent aux conseillers agricoles et aux producteurs d'avoir une vision claire du problème et de planifier, sur mesure, des aménagements hydroagricoles qui concilient égouttement des sols et préservation de la qualité de l'eau.

## Conclusion

---

L'intervention agroenvironnementale ciblée sur le phosphore requiert des indicateurs de gestion quantitatifs, pertinents et accessibles, qui permettent de décrire et d'établir des relations entre l'état de l'environnement aquatique, la pression exercée par les systèmes de production et la vulnérabilité du parcellaire en culture. Les initiatives concertées de recherche dans le bassin versant de la Rivière-aux-Brochets démontrent la pertinence et la faisabilité d'appuyer la description de ces composantes du système de transfert du phosphore à différentes échelles d'étude, du territoire à l'intraparcellaire. Des campagnes d'échantillonnage ponctuelles, en période de forte activité hydrologique, permettent de représenter la variabilité spatiale des exportations de P. La télédétection et l'intégration spatiale de données pertinentes aux propriétés du paysage et des systèmes de production agricole permettent de représenter les pressions agroenvironnementales à diverses échelles d'unités hydrographiques. A l'échelle de la parcelle, la télédétection aéroportée, le relief de précision ou le diagnostic terrain permettent d'intervenir sur mesure à l'égard de la gestion de l'eau.

Conceptuellement, la compréhension du système de transfert du phosphore requiert la description et la mise en relation de deux ensembles d'information. D'abord, la représentation spatiale du **bilan de masse du P** traduit l'importance passée, actuelle et à venir des stocks de phosphore potentiellement disponibles à l'exportation. À cette *comptabilité* des stocks de P, doit s'adjoindre une composante *qualitative* à l'égard des modes de gestion des engrais de ferme, compte tenu de leur influence déterminante sur la mobilité du phosphore. En second lieu, la caractérisation de l'**hydroactivité du territoire** ciblée permet de décrire les zones sensibles en matière de transfert du phosphore. Ce diagnostic requiert une prise en compte de l'influence du paysage sur la répartition surface/souterraine du ruissellement. C'est l'interprétation intégrée, au plan spatial, du bilan de masse et du bilan hydrique qui permet de dégager un diagnostic d'ensemble du devenir du phosphore dans le bassin versant.



En matière d'intervention agroenvironnementale, la dynamique du phosphore met en relief la nécessaire **complémentarité d'interventions** à l'égard des facteurs *Sources* et *Transport* pour prévenir l'exportation diffuse du P hors des champs. L'application des principes de fertilisation intégrée permet de limiter l'accumulation de P potentiellement mobile en surface de la couche arable, par un contrôle de la richesse du sol en P et une régulation des sols qui soustraient les engrais de ferme et minéraux à l'action du ruissellement. Le contrôle des exportations passe aussi par une atténuation des volumes et de l'intensité du ruissellement qui se concentrent dans les zones hydrologiquement sensibles du parcellaire en culture. Les investissements privés et publics consentis dans le passé dans le drainage des champs et dans l'aménagement du réseau de cours d'eau municipaux ont permis l'évacuation précoce des eaux. L'allongement de la saison de végétation par l'abaissement des nappes, le réchauffement du sol et une circulation hâtive de la machinerie ont conduit à des gains considérables de productivité des cultures. Ces modifications du régime hydrique des bassins versants agricoles posent aujourd'hui un nouveau défi à l'égard de la gestion de l'eau, soit celui de concilier le ressuyage efficace des terres avec l'évacuation *en douceur* des eaux de ruissellement lors des courts, mais intenses épisodes de ruissellement à la fin de l'hiver et du début du printemps.

