

Prévention des transferts diffus de phosphore en bassins-versants agricoles : perspectives québécoises et de l'État du Vermont

Aubert R. MICHAUD¹, Marcel GIROUX¹, Christine LANDRY¹,
Julie DESLANDES¹, Isabelle BEAUDIN¹ & Richard LAUZIER²

¹Institut de recherche et développement en agroenvironnement
2700 Einstein
Québec G1P 3W8
Canada
aubert.michaud@irda.qc.ca

²Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec
Direction régionale de la Montérégie, secteur Est
2, rue Adhémar-Cusson
Bedford, Québec, J0J 1A0
Canada

Mots clés : phosphore, bassin-versant, pollution diffuse, modélisation hydrologique, télédétection, SWAT, cyanobactéries

Résumé

La présente communication dresse un bilan des études agroenvironnementales réalisées dans la section québécoise du bassin-versant de la baie Missisquoi, portion septentrionale du grand lac Champlain. Ces eaux transfrontalières partagées par la province de Québec et l'État du Vermont sont affectées par une prolifération récurrente de cyanobactéries, qui y perturbe l'approvisionnement en eau potable et mine le potentiel récréo-touristique de la région. Reconnaissant le rôle déterminant des apports de phosphore (P) sur la dégradation de l'écosystème de la baie Missisquoi, les gouvernements du Québec et du Vermont sont convenus d'un effort de réduction de la charge de P à la baie de l'ordre de 41 %. Cet objectif interpelle particulièrement le secteur agricole, auquel sont attribués 79 % de la charge annuelle de P vers la baie. Les projets de « recherche-action » réalisés au cours de la dernière décennie

dans la région ont permis 1. de développer une meilleure compréhension de la dynamique des transferts diffus du phosphore, 2. la mise au point d'outils de diagnostic et de gestion de l'eau à l'échelle parcellaire (télédétection) et du territoire (modélisation hydrologique) et 3. la mesure des retombées environnementales d'actions concertées d'entreprises agricoles à l'échelle du bassin-versant. Dans une perspective opérationnelle, la principale implication de ces études est toute l'importance à accorder aux deux principales lignes de défense agroenvironnementales, soit le contrôle des sources et du transport du P. La première ligne appelle à la gestion à long terme de l'enrichissement des sols, de même qu'à des modalités d'épandage qui les soustraient à l'action du ruissellement. L'évaluation et la représentation spatiale des apports et des taux de saturation des sols en P constituent dans cette optique des outils privilégiés de gestion du parcellaire, dont l'applicabilité a été démontrée pour les sols de Bretagne. En seconde ligne de défense, le contrôle des exportations passe par une atténuation des volumes et de l'intensité du ruissellement de surface au moyen de pratiques culturales anti-érosives et d'aménagement hydro-agricoles du parcellaire. C'est l'interprétation intégrée, au plan spatial, des bilans de masse et de l'influence du paysage sur le fonctionnement hydrologique du bassin-versant, qui permet de dégager un diagnostic d'ensemble du devenir du phosphore dans le territoire et de développer des scénarios d'intervention porteurs de bénéfices à la ferme et pour l'ensemble de la communauté.

Prevention of non-point source phosphorus exports through agricultural watersheds: perspectives from Quebec, Canada, and Vermont, USA

Keywords: phosphorus, watershed, non-point source pollution, hydrological modeling, remote sensing, SWAT, cyanobacteria

Abstract

An overview is presented of agroecological studies undertaken in the Quebec portion of the primary watershed emptying into northern Lake Champlain's Missisquoi Bay. These cross-border waters, shared by the Province of Quebec and the State of Vermont, host recurring cyanobacterial blooms, which threaten potable water supplies and threaten the region's tourism and recreation activities. Given the primary contribution by phosphorus (P) loads to the degradation of Missisquoi Bay ecosystem, the governments of Quebec and Vermont have pledged to achieve a 41% decline in P loads reaching the bay. This objective particularly targets the agricultural sector, to which 79% of annual P loads reaching the bay are attributed. Applied research undertaken over the last decade has allowed: *i.* the development of a better understanding of non-point source P transport dynamics; *ii.* the fine tuning of diagnostics and water management tools at the scales both of the individual field (remote

sensing) and of the whole territory concerned (hydrological modeling);
iii. an assessment of the environmental consequences of watershed-wide concerted action by the farm managements. From an operational perspective, the main take-home message of these investigations has been to show that preeminent importance should be given to two main lines of agroecosystem defence: the control of both P sources and P transport. The first line of defence calls for long term management of soil P enrichment, as well as of the methods and of the timing of manure application, particularly with a view to minimize runoff-driven P losses. In this context, spatially-based assessment and presentation of P inputs and soil saturation rates become front-line tools in field-scale management. Their suitability has already been demonstrated for soils in Brittany, France. As a second line of defence, the limitation of P exports requires a reduction in overall volume and intensity of surface runoff through the implementation of low-erosion cultivation practices and field-scale drainage improvements. Development of this integrated and spatially-aware view of mass balances and of the landscape's influence on watershed hydrology will lead to the emergence of an overall, holistic audit of the fate of P over the watershed and best management practices which will bear fruit not only at the scale of individual farms but also at that of the entire watershed community

1. Introduction

La prolifération de cyanobactéries dans les milieux aquatiques de la portion méridionale du Québec constitue un important enjeu environnemental. En 2007, les intervenants gouvernementaux répertoriaient 180 cours et plans d'eau affectés par ces organismes (GOUVERNEMENT DU QUÉBEC, 2007). Le cas de la baie Missisquoi, portion nord du grand lac Champlain (planche 1), demeure de loin le cas le plus sévère au Québec (BLAIS, 2002). En raison des toxines produites, le développement de fleurs d'eau de cyanobactéries constitue une sérieuse préoccupation de santé publique car elles entraînent depuis plusieurs années la perturbation des activités récréatives et touristiques de la région, de même que la contamination des eaux alimentant la station de traitement d'eau potable locale. Les proliférations de cyanobactéries découlent d'interactions complexes entre plusieurs facteurs, incluant la température de l'eau, l'ensoleillement, le pH, la disponibilité des nutriments et les courants dans le plan d'eau (DUY *et al.*, 2000). L'apport de phosphore demeure cependant un facteur prépondérant dans les successions algales qui favorisent la colonisation par les cyanobactéries. Reconnaisant le rôle déterminant des apports de P sur la dégradation de l'écosystème de la baie Missisquoi, une entente spécifique sur la réduction des charges de P dans cette baie est intervenue entre les gouvernements du Québec et du Vermont en août 2002. L'entente cible le critère de

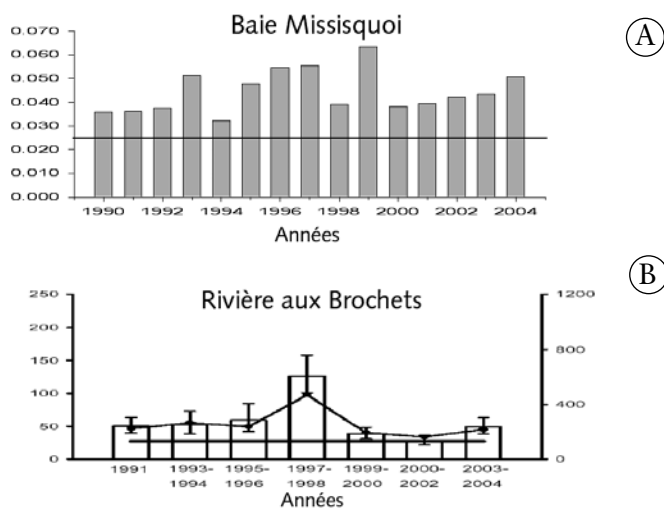


Figure 1 – Moyennes annuelles (1990-2004) des concentrations en phosphore total dans la baie Missisquoi comparées au critère de 0,025 mg/l (A), et charges annuelles de phosphore total de la rivière aux Brochets (B) exportées dans la baie Missisquoi. Adapté et mis à jour de MEDALIE & SMELTZER (2004).

concentration de $25 \mu\text{g P} \cdot \text{l}^{-1}$ dans les eaux de la baie (figure 1) et définit un partage de responsabilité pour l'atteinte d'une charge cible totale de phosphore dans la baie Missisquoi de $97 \text{ t P} \cdot \text{an}^{-1}$ (QUÉBEC & VERMONT, 2002). L'effort de réduction de la charge de phosphore pour le Québec (40 %) représente $27 \text{ t P} \cdot \text{an}^{-1}$, alors qu'il se situe à $43 \text{ t P} \cdot \text{an}^{-1}$ au Vermont (60 %). Dans les deux cas, il s'agit d'une réduction d'environ 41 % de la charge annuelle totale de référence établie pour l'année 1991. Cette réduction des flux de P dans la baie Missisquoi interpelle particulièrement le monde agricole. En effet, environ 79 % de la charge annuelle de P vers la baie (143 t P) sont attribués à l'agriculture, qui occupe 26 % du bassin-versant (HEGMAN *et al.*, 1999).

La présente communication dresse un bilan des études agroenvironnementales pertinentes à la mobilité du phosphore, réalisées principalement dans le bassin-versant de la rivière aux Brochets. Ce dernier draine un bassin-versant d'une superficie d'environ 630 km^2 , dont une partie (99 km^2) se situe au Vermont. Il est identifié comme principal contributeur de phosphore (P) à la baie Missisquoi en territoire québécois. La nature multidisciplinaire des travaux et la diversité des échelles d'étude de ces projets de « recherche-action », réalisés en collaboration avec des entreprises et conseillers agricoles de la région, ont permis de développer une meilleure compréhension de la dynamique globale du phosphore dans les systèmes de production agricole, les sols et l'écosystème aquatique du bassin-versant. Dans une perspective



Planche 1 – Localisation des bassins-versants du lac Champlain et de la baie Missisquoi, dont les eaux sont partagées par la province de Québec et l’État du Vermont. Les bassins-versants expérimentaux du ruisseau au Castor et du ruisseau Walbridge sont localisés dans la portion aval du bassin de la rivière aux Brochets, principal tributaire de la baie Missisquoi en territoire québécois.