Les investissements publics et privés en matière agroenvironnementale au Québec, de même que le cadre réglementaire, ont particulièrement ciblé à ce jour des interventions à l'égard de la gestion des sources de phosphore telles que l'équilibre des bilans d'apport ou les structures d'entreposage. Dans les bassins versants agricoles où la récupération d'usage de l'eau commande la réduction des charges agricoles diffuses de phosphore, l'amélioration tangible de la qualité de l'eau ne s'obtiendra qu'au prix d'investissements complémentaires dans l'aménagement hydroagricole. Les zones tampon de végétation pérenne, en rive de cours d'eau, en plaines inondables ou, de façon générale, sur les parcours où se concentre le ruissellement de surface, constituent des infrastructures agroenvironnementales dont l'efficacité a largement été démontrée. Meals (2000) a documenté une amélioration tangible de la qualité de l'eau, notamment à l'égard des exportations diffuses de P, dans des ruisseaux drainant des 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. À l'échelle nationale, c'est près de 4,5 millions d'acres de terre en culture qui ont été convertis aux États-Unis en bandes de protection riveraine, en marais filtrant ou en voies d'eau depuis 1997 (Lowrance *et al.*, 2002). Au Québec, la tendance actuelle s'inscrit plutôt dans la mise en culture de nouvelles terres, en réponse au besoin d'équilibrer les bilans d'apport en P des engrais de ferme. Cette dynamique est

inquiétante au plan environnemental, particulièrement si elle amène en culture des terres marginales à forte activité hydrologique, soit en raison de l'érosivité de leur relief ou d'une position dans le paysage agricole qui favorise l'inondation ou limite le ressuyage.

Le contrôle des sources agricoles diffuses de contamination est une entreprise complexe, qui requiert un solide engagement communautaire et d'importantes ressources-conseils et financières. L'envergure des moyens à mettre en oeuvre pour renverser la tendance dans les exportations diffuses de phosphore milite pour des interventions ciblées et d'envergure réaliste. La diversité des intérêts, responsabilités et expertises interpellés requiert la formation d'une coalition à l'échelle du territoire, motivée par la recherche de consensus sur la finalité et les modalités des interventions. Quel que soit le bassin versant et l'enjeu environnemental qui motive l'intervention, l'engagement et la responsabilisation du milieu, la concertation des intervenants et la complémentarité des encadrements réglementaire, financier et technique de la production sont les principaux critères de succès. C'est un défi à dimension humaine qui s'inscrit dans l'axe du développement durable, où la «pensée globale» et «l'air local» prennent tout leur sens.

## Bibliographie

---

Arnold J.G., Allen P.M., Bernhardt G. (1993) A comprehensive surface-groundwater flow model. *Journal of hydrology*, 142, 47-69.

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.

Allen P.M., Bernhardt G. (1993) A comprehensive surface-groundwater flow model. *Journal of hydrology*, 142, 47-69.

Binger, R.L., F.D. Theurer et G.V. Justice. 2001. web de AGNPS, Internet : <http://www.sed-lab.olemiss.edu/AGNPS.html>.

Bolinder, M.A., Simard, R.R., Beauchemin, S., et K.B. MacDonald. 1998. Indicator of risk of water contamination : methodology for the phosphorus component. Agriculture et agroalimentaire Canada. *Rapport interne no.24*, 30p.

Brunelle A. and V. Savoie. 2000. *Guide des pratiques de conservation en grandes cultures*. Module 7-B : Diagnostic et correction des problèmes de drainage. Conseil des productions végétales du Québec. 32 pages.

Budd, L.F. et D.W. Meals. 1994. Lake Champlain non-point source pollution assessment. *Lake Champlain basin program Technical Report 6A and 6B*. Grand Isle, Vermont.

Caumartin, J. et R. Vincent. 1994. *Diagnostic environnemental de la Rivière-aux-Brochets*. Ministère de l'Environnement et de la faune du Québec.

Corporation d'aménagement du ruisseau Turmel Inc. (CART), FSAA-Université Laval et BPR-Ingénieurs conseils. 1998. *Projet bassin versant Rivière Bélair (sous-bassin ruisseau Turmel)*. Rapport final. Entente Canada-Québec sur le développement durable en Agriculture.