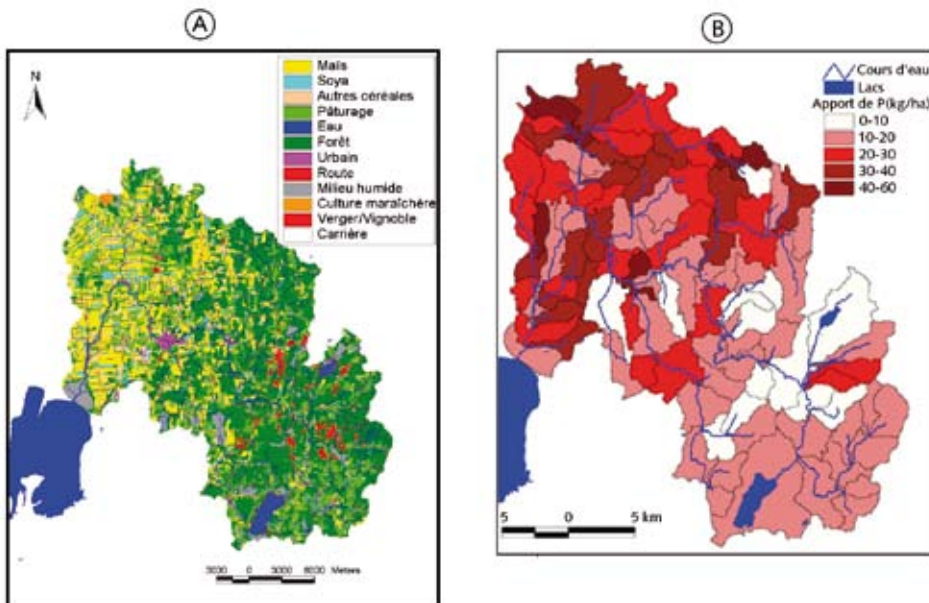


Planche 2 – Occupation des sols (A) et distribution spatiale du bilan d'apport en phosphore pondéré pour la superficie en culture des sous-bassins (B) de la rivière aux Brochets. Adapté de DESLANDES *et al.* (2004).

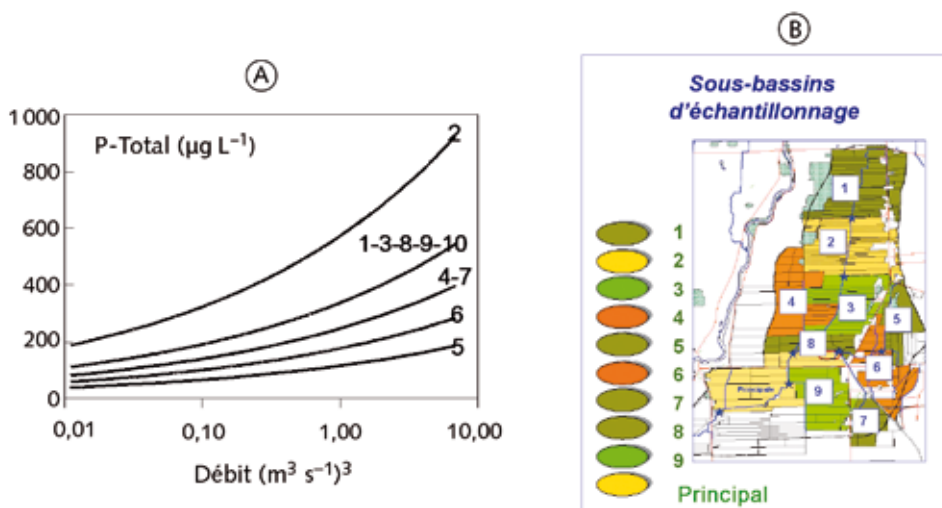


Figure 9 – Variabilité des concentrations en P-total en fonction du débit (A) aux stations d'échantillonnage spatial des eaux du ruisseau au Castor (B). Les estimateurs de régression de l'analyse de covariance de la concentration en P Total, utilisant le débit en co-variable, sont significativement différents au seuil de 10 % ajusté pour des comparaisons multiples. Adapté de MICHAUD *et al.* (2004a).

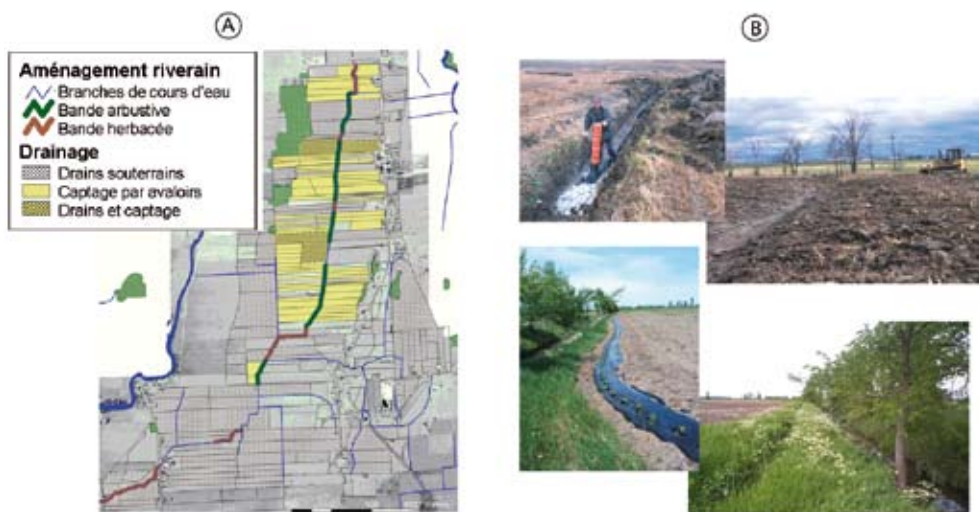


Figure 10 – Localisation des aménagements hydro-agricoles réalisés sur le bassin-versant du ruisseau aux Castors (A), incluant des structures de captage et des bandes riveraines arbustives (B).

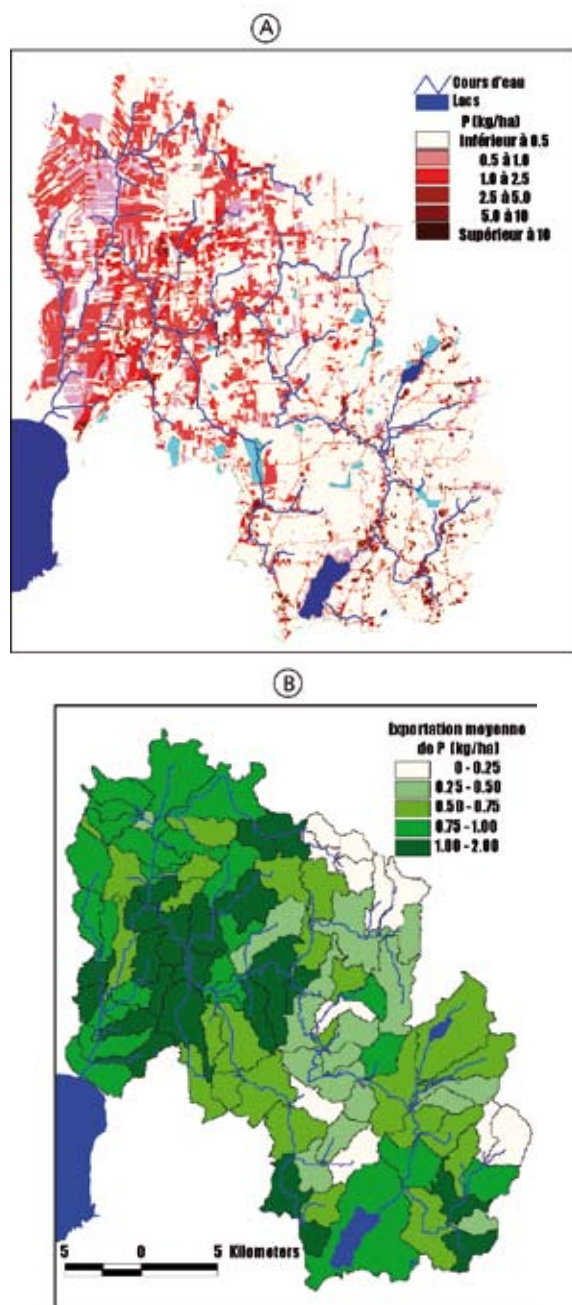


Figure 15 – Variabilité spatiale des exportations moyennes annuelles de P total (2001-2003) modélisées par SWAT pour le parcellaire agricole à l'échelle des UHRH (A) et agrégées à l'échelle des sous-bassins de la rivière aux Brochets (B). Adapté de DESLANDES *et al.* (2007).

opérationnelle, ce programme de recherche a pour principaux objectifs le développement d'outils de diagnostic et de gestion de l'eau à l'échelle de la ferme et du territoire, ainsi que l'évaluation des retombées environnementales, associées à des actions concertées à l'échelle du bassin-versant. Le principal constat pertinent à la mobilité du phosphore mis en relief par ces études est la nécessaire complémentarité d'interventions à l'égard des sources de phosphore et de la gestion du ruissellement, afin de prévenir l'exportation diffuse du P hors des champs. Conceptuellement, les deux principales sources de P susceptibles d'être exportées depuis le parcellaire en culture vers l'écosystème aquatique sont le stock de phosphore accumulé dans les sols et les apports phosphorés sous la forme d'engrais de ferme et d'engrais minéraux. En toute première ligne de défense agroenvironnementale, le contrôle de l'enrichissement des sols est un préalable au contrôle à long terme des exportations de P vers l'écosystème aquatique. À plus court terme, les formes, taux, modes et périodes d'apports de phosphore ont aussi une influence déterminante et immédiate sur la qualité de l'eau. En pratique, il demeure difficile de différencier les effets de la richesse des sols et des modalités d'apports de P sur les risques d'exportation du phosphore dans le cours d'eau. Les influences de la richesse du sol, héritée des antécédents en matière de fertilisation, se confondent avec l'effet des applications récentes d'engrais de ferme. L'application des principes de fertilisation intégrée permet cependant de limiter l'accumulation de P potentiellement mobile en surface de la couche arable, et de soustraire les engrais de ferme et minéraux à l'action du ruissellement. En deuxième ligne de défense agroenvironnementale, le contrôle des exportations diffuses de phosphore passe par les pratiques culturales anti-érosives et l'aménagement hydro-agricole du parcellaire afin d'atténuer l'intensité du ruissellement de surface dans les zones les plus hydrologiquement sensibles du parcellaire en culture. Dans un premier temps, la présente communication dresse un portrait des influences respectives des sources et des facteurs déterminants de la mobilité du phosphore, mis en relief dans le cadre de dispositifs expérimentaux en parcelle et en bassin-versant au Québec, et de façon plus particulière dans le bassin-versant de la rivière aux Brochets. En second lieu, les approches et résultats pertinents à des actions concertées de mise en valeur de bassins-versants expérimentaux de la rivière aux Brochets sont abordés. Enfin, les capacités prédictives du modèle hydrologique SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) sont mises à profit dans l'étude de différents scénarios de gestion agroenvironnementale à l'échelle du bassin-versant de la rivière aux Brochets.

2. Dynamique d'enrichissement des sols à l'échelle du territoire : rien ne se perd, rien ne se crée

Une première étude réalisée à l'échelle du bassin-versant de la rivière aux Brochets, dont les résultats sont présentés plus en détail dans DESLANDES *et al.* (2002), mettait en relation les gradients spatiaux dans les bilans d'apports, la richesse des sols et les concentrations en phosphore de l'eau de surface. L'étude portant sur la validation d'indicateurs de la mobilité du phosphore à l'échelle du territoire était notamment fondée sur la télédétection, l'intégration spatiale de données pertinentes aux productions agricoles et aux propriétés des paysages et l'échantillonnage spatial de la qualité de l'eau. Globalement, les apports spécifiques annuels de P sur l'ensemble des terres agricoles du bassin-versant (moyenne pondérée pour la superficie en culture) étaient estimés respectivement à 14,9 et 8,0 kg P/ha en engrais de ferme et fertilisants minéraux. Le prélèvement annuel moyen des cultures se situait pour sa part à 14,6 kg P/ha, ce qui situe le bilan annuel des apports en P (apports-prélèvements) à environ 8,3 kg P/ha. Compte tenu que la contribution moyenne du parcellaire en culture en P estimée à l'exutoire du bassin se situe en moyenne à 1,2 kg P/(ha · an) (HEGMAN *et al.*, 1999), nous pouvons estimer qu'environ 7 kg P/an s'accumulent dans le bassin-versant pour chaque hectare en culture. Dans les faits, l'étude a toutefois démontré que cette dynamique d'enrichissement présente une forte discrimination spatiale, qui témoigne à son tour du gradient bien démarqué dans les vocations agricoles, qui oppose les sous-bassins de la portion amont du bassin à ceux situés à l'aval (planche 2). Le potentiel agricole des sols favorise en effet les cultures annuelles intensives en portion aval, alors que les terres au potentiel plus marginal de la portion amont sont plutôt associées aux rotations longues, typiquement liées à la production laitière. Globalement, les bilans d'apports et la richesse des sols estimés à l'échelle des sous-bassins apparaissent comme significativement corrélés ($r = 0,59$, $p < 0,01$) et témoignent de la dynamique d'enrichissement des sols en réponse à la densité des élevages. Combiné à l'élévation relative des sous-bassins dans le paysage du bassin, le bilan d'apport en P contribue à expliquer 86 % de la variabilité observée dans la concentration en P biodisponible dans le réseau hydrographique du bassin. L'étude venait ainsi confirmer la pertinence et la faisabilité d'exprimer la vulnérabilité du territoire aux exportations de P en fonction des apports ou de l'enrichissement des sols en P. Les résultats de cette première étude mettaient aussi en relief que ces indicateurs du bilan de masse du P ne suffisaient pas à expliquer à eux seuls le portrait de la qualité de l'eau, qui dépend aussi d'indicateurs de la vocation agricole du territoire et des propriétés du paysage.

3. L'indice de saturation des sols en phosphore : un outil de gestion à l'échelle de la parcelle

Le concept d'indice de saturation des sols en phosphore, initialement développé en Hollande par BREUWSMA & SILVA (1992), consiste à définir des seuils environnementaux au-delà desquels le risque de contamination des eaux de surface est accru. Dans une perspective agroenvironnementale, la prise en compte du taux de saturation en P dans la gestion de la fertilisation à l'échelle de la parcelle permet de maintenir un niveau adéquat de phosphore pour la croissance des plantes, mais sans excès du point de vue environnemental. Au Québec, à l'instar de plusieurs régions nord-américaines, le taux de saturation correspondant au rapport P/Al extraits par la méthode Mehlich-III a été validé comme indice de solubilité et de désorption du phosphore dans les sols agricoles (GIROUX & TRAN, 1996 ; KHIARI *et al.*, 2000 ; PARENT *et al.*, 2002 ; PELLERIN *et al.*, 2005). Cet indice reflète également la concentration de phosphore dissous observée dans les eaux de ruissellement (GIROUX *et al.*, 2008). Le taux de saturation P/Al-Mehlich-III a par ailleurs servi de base à l'élaboration de normes réglementaires relatives à l'enrichissement et aux apports de P sur les sols agricoles du Québec. Afin d'éviter une accumulation excessive de P, la réglementation sur les exploitations agricoles en vigueur au Québec détermine ainsi un dépôt maximal de P sur les terres, variable selon les cultures, les exportations du P, la teneur et la saturation en P des sols. De plus, elle stipule que l'agronome doit, par ses recommandations, faire en sorte que le niveau de saturation du sol en phosphore (P/Al) soit abaissé à une valeur inférieure à 7,6 % pour un sol avec une teneur en argile supérieure à 30 %, et à 13,1 % P/Al pour un sol avec une teneur en argile égale ou inférieure à 30 % (GOUVERNEMENT DU QUÉBEC, 2002).

Le taux de réduction de la saturation en P en fonction des apports et le temps nécessaire pour atteindre les niveaux prescrits par la réglementation sont encore assez mal connus. C'est que l'évolution de la teneur en P assimilable et de la saturation en P d'un sol dépend non seulement des quantités apportées, des exportations de P et de la teneur initiale en P assimilable, mais aussi de la dynamique de rétroversion du phosphore liée à la nature pédologique et physico-chimique des sols (GIROUX & ROYER, 2007). À la base, le bilan annuel des apports de P par les engrais et des exportations par les récoltes constitue un élément déterminant de l'évolution de la teneur en P assimilable des sols. Différentes possibilités peuvent survenir en rapport avec ce bilan et conduire à une diminution, au maintien ou à l'accroissement de la teneur en P assimilable des sols. GIROUX & ROYER (2007) ont étudié l'évolution de la teneur en P des sols en relation avec le bilan du P (figure 2). Lorsque les apports de P sont

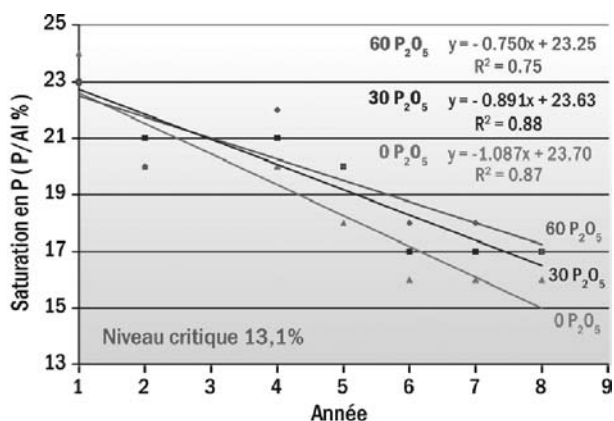


Figure 2 – Évolution de la saturation en phosphore du sol estimée selon la méthode de Mehlich-III P/Al en réponse à des bilans à l'équilibre et excédentaires de P (+30 et +60 P). Adapté de GIROUX & ROYER (2007).

inférieurs aux exportations (bilan négatif), une diminution de la teneur en P assimilable des sols est observée en sols riches mais beaucoup moins en sols pauvres. Dans le cas où le bilan est équilibré ou modérément excédentaire, une baisse du P assimilable est observée dans les sols riches et un maintien dans les sols pauvres. Lorsque le bilan du P est excédentaire d'environ 13 kg P/ha, la rétroversion du P compense pour le surplus du bilan de sorte que les sols maintiennent leur teneur en P assimilable. Dans le cas où les apports de P sont importants et excèdent de plus de 13 kg P/ha les exportations, une augmentation du P assimilable est observée dans tous les sols. Une implication pratique de ces études sur la rétroversion du phosphore est que le taux de saturation des sols en P présentant un risque environnemental élevé est appelé à diminuer assez rapidement (10 à 13 ans selon les projections en planche 1), en réponse à des apports de P en équilibre avec les besoins des cultures.