Deslandes, J., A.R. Michaud, J. Cattai et F. Bonn. 2002. Indicateurs des facteurs source et transport du phosphore sur la base d'unités hydrologiques : l'étude de cas du bassin versant de la Rivière-aux-Brochets watershed. *In Lake Champlain Research Consortium, Symposium 2002: Lake Champlain in the new millennium*. Saint-Jean-sur-Richelieu, Québec.

Dorioz, J.M., J.P. Pelletier and P. Benoît. 1998. Physico-chemical properties and bioavailability of particulate phosphorus of various origin in a watershed of Lake Geneva (France). *Wat. Res.* 32-2: 275-286.

Dorioz, J.M. and 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.

Dorioz, J-M. and P. Blanc. 2001. Maîtrise de lacharge externe en phosphore des plans d'eau et fonctionnement des bassins versants. *In: L'eau dans l'espace rural, vie et milieu aquatiques*. INRA éditions, 113-132.

Duchemin, M. et C. Bernard. 2001. Communication personnelle. *Étude des exportations et nutriments du bassin versant expérimental du ruisseau Grillade*, IRDA.

Duguet, F. Gestion du ruissellement pour limiter les pertes en phosphore dans les bassins versants agricoles : Spatialisation, modélisation et proposition d'aménagements. 2002. Mémoire de fin d'études. École nationale supérieure agronomique de Toulouse (ENSAT), 56p. et 15 annexes.

Gangbazo, G. 1991. Effets des événements hydrologiques sur la perte d'azote et de phosphore suite à l'épandage de lisier de porc. *Thèse présentée à l'Institut National de la Recherche Scientifique (INRS-EAU)*. 324 p.

Gangbazo, G., A.R. Pesant, D. Côté, G.M. Barnett et D. Cluis. 1997. Spring runoff and drainage N and P losses from hog-manured corn. *J. of the Amer. Water Res. Assoc.* 33(2) : 405-411.

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.

Giroux, M, et T.S. Tran. 1996. Critères agronomiques et environnementaux liés à la disponibilité, la solubilité et la saturation en phosphore des sols agricoles du Québec. *Agrisol* 9-2 :51-57.

Grando, S. 1996. Effets de deux modes d'épandage de lisier de porc sur la qualité de l'eau de ruissellement. *Mémoire de fin d'études*, ENITA de Bordeaux. 64 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*.

Meals, Donald W 1992. Estimation of lag time for water quality response to BMP's. *In The national rural clean water program symposium*. EPA Seminar publication, EPA/625/R-92/006. Washington, DC. Pages 173-180.

Haygarth, P.M. et S.C. Jarvis. 1999. Transfer of phosphorus from agricultural soils. *Adv. Agron.* 66: 195-249.

Heatwhite, 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 and P. Enright. 2002. Evaluating Phosphorus Losses in surface and subsurface runoff from two agricultural fields in Quebec, *In Lake Champlain Research Consortium, Symposium 2002: Lake Champlain in the new millennium*. Saint-Jean-sur-Richelieu, Québec.

Johnes, P.J., P.E. O'Sullivan et G. Philipps. 1994. Lakes-classification and monitoring: A strategy for the classification of lakes. NRA, Bristol.

Jokela, E.W., J.C. Clausen, D.W. Meals and D.N. Sharpley. 2002. Effectiveness of agricultural best management practices in reducing phosphorus loading to Lake Champlain. *In Lake Champlain Research Consortium, Symposium 2002: Lake Champlain in the new millennium.* Saint-Jean-sur-Richelieu, Québec.

Karemangingo, C., M.-A. Drouin et M.R. Laverdière. 1997. Influence des fertilisants et des pratiques culturales dans la culture du maïs sur le déplacement de l'azote et du phosphore dans les eaux superficielles et souterraines. Cogisol Inc., Plan Vert et Entente auxiliaire Canada-Québec, projet no. 11-54698820-060.