Les courbes de solubilité du phosphore sont également affectées par les processus pédologiques, le pH et la texture des sols, ce qui explique les seuils critiques de saturation de 7,6 % pour les sols argileux avec plus de 30 % d'argile, généralement gleysoles, et de 13,1 % pour les autres sols (PELLERIN *et al.*, 2005). On trouve dans les sols plusieurs tonnes par hectare d'oxydes de fer et d'aluminium libres (non cristallisés), surtout dans les sols podzoliques. La capacité de fixation du phosphore est particulièrement influencée par la teneur en aluminium libre des sols. Dans les sols argileux, le contenu en calcium et en magnésium joue un rôle, mais le fer et l'aluminium exercent aussi un effet. Dans les sols calcaires, c'est le carbonate de calcium libre qui est responsable

de la fixation du P. Lorsque le phosphore est adsorbé ou précipité, un équilibre s'établit avec la solution du sol et celui-ci dépend de la nature chimique des produits de réaction, des formes de P et du pH. Cet équilibre est dynamique ; il va changer dans le temps. À long terme, les phosphates précipités vont évoluer sur le plan chimique vers des formes de plus en plus stables. Pour le calcium, ces formes peuvent être des phosphates dicalciques, tricalciques, octocalciques ou des apatites. Pour le fer et l'aluminium, les phosphates vont être transformés en minéraux très stables, tels que la strengite et la variscite. Comme cette évolution rend de moins en moins disponible le phosphore résiduel des engrais, on appelle ce phénomène la rétroversion des phosphates. Il est important d'en connaître la nature car il constitue un élément important de l'évolution des teneurs en P assimilable des sols.

4. Application de l'indice de saturation aux sols de Bretagne

Les similitudes dans les propriétés et les matériaux parentaux des sols du Québec et de la Bretagne ont motivé une étude franco-québécoise ciblée sur l'évaluation de l'adaptabilité de l'indice Mehlich-III de saturation en P aux sols bretons. Les principaux objectifs de l'étude étaient 1. d'évaluer la corrélation entre les résultats des différentes méthodes d'extraction du P utilisées au Québec et en Bretagne, 2. de déterminer la saturation et la capacité de fixation des sols bretons et 3. de les situer par rapport aux seuils agroenvironnementaux établis au Québec. Une description détaillée des résultats de l'étude est rapportée dans SARR *et al.* (2007). Tous les échantillons de sol utilisés dans cette étude ont été collectés dans le cadre de l'étude sur l'observatoire lisier. Ce projet avait pour objectif de caractériser l'évolution de la qualité chimique des sols en rapport avec des apports de lisier. Les 45 échantillons de sol proviennent du Finistère, département de la région Bretagne, et sont issus de 8 parcelles qui ont fait l'objet d'un échantillonnage tous les 6 ans, entre 1973 et 1999. Ces 45 échantillons appartiennent à un réseau plus étendu de 180 parcelles qui ont été suivies durant cette période (VERTÈS *et al.*, 2005), et sont représentatifs d'une large gamme de teneurs en P Dyer des horizons de surface (25 premiers centimètres) des sols de cette région. Les échantillons appartiennent à différentes familles pédogénétiques dont les gleysols et les brunisols de texture limoneuse à limono-sableuse, et se caractérisent par de faibles teneurs en carbonate de calcium. Les parcelles se différencient par leur richesse en P, les modalités d'apport en engrais et par les systèmes culturaux.

L'étude de SARR *et al.* (2007) met en relief une corrélation entre les résultats des méthodes Mehlich-III et Dyer utilisées respectivement pour la détermination du P disponible au Québec et en Bretagne ($r^2 = 0,86$). Le P disponible

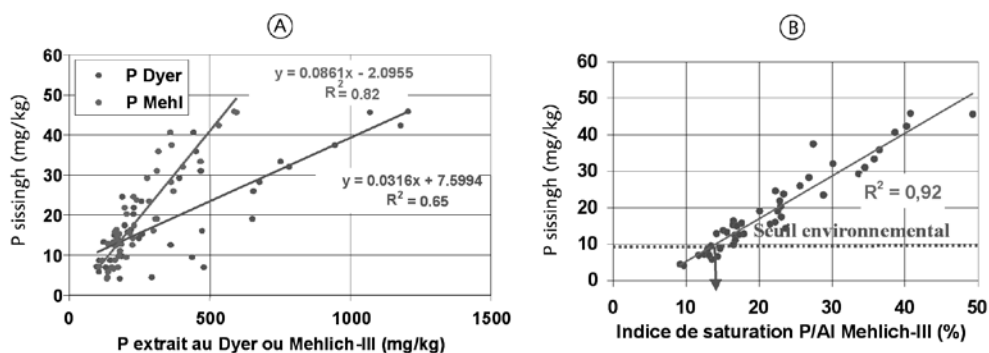


Figure 3 – Relations entre le phosphore extrait à l'eau (P Sissingh), l'extractant Dyer et Mehlich-III (A), et l'indice de saturation des sols pour les 45 sols de Bretagne (B) (SARR *et al.*, 2007).

extrait avec le réactif de Dyer est cependant 1,36 fois plus élevé, en moyenne, que celui obtenu avec la méthode Mehlich-III (figure 3). La forte concentration de l'acide citrique de l'extractif de Dyer contribuerait notamment à solubiliser plus de phosphates calciques que l'extractif Mehlich-III. Les indices de saturation Mehlich-III P/Al des sols bretons analysés varient entre 9 et 49 %, avec une moyenne de 22 %. Sur la base du P extractible à l'eau (P-Sissingh), le seuil environnemental pour ces sols de Bretagne serait de 14 % de P Mehlich/Al soit l'équivalent de 460 mg/kg de P Dyer, ce qui place la grande majorité des échantillons au-delà du seuil environnemental (figure 3). À titre de comparaison, les saturations en P Mehlich-III/Al des sols du bassin-versant de la rivière aux brochets dépassent le seuil environnemental dans une proportion de 33 % (DESLANDES *et al.*, 2004). Enfin, l'étude des sols bretons démontre l'intérêt de rapporter les teneurs en P Dyer aux teneurs en éléments fixateurs du sol, notamment l'aluminium, pour en indexer le risque de mobilité. Globalement, les sols bretons à l'étude montrent des capacités maximales de fixation moyennes à élevées, se situant entre 1 119 et 2 292 mg P/kg de sol, avec une moyenne de 1 608 mg P/kg. Un indicateur P Dyer/Al ou P Mehlich-III/Al présenterait ainsi un fort potentiel pour bien représenter la solubilité, la saturation et la fixation du P des sols de Bretagne.

5. Modalité des apports d'engrais de ferme : priorité à l'enfouissement

Parallèlement au contrôle de la richesse du sol, l'adoption de modalités d'épandage qui soustraient les engrais de ferme à l'action du ruissellement de surface

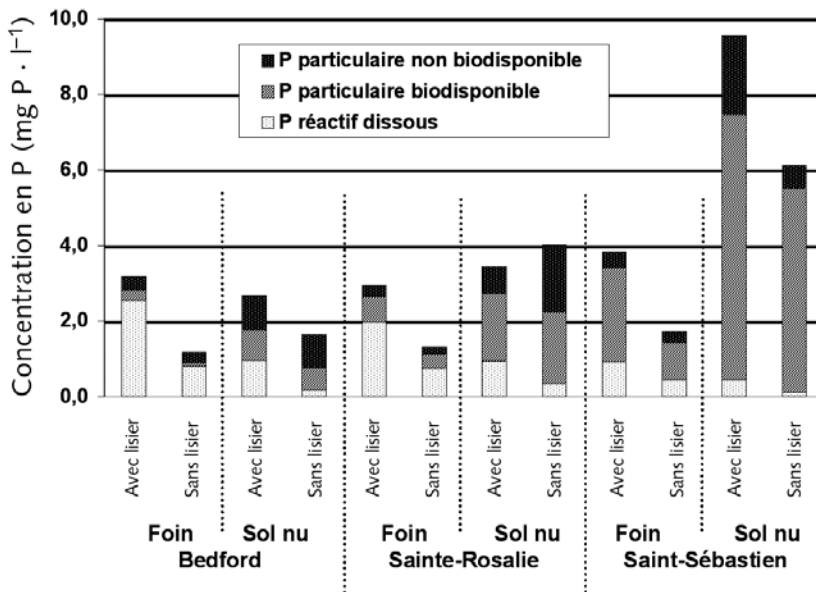


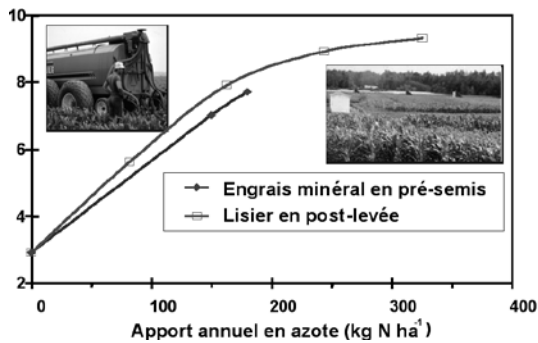
Figure 4 – Effets et interactions de la couverture végétale, du type de sol et de l'amendement de lisier sur la mobilité et spéciation du phosphore sous conditions de pluie simulée dans le bassin-versant expérimental du ruisseau au Castor (moyennes de 3 répétitions). Adapté de MICHAUD & LAVERDIÈRE (2004).

constitue une composante essentielle de la région agroenvironnementale des sols (au Québec). En raison des conditions agroclimatiques québécoises, les périodes d'épandage printanière et automnale demeurent relativement vulnérables à la production de ruissellement de surface. Les pointes d'activité hydrologique à cette période sont d'autant plus préoccupantes que la plus grande partie des engrais de ferme sont épandus à ces périodes de l'année. L'effet de l'épandage d'engrais de ferme sur l'enrichissement et la spéciation du P du ruissellement de surface a notamment été mis en relief par MICHAUD & LAVERDIÈRE (2004), dans le cadre d'une étude en parcelles sous pluie simulée. Le dispositif expérimental en tiroirs de 36 parcelles a comparé les effets et les interactions des traitements d'apport de lisier de porc en parcelle principale (témoin *vs.* 60 kg P/ha) et des couvertures du sol en parcelle secondaire (sol nu *vs.* prairie), sur les concentrations et la spéciation du phosphore exporté dans le ruissellement (total, réactif dissous, particulaire et biodisponible). Bien que les processus d'érosion et de transport de sédiments fussent identifiés comme les principaux vecteurs d'exportation du P, l'apport de lisier de porc appliqué en surface du sol sur prairie ou sur sol nu contribuait à une augmentation moyenne de 74 % de la concentration en phosphore biodisponible dans le ruissellement de surfa-

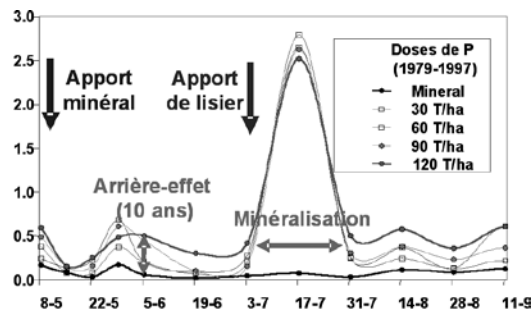
ce (figure 4). Parmi les implications pratiques de cette étude, notons qu'un sol relativement pauvre en P peut contribuer à des exportations significatives de P si les modalités d'épandage font en sorte que la parcelle ruisselle préalablement à l'enfouissement de l'engrais de ferme. Compte tenu de la mince profondeur effective d'interaction entre le sol et le ruissellement de surface, l'enfouissement des amendements demeure un élément déterminant du devenir du P.

La période estivale constitue la période d'épandage la plus sûre au plan environnemental puisque les probabilités de génération de ruissellement sont faibles. Une proportion croissante des épandages est réalisée au Québec, sur des cultures de maïs, de céréales à paille et de prairies, à la fin du printemps et en été au moyen de rampes d'épandage à basse pression. Cette approche permet de mieux synchroniser les apports de nutriments avec les besoins des cultures en croissance, tout en prévenant la compaction du sol associée à la circulation de poids lourds sur des sols humides. Des études de longue durée réalisées à la station expérimentale de l'IRDA depuis plus de 25 ans sur l'application en post-levée du lisier de porc ont démontré les avantages de cette pratique à l'égard de la disponibilité des éléments nutritifs, de l'accumulation à long terme des éléments nutritifs dans le sol et de son impact sur la qualité de l'eau (CÔTÉ *et al.*, 1996). L'efficacité fertilisante de l'azote est particulièrement favorisée par ce mode d'épandage, alors que le coefficient d'efficacité du lisier se situe entre 0,70 et 0,85. Une dose agronomique de lisier apportée en post-levée, contenant environ 200 kg N/ha, donne ainsi un rendement équivalent à une fertilisation de 150 kg N/ha de nitrate d'ammonium appliquée en pré-semis (figure 5). Le coefficient d'arrière-effet (contribution de N résiduel associé aux apports d'engrais de ferme des années précédentes) a été estimé à 0,35 après 15 années d'apport de lisier, ce qui permet de réduire la dose de lisier appliquée tout en comblant les besoins de la culture (CÔTÉ *et al.*, 1996).

Le suivi de la disponibilité du phosphore au moyen de membranes d'échange anioniques sur les mêmes parcelles d'étude de longue durée par LANDRY (2007) confirme la disponibilité élevée du P du lisier de porc suivant l'épandage en post-levée, de même que l'arrière-effet (figure 5). La dynamique de rétroversion du P fait en sorte que la période de disponibilité maximale du P est relativement courte et bien synchronisée avec les besoins de la culture de maïs. Au plan environnemental, il est donc souhaitable que ce pic de disponibilité du P se situe hors des périodes de risque élevé de mobilisation par le ruissellement de surface ou par les écoulements préférentiels vers les drains souterrains. Cette efficacité élevée, prévisible et constante de l'azote des lisiers a d'importantes implications au plan de la gestion du phosphore. Compte tenu de ce que le ratio N:P des engrais de ferme (non traités) est systématiquement inférieur à celui des besoins des cultures, l'efficacité élevée de l'azote associée aux épandages en



(A)



(B)

Figure 5 – Efficacité fertilisante de l’azote du lisier de porc épandu en post-levée du maïs dans le cadre du dispositif expérimental de longue durée (1977-2007) à la station expérimentale de l’IRDA (A) et dynamique annuelle de la disponibilité du phosphore révélée par des membranes d’échanges anioniques (B). Adapté de LANDRY (2007).

post-levée contribue à réduire le taux d’enrichissement des sols en P. À l’échelle du bassin-versant de la rivière aux Brochets par exemple, le taux recommandé d’apport moyen d’azote provenant des engrais de ferme se situe à 141 kg N/ha. En régie d’épandage en post-levée, cette dose agronomique d’azote se traduit en un apport moyen de 49 kg P/ha (CÔTÉ *et al.*, 1996), soit environ la moitié de la dose de P associée à un épandage automnal satisfaisant les mêmes besoins azotés des cultures.

6. Maîtrise des facteurs de transport : prise en compte de la saisonnalité et des propriétés des paysages

Dans la perspective d’atténuer le transport du phosphore hors du parcellaire en culture, deux constats émergent des études québécoises portant sur la variabilité spatio-temporelle des flux de P mesurés en bassins-versants agricoles. D’une part, le ruissellement de surface demeure le principal vecteur de transport du P, et cette dynamique est largement sous contrôle saisonnier. La plus importante

fraction des épisodes de ruissellement de surface a lieu en période de fonte à la fin de l'hiver et au début du printemps. Les redoux hivernaux constituent aussi une part importante du ruissellement de surface annuel. Les phénomènes de gel du sol et la fonte de la neige contribuent ainsi à une portion importante, sinon dominante, de l'érosion et des exportations de phosphore. D'autre part, l'intensité modérée des précipitations au Québec ($< 15 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$) fait en sorte que la distribution des zones à fort potentiel de ruissellement présente une forte discrimination spatiale. Les particularités du paysage, 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 conditionnent le développement de zones hydrologiquement plus actives, dont l'étendue varie au gré des saisons et des précipitations.

L'étude du bassin-versant du ruisseau au Castor (MICHAUD *et al.*, 2004a), un tributaire agricole (11 km^2) de la rivière aux Brochets, met bien en relief les contrôles saisonniers et paysagers sur la mobilité du phosphore. Cultivé dans sa presque totalité, ce bassin présente les taux d'exportation de P parmi les plus élevés de la région (DESLANDES *et al.*, 2004). Le maïs-grain, les céréales à paille, les plantes fourragères et le soja sont cultivés en rotation sur les 305 parcelles exploitées dans le bassin-versant. Globalement, le bilan des apports moyens en P pondéré pour la superficie du bassin est de l'ordre de $10,6 \text{ kg P/ha}$. Ce bilan modéré reflète la vocation laitière et céréalière du bassin, alors que l'apport de P en provenance des engrais de ferme demeure inférieur au prélèvement des cultures. Les échantillonnages composites de l'ensemble du parcellaire du bassin révèlent qu'environ le tiers des parcelles avaient atteint en 1999 le seuil de vulnérabilité de 10 % (Mehlich-3 P/Al), alors que le seuil critique de 20 % était atteint par 6 % d'entre elles.

La planche 3 illustre les séries chronologiques, sur une base hebdomadaire, des précipitations, fontes de neige et exportations de sédiments et de phosphore pour l'ensemble de la période 1997-2003. Dans l'ensemble, les flux annuels de P demeurent néanmoins relativement stables pour la période d'étude, soit à $1,5 \text{ kg de P par hectare en culture}$. Une importante variabilité interannuelle est cependant observée dans la contribution relative des pluies et des fontes de neige aux crues et exportations du ruisseau. Au cours des deux premières années hydrologiques (2001-2003), les événements de pluie ont contribué de façon importante aux crues du ruisseau (hauteur d'eau $> 3,3 \text{ mm} \cdot \text{jr}^{-1}$) et aux exportations de sédiments et de phosphore. Au cours des quatre années précédentes (1997-2001), la plupart des crues sont plutôt associées à des événements hivernaux, alors que chacune de ces années hydrologiques a connu un redoux hivernal en janvier ou février. Les moyennes bisannuelles des concentrations en phosphore total (P_{TOT}) en période de crues, pondérées pour le débit

du ruisseau, se situent entre 460 et 482 $\mu\text{g P} \cdot \text{l}^{-1}$. Compte tenu des disparités interannuelles dans les précipitations et les hauteurs d'eau ruisselées, la proportion du flux annuel de P_{TOT} associée aux crues se situe entre 60 et 75 % pour l'ensemble de la période d'étude. Le degré élevé de saturation en eau des sols favorise alors la production de ruissellement de surface sur des portions significatives, mais variables du bassin-versant. Les flux intenses et épisodiques de P sont aussi favorisés par la connectivité hydrologique qui s'établit entre les portions saturées du champ, les fossés, les berges et le cours d'eau. 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. Des accumulations de précipitations de l'ordre de 30 à 75 mm, sur une période de 5 jours, ont ainsi été requises pour induire une hauteur d'eau journalière minimale de 5 mm pendant la période de culture dans le bassin du ruisseau au Castor. Les pointes de concentration en MES ($> 1\,000 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$) traduisent alors une forte érodabilité des sols, présumée plus élevée qu'à la fin de l'hiver. Des épisodes de ruissellement courts et intenses en période estivale favorisent par ailleurs la capacité de transport du ruissellement de surface, résultant en des concentrations maximales de MES et de P_{TOT} dans le ruisseau, de même que de fortes pentes de régression liant la concentration au débit (C/Q). En période de crue hivernale, on observe plutôt un plafonnement des concentrations de MES et de P, alors que l'érosivité des précipitations demeure relativement plus faible et que l'érodabilité du sol est tempérée par la consolidation des agrégats du sol gelé (DORIOZ & FERHI, 1993).