Lapp, P., C.A. Madramootoo, P. Enright and J. Perrone. 1998. Water quality on an intensive agricultural watershed in Québec. *J. Amer. Water Res. Assoc.* 34-2: 427-437.

Lawrence, R., S. Dabney et R. Schultz. 2002. Improving water and soil quality with conservation buffers. *J. of Soil and Water Cons.* 57:2, pp.37A-43A.

Lemunyon, J.L. et R.G. Gilbert. 1993. The concept and need for a phosphorus assessment tool, *J. Prod. Agric.*, 6:483-496.

Loehr, R.C. 1974. Characteristics and comparative magnitude of non point sources. *WPFC* 46: 1849-1872.

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., R. Lauzier et M.R. Laverdière. 2002. Variabilité temporelle et spatiale du phosphore de source diffuse: étude de cas du Ruisseau-aux-Castors, dans le bassin de la Ricière-aux-Brochets, au Québec. *In Lake Champlain Research Consortium, Symposium 2002: Lake Champlain in the new millennium.* Saint-Jean-sur-Richelieu, Québec.

Michaud, A.R. et M.R. Laverdière. 2002. Cropping, soil type and manuring effects on phosphorus export and bioavailability from runoff plots study under rainfall simulation. En préparation pour le *Journal Canadien de la Science du Sol.*

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.

McDowell R., A.N. Sharpley and G. Folmar. 2001. Phosphorus export from an agricultural watershed: linking source and transport mechanisms. *J. Environ. Qual.* 30 :1587-1591.

Natural Resources Conservation Service (NCRS). 2000. Iowa Phosphorus Index. *Iowa Technical Note No. 25*, 16 p.

Papineau, F. et P. Enright. 1997. Gestion de l'eau dans le bassin versant de la partie supérieure du ruisseau Saint-Esprit. Caractérisation de la problématique environnementale.

Paquin, Robert. 1996. Bureau de renseignements agricoles du MAPAQ. Communication personnelle.

Pietilainen, O. et S. Rekolainen. 1991. Dissolved reactive and total phosphorus load from agricultural and forested basins to surface waters in Finland. *Aqua Fennica*. 21: 127-135.

Pollution from land use activities reference group (Pluarg). 1980. Pollution in the Great Lakes basin from land use activities. International Joint Commission Report to the Governments of the United States and Canada. 414 p.

Probst, J.L. 1985. Nitrogen and phosphorus exportation in the Garonne Basin, France. *J.Hydrol.* 76: 281- 305.

Soil Conservation Service (SCS), U.S. Department of Agriculture. 1972. Hydrology. *In: National Engineering Handbook*. Washington D.C. pp.10.5-10.6.

Rivest, R. et S. Gosselin. 2002. Mesures de précision du relief pour la gestion du sol et de l'eau. *In Lake Champlain in the new millenium, 2002 Spring Symposium*. Lake Champlain Research Consortium, Saint-Jean-sur-Richelieu, Québec, pp. 46-47.

Sharpley, 1995. Identifying sites vulnerable to phosphorus loss in agricultural runoff. *J. Environ. Quality* 24 :947 :951.

Tran, T.S. et M.Giroux. 1990. Relation entre les propriétés du sol et la disponibilité du P à la plante. *Agrosol* 3-1 : 7-12.

Vermont Department of Environmental Conservation (VDEC) et New York Department of Environmental Conservation (NYDEC). 1997. *A phosphorus budget, Model, and Load Reduction Strategy for Lake Champlain : Lake Champlain Diagnostic-Feasibility Study*. Waterbury, VT et Albany, NY.

Walker, W. 1998. *Flux, Stream loads computations, version 5.0*. Environmental laboratory USAE Waterways Experiment Station. Vichsburg, Misissipi, USA.

Ward, 1984. On the response to precipitation of headwater streams in humid areas. *J. Hydrol.*, 74:171-189.

Wischmeier, W.H. et D.D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses. *Agr. Handbook 537*. U.S.D.A. Washington D.C.

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, pp. 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.