En parallèle au suivi de qualité à son exutoire, la variabilité des exportations de phosphore dans les différentes branches et tronçons du ruisseau au Castor a été mise en relief au moyen d'un échantillonnage spatial en dix stations. Compte tenu du gradient longitudinal bien marqué dans l'altitude, la nature des roches mères et la perméabilité des sols du bassin, la variabilité spatiale des exportations de P traduit l'influence du paysage sur l'activité hydrologique à l'œuvre dans le bassin-versant. L'analyse en covariance des données de qualité de l'eau, utilisant le débit du ruisseau à la station principale comme co-variable (planche 4), indique que des cheminements hydrologiques contrastés étaient à l'œuvre dans les différents sous-bassins lors des échantillonnages en période de crue. Malgré un gradient spatial bien marqué dans la richesse des sols en P favorisant les parcelles en haute position dans le relief (n° 5, 6 et 7), les échantillons prélevés à l'exutoire de ces sous-bassins ont montré des concentrations en P significativement inférieures à celles des sous-bassins en position basse de relief, hydrologiquement plus actifs. De tous les descripteurs biophysiques et agronomiques de la mobilité du P, l'indice de ruissellement (Méthode CN-SCS) a démontré le meilleur pouvoir explicatif des exportations de P, malgré

un gradient spatial opposé dans l'enrichissement des sols en P (MICHAUD *et al.*, 2004a). Une implication pratique de ces observations est l'importance de considérer en priorité les zones hydrologiquement plus actives du parcellaire, dans l'implantation de pratiques culturales anti-érosives ou l'aménagement hydro-agricole du parcellaire. Bien que l'étude témoigne de la dominance des contrôles hydrologiques de surface sur la mobilité du P, notons par ailleurs que la comparaison des résultats des sous-bassins présentant des niveaux similaires d'activité hydrologique a permis de mettre en relief l'influence d'apports récents de P provenant d'engrais de ferme sur la qualité de l'eau du ruisseau au Castor (planche 4, n° 7 > n° 5 ; n° 9 > n° 4). Ces observations 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. Elles rappellent aussi l'importance d'investir dans des modalités d'épandage qui soustraient les engrais de ferme à l'action du ruissellement de surface.

L'importance des transferts de P associés au drainage souterrain (55 % de la superficie en culture) constitue une autre implication environnementale importante de l'étude du bassin du ruisseau au Castor. La strate de débits élevés ($0,6 \text{ mm} \cdot \text{jr}^{-1} < Q < 3,3 \text{ mm} \cdot \text{jr}^{-1}$) du ruisseau, associée à une dominance des transferts hypodermiques et souterrains, témoigne en effet de concentrations relativement élevées en P, de l'ordre de 200 à 300 $\mu\text{g P/l}$, de même que d'importantes fractions particulières (43 à 67 %). Dans leur étude sur la migration du P dans le ruissellement et les drains souterrains de parcelles limitrophes au bassin du ruisseau au Castor, ENRIGHT & MADRAMOOTOO (2003) ont attribué les accroissements marqués des concentrations en P dans les eaux de drainage souterrain au transport préférentiel de P dans les macropores du sol. Le transport préférentiel du phosphore via le réseau de drainage souterrain serait particulièrement actif sur le site argileux en position basse du relief du bassin, où les concentrations en P particulaire atteignent 80 % du flux total de P exporté en conditions d'écoulement en charge (JAMIESON *et al.*, 2002). Bien que le drainage souterrain soit le principal exutoire des eaux, contribuant en moyenne pour 81 % du volume exporté hors de la parcelle, le ruissellement de surface contribue en moyenne à 60 % des exportations de P en raison d'une concentration moyenne en cet élément de plus de dix fois supérieure à celle observée dans les drains. Ces observations aux échelles parcellaire et bassin-versant sont cohérentes avec celles rapportées dans le cadre d'autres dispositifs expérimentaux au Québec. SIMARD *et al.* (1995) ont documenté la migration du phosphore dans des sols surfertilisés de la région de Lotbinière. Ils ont obtenu des pertes importantes de phosphore total aux drains. La plus grande partie du phosphore perdu était sous forme particulaire. BEACHEMIN *et al.* (1998) ont caractérisé la qualité d'eau de drainage de 27 sites. Pour les 14 sites

ayant démontré une concentration excédant 30 µg/l, dix étaient des gleysols. RIVEST & LEDUC (1997) ont caractérisé les champs et les eaux de drainage de 80 champs en production de maïs en conditions printanière et automnale, sans pouvoir établir de lien entre la richesse ou la saturation en P des sols et la concentration en P de l'eau dans les drains. Les dépassements observés du critère de qualité (30 µg P/l) n'ont pas pu être expliqués par les pratiques de fertilisation. Les auteurs concluent que le risque de migration souterraine est plutôt associé aux propriétés physiques du sol, notamment aux conductivités hydrauliques élevées et aux conditions propices aux écoulements préférentiels. GIROUX & ROYER (2006a,b) ont publié deux études sur les pertes des éléments nutritifs aux drains sous cultures commerciales et sous prairies. Les pertes aux drains se font principalement sous forme de P particulaire et à un degré moindre sous forme dissoute dans un sol de texture limoneuse. Les charges de P particulaire perdues sont relativement semblables selon les cultures et les modes de fertilisation. En revanche, les charges de P dissous peuvent être affectées par les modes de fertilisation. Globalement, l'état des connaissances sur la migration souterraine du P au Québec indique ainsi que l'aménagement d'un système de drainage souterrain peut contribuer à la mobilité du P dans le sol. Cependant, par son effet sur la réduction du volume de ruissellement de surface, le drainage souterrain atténue les exportations globales de phosphore vers l'écosystème aquatique.

7. Détection de réponses de la qualité de l'eau à l'action concertée en bassin-versant

Parallèlement au suivi agroenvironnemental, le bassin-versant du ruisseau au Castor a fait l'objet d'une action concertée des propriétaires riverains, ciblée sur la réduction des exportations diffuses de phosphore, comportant l'aménagement de bandes riveraines et de structures de contrôle du ruissellement de surface, de même qu'une mise à jour des programmes de fertilisation à base d'engrais de ferme. Peu d'études ont documenté l'effet d'actions concertées d'entreprises agricoles sur la qualité de l'eau à l'échelle du bassin-versant. Dans la région états-unienne du bassin-versant de la baie Missisquoi, MEALS (2004) a documenté une amélioration tangible de la qualité de l'eau, dans de petits bassins-versants laitiers du Vermont, suite à l'implantation de bandes riveraines et au retrait de l'accès des animaux au cours d'eau. Au Québec, la haute densité de cours d'eau aménagés à des fins agricoles, de même que le cadastre allongé et étroit des terres, généralement dans le sens du gradient topographique, fait en sorte que la majeure partie du parcellaire en culture ne s'égoutte pas vers les rives de cours d'eau, mais se concentre plutôt vers les

raies de curage et le réseau de fossés (MICHAUD *et al.*, 2004b). La convergence des écoulements par ruissellement de surface réduit par ailleurs considérablement le piégeage des sédiments et nutriments par les bandes riveraines. Les pratiques culturales anti-érosives et les ouvrages de contrôle du ruissellement constituent dès lors des compléments essentiels aux bandes riveraines, en favorisant l'infiltration de l'eau dans la couche arable, le morcellement de la lame de ruissellement, le laminage des crues et la sédimentation en amont du réseau hydrographique.

L'aménagement des terres privilégié par les agriculteurs du bassin-versant du ruisseau au Castor consiste en l'installation systématique de structures de captage à la confluence des fossés avec la branche principale du ruisseau (planche 5). Trente-cinq embouchures de fossés ont ainsi été comblées, pour l'essentiel, des champs localisés en bas de versant et ne disposant pas de drainage souterrain. La stabilisation d'une cinquantaine de foyers d'érosion en rive et l'implantation d'une bande riveraine arbustive sur 4 kilomètres, le long de la branche principale du ruisseau, ont complété l'aménagement hydro-agricole du bassin. La détection de l'effet des interventions agroenvironnementales sur la qualité de l'eau du ruisseau a été confirmée par une analyse de covariance (ANCOVA), comparant les paramètres de qualité de l'eau observés en période de référence (1997-1999) aux deux périodes successives d'évaluation (1999-2001 et 2001-2003), et utilisant le débit du cours d'eau à l'exutoire en co-variable. Malgré une importante variabilité interannuelle dans le comportement hydrologique du bassin-versant, l'analyse de covariance des concentrations en phosphore (figure 6) indique une réduction significative de 25 % des concentrations en P total en période de crues du ruisseau entre la période de référence, précédant les interventions agroenvironnementales et les deux périodes successives d'évaluation. Au plan opérationnel, cette réduction témoigne de l'intérêt de cibler les secteurs les plus hydro-actifs du bassin-versant dans une perspective d'aménagement hydro-agricole du parcellaire. L'influence globale des aménagements en rive et au champ sur la dynamique du ruissellement et la mobilité du P est alors associée au laminage des crues à forte composition de ruissellement de surface et au bris de la connectivité hydrologique entre les champs et le ruisseau. Ces observations confirment le rôle important des structures de contrôle du ruissellement et des zones tampons 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, dans une stratégie intégrée de prévention de la pollution diffuse en milieu agricole.

L'étude des bassins-versants jumeaux du ruisseau Walbridge, affluents du tronçon aval de la rivière aux Brochets (planche 1), s'inscrit en continuité avec l'étude du ruisseau au Castor à l'égard du contrôle hydrologique sur la mobilité

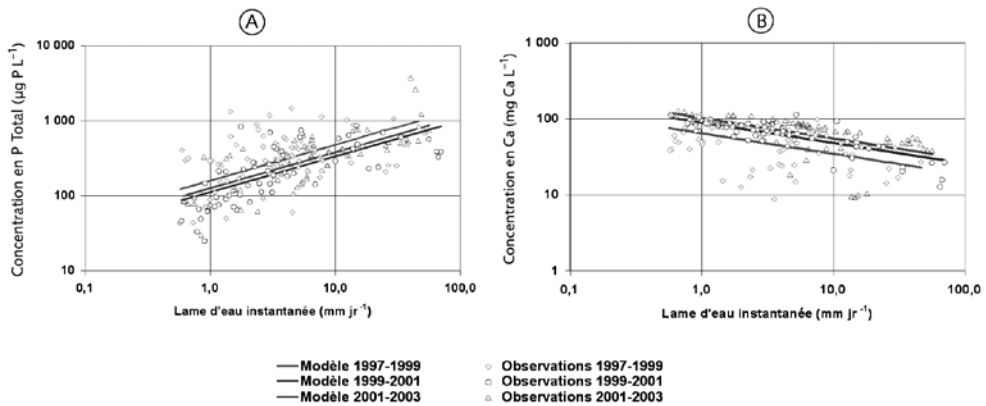


Figure 6 – Modèles d'analyse de covariance des concentrations en phosphore total (A) et en calcium en solution (B) pour les périodes de référence (1997-1999) et d'évaluation (1999-2002 et 2001-2003) utilisant le débit du ruisseau au Castor à l'exutoire en covariable. Les estimateurs de régression de l'analyse de covariance de la concentration en P-total et Ca sont significativement différents au seuil de 5 % ajusté pour des comparaisons multiples. Adapté de MICHAUD *et al.* (2005).

du P. Le développement d'outils de diagnostic de l'égouttement du parcellaire et l'évaluation de la qualité de l'eau en réponse à un aménagement hydro-agricole intégré du parcellaire constituaient les principaux objectifs du projet. Le recours à un dispositif de bassins jumeaux et à deux périodes distinctes de suivi de l'écosystème aquatique (Référence et Évaluation) avait pour but de minimiser l'effet de la variabilité interannuelle des conditions climatiques sur la détection de tendances temporelles sur la qualité de l'eau. La démarche s'appuie ainsi sur le suivi de la qualité de l'eau du ruisseau d'un bassin Témoin (7,9 km²), qui sert de balise pour quantifier la réponse d'un ruisseau drainant un bassin Intervention (6,3 km²), bénéficiant d'une action concertée de ses propriétaires riverains. La période de référence a d'abord permis de contraster et d'établir des relations dans les exportations diffuses de sédiments et de nutriments en provenance des deux bassins (figure 7). La phase d'aménagement du bassin Intervention, initiée au printemps 2003, s'est appuyée sur un diagnostic de haute précision de l'égouttement du parcellaire faisant appel à la télédétection et à la modélisation du relief et des parcours du ruissellement de surface. Les interventions réalisées au cours de l'année 2003 consistent notamment en l'implantation de 1 470 m de bande riveraine arbustive, l'aménagement de 7 000 m de bande riveraine herbacée, le profilage d'une section de 1 340 m de cours d'eau, de même que l'aménagement de diverses infrastructures de gestion de l'eau (stabilisation arbustive de talus, structures de captage, tranchées filtrantes, stabilisation de sorties de drains et déversoirs empierreés). En phase

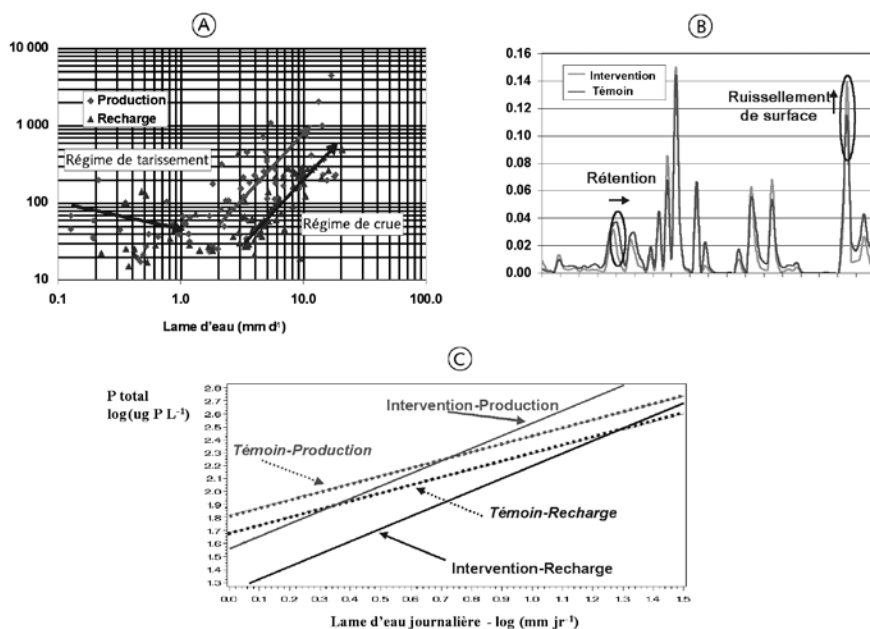


Figure 7 – La relation concentration-débit du bassin Intervention du ruisseau Walbridge (A) traduit l'influence des conditions hydrologiques (Tarisement/Crue) et de la saison (Production/Recharge) sur la mobilité du phosphore. L'influence du paysage sur le fonctionnement hydrologique des bassins Intervention et Témoin explique les différences dans les flux hebdomadaires de P (B) et les relations concentration-débit (C/Q) du P total (C). Les estimateurs de régression de l'analyse de covariance de la concentration en P-total sont significativement différents au seuil de 5 % ajusté pour des comparaisons multiples.

d'évaluation (2004-2006), la reprise du suivi de la qualité de l'eau des bassins Intervention et Témoin a permis de quantifier l'effet des aménagements sur les exportations de sédiments et de nutriments à l'exutoire des bassins.

La figure 7 illustre les concentrations et les flux de P mesurés au cours de la période d'évaluation pour les bassins jumeaux du ruisseau Walbridge. Les flux de P et de MES pondérés pour la superficie du bassin Témoin ($1,33 \text{ kg P} \cdot \text{ha}^{-1}$ et $530 \text{ kg MES} \cdot \text{ha}^{-1}$) demeurent largement supérieurs à ceux observés au bassin Intervention ($1,06 \text{ kg P} \cdot \text{ha}^{-1}$ et $224 \text{ kg MES} \cdot \text{ha}^{-1}$). L'occupation du sol et les systèmes cultureux en place dans les deux bassins n'expliquent pas ces différences, qui sont plutôt attribuées à la nature des sols et la position relative des sous-bassins expérimentaux Témoin et Intervention dans le paysage du bassin Walbridge (30 km^2). La position relativement plus basse du bassin Témoin, dont l'exutoire est localisé 13 m plus bas que le bassin Intervention, favoriserait le maintien de la nappe d'eau plus près de la surface du sol, d'où une vulnérabilité accrue aux processus de ruissellement de surface. Malgré des

flux moindres en MES et en P pour la période à l'étude, le bassin Intervention témoigne cependant de pentes de régression concentration/débit (C/Q) significativement plus élevées ($p < 0,05$) que le bassin Témoin pour les paramètres MES et P total (figure 7). Le relief plus accidenté du bassin Intervention expliquerait cette différence dans les régimes d'exportation de sédiments et de phosphore, en favorisant des concentrations relativement plus élevées de MES et de P lors des événements hydrologiques comportant une forte composante de ruissellement de surface ($> 15 \text{ mm} \cdot \text{jr}^{-1}$). Une implication pratique de ces observations pour l'interprétation de l'influence du paysage de la région sur la mobilité des sédiments et du P est que les conditions qui prévalent au développement de l'état de saturation du sol, notamment une position basse dans le paysage, ont une influence plus marquée sur les exportations que l'inclinaison des pentes. Ces observations sont cohérentes avec la variabilité spatiale des exportations de P décrites pour le bassin du ruisseau au Castor (MICHAUD *et al.*, 2004a) et de la rivière aux Brochets (DESLANDES *et al.*, 2004).

8. Diagnostic de l'égouttement à l'échelle du champ

Le diagnostic détaillé du bassin a permis de déterminer les zones critiques, particulièrement sensibles aux exportations de phosphore vers le réseau hydrographique (DUGUET *et al.*, 2002). Le diagnostic de l'égouttement du parcellaire a d'abord été fondé sur l'acquisition d'images aériennes multispectrales printanières (figure 8A). Acquisées à la mi-mai, quelques jours après une précipitation importante, ces images aériennes d'une résolution d'un mètre au sol se sont avérées particulièrement révélatrices de l'égouttement du parcellaire. Tôt au printemps, le bassin Intervention a aussi profité d'un diagnostic-terrain photographique et géopositionné de l'ensemble des rives de cours d'eau et des confluences de fossés. Les campagnes d'observations ont répertorié et localisé les marques d'érosion des talus (rigoles, effondrements des berges), l'état général du cours d'eau (largeur des bandes riveraines, hauteurs des talus, présence de haies) et les manifestations du ruissellement et de stagnation de l'eau dans les champs. La caractérisation haute précision du relief a complété le diagnostic d'égouttement du parcellaire du bassin Intervention Walbridge. Les modèles numériques de haute précision développés selon la méthode de RIVEST & GOSSELIN (2002) ont permis de cerner avec précision le parcours du ruissellement dans les champs et mis à la disposition des conseillers et propriétaires une série de données techniques préalables à l'aménagement des terres, telles que le volume des dépressions, les points d'entrée du ruissellement dans les fossés et cours d'eau, ou les superficies contributives des micro-bassins. L'intégration des données au sein d'un même atlas électronique convivial a permis

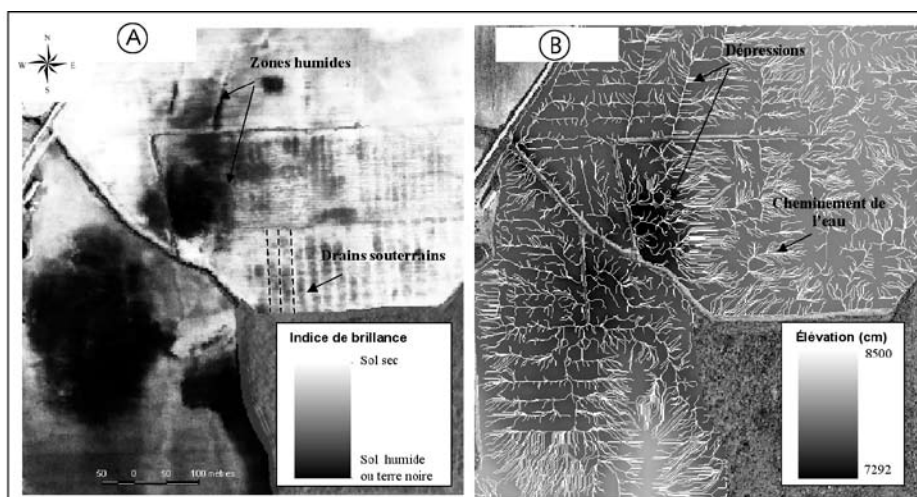


Figure 8 – Image numérique aérienne multispectrale (A), modèle numérique de terrain et parcours du ruissellement (B) de la portion aval du bassin-versant Intervention du ruisseau Walbridge.

d’appréhender globalement la gestion de l’eau à l’échelle du parcellaire. Une forte corrélation a été mise en relief entre le relevé des marques d’érosion, les images aériennes, le modèle numérique de terrain et les parcours du ruissellement (DUGUET *et al.*, 2002). L’utilisation simultanée de ces quatre sources d’information constitue un outil d’un excellent ressort pour diagnostiquer l’état du bassin et les zones d’interventions prioritaires.

La figure 9 illustre les résultats de l’analyse de covariance des concentrations en phosphore total observés à l’exutoire du bassin Intervention, en utilisant les concentrations du bassin Témoin comme covariable. Cette approche permet de détecter si la relation établie entre les concentrations en phosphore des deux bassins en période de référence diffère de la relation établie en période d’évaluation. Compte tenu de la saisonnalité mise en relief précédemment dans la variabilité des concentrations en P de l’eau des deux bassins, la période des échantillonnages des bassins a été prise en compte dans l’analyse statistique de covariance. Dans l’ensemble, les résultats mettent en relief une réponse de la qualité de l’eau à l’aménagement du bassin. Bien que les concentrations en P demeurent relativement plus élevées en saison de production (mai à octobre) qu’en saison hivernale (novembre à avril), l’influence de la période (Référence *vs.* Évaluation) est similaire, en hiver comme en été. Toutefois, la réduction détectée dans les concentrations du bassin intervention n’est pas indépendante des conditions hydrologiques, comme en font foi des pentes significativement

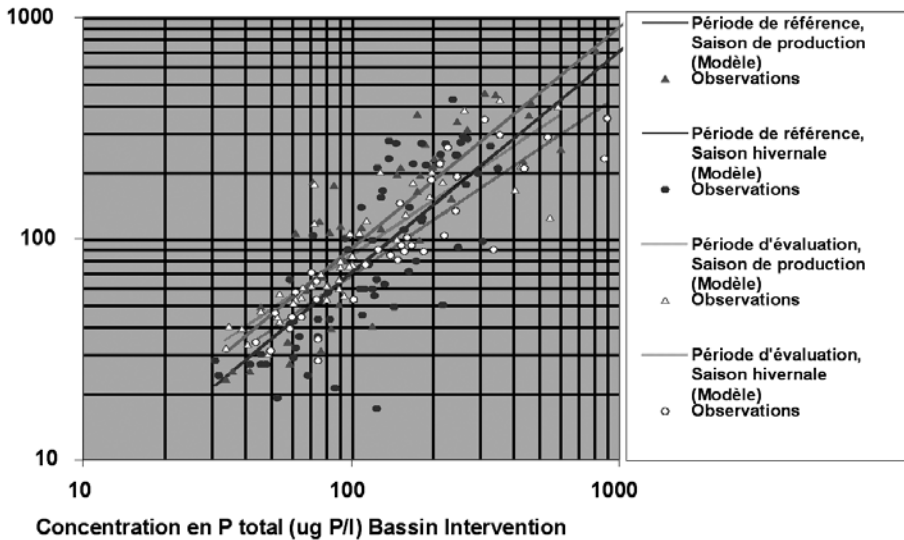


Figure 9 – Analyse de covariance de la concentration en phosphore total observée à l'exutoire du bassin Walbridge Intervention, utilisant la concentration en P total observée au bassin Témoin.

différentes pour les périodes de référence et d'évaluation. L'analyse des résultats indique en effet que les différences significatives ($p < 0,05$) dans la qualité de l'eau ne sont détectées qu'à partir d'un seuil de 200 $\mu\text{g P/l}$ observé à l'exutoire du bassin Témoin. À titre d'exemple, le modèle ANCOVA nous indique qu'à une concentration de référence au bassin témoin de 214 $\mu\text{g P/l}$, la concentration en P du bassin Intervention est passée de 170 $\mu\text{g P/l}$ en période de référence à 141 en période d'évaluation, soit une réduction de 17 % ($p < 0,05$). Compte tenu de la pente de la régression, l'effet de la période tend à s'accroître alors que les crues sont plus chargées en phosphore. À 355 $\mu\text{g P/l}$ au bassin Témoin par exemple, la concentration en P au bassin Intervention passe de 283 $\mu\text{g P/l}$ en période de référence à 213 en période d'évaluation, soit une réduction de 25 % ($p < 0,05$). Une réponse significative de la qualité de l'eau à l'aménagement hydro-agricole du bassin, détectable seulement au moment des crues les plus chargées en phosphore et présumées associées à une importante contribution du ruissellement de surface, est cohérente avec la nature des interventions réalisés dans le bassin-versant. Celles-ci étaient en effet essentiellement ciblées sur l'amélioration de l'égouttement des portions du parcellaire où une vulnérabilité accrue avait été diagnostiquée. Une réduction des exportations de P proportionnellement moins importante que celle estimée dans le dispositif du ruisseau au Castor serait en partie attribuable aux meilleures conditions de

drainage dans le bassin Intervention du ruisseau Walbridge, avantagé par une position plus haute dans le relief et une importante proportion de la superficie en culture sous pratique culturale anti-érosive (44 % en cultures annuelles sans labour) avant le lancement du projet.

9. La modélisation hydrologique : un outil de gestion du territoire

Compte tenu des taux observés de réduction en date en réponse aux actions concertées dans le bassin-versant de la rivière aux Brochets, la faisabilité d'atteindre les objectifs de réduction de charge établis pour les bassins-versants de la baie Missisquoi (41 %) constitue une question des plus pertinentes au plan opérationnel. L'identification de scénarios d'interventions agroenvironnementales susceptibles de ne pas dépasser les charges-cibles de phosphore prévues par l'entente Québec-Vermont a été appuyée par une étude de modélisation hydrologique à l'échelle du bassin-versant de la rivière aux Brochets (630 km²), principal contributeur québécois de phosphore à la baie. Dans un premier temps, les relevés hydrométriques et les suivis de qualité de l'eau des trois bassins expérimentaux Walbridge et au Castor ont été mis à profit dans le calage et la validation de différentes composantes terrestres et aquatiques du modèle. Le modèle hydrologique SWAT (ARNOLD & FOHRER, 2005) a été choisi afin d'appuyer le processus décisionnel des intervenants engagés dans la mise en valeur du bassin-versant en raison de la finesse de ses unités spatiales et de sa capacité à reproduire l'influence des pratiques culturales alternatives en fonction de propriétés physico-chimiques spécifiques du parcellaire agricole. Rappelons que SWAT est un modèle déterministe, destiné à prédire les effets de différents scénarios de gestion du parcellaire sur les transferts hydriques et la mobilité des sédiments et des éléments nutritifs à l'échelle de grands bassins-versants hétérogènes et sur de longues périodes. Dans sa phase terrestre, SWAT simule de façon journalière et continue la régie des sols et des cultures, le développement des plantes, de même que les transferts d'eau, de sédiments et nutriments vers le réseau hydrographique. Ces processus sont simulés à l'échelle de petites unités de territoire (planche 6), les unités homogènes de réponse hydrologique (UHRH). Chaque UHRH se distingue au plan de son activité hydrologique, en raison d'une combinaison unique de propriétés géophysiques et d'utilisation du sol. L'activité hydrologique modélisée au sein de chacune des UHRH est cumulée à l'échelle du sous-bassin-versant, qui se déverse à son tour dans le réseau hydrographique. La phase de transport en rivière du modèle SWAT prend alors le relais pour simuler les processus hydro-dynamiques en ruisseau et en rivière qui influencent les transferts, la rétention et la transformation des sédiments et des nutriments en provenance des sous-bassins, de même que les processus d'érosion des rives

et fonds des cours d'eau. Une description de l'adaptation du modèle aux conditions agroclimatiques et géophysiques de la région à l'étude, ainsi que la validation des résultats de modélisation est détaillée dans DESLANDES *et al.* (2007). En seconde étape, différentes combinaisons de pratiques de gestion bénéfiques ont été modélisées suivant des taux croissants d'adoption et différentes stratégies de ciblage spatial à l'échelle du bassin-versant (MICHAUD *et al.*, 2007).

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

La modélisation des différents scénarios agroenvironnementaux souligne l'importance du ciblage spatial lors de l'implantation de pratiques agricoles et aménagements de conservation (PAAC). Globalement, les résultats de modélisation font valoir qu'une application ciblée des pratiques agricoles et des aménagements hydro-agricoles aux portions du parcellaire en cultures annuelles les plus vulnérables, engendrent des gains environnementaux trois fois plus élevés qu'une implantation aléatoire sur une superficie équivalente. Quant aux efficacités attribuées aux différentes alternatives de gestion du parcellaire, le modèle attribue les plus importantes réductions des exportations de phosphore aux cultures de couverture, suivies de la culture sur résidus (sans labour) puis des aménagements hydro-agricoles. Le potentiel élevé d'atténuation des exportations diffuses de phosphore, attribué par le modèle aux cultures de couverture (74 % en moyenne sur les superficies en cultures annuelles), tient à la combinaison des propriétés anti-érosives de ces cultures et d'un itinéraire technique qui permet l'incorporation des engrais de ferme. Les différentes pratiques de cultures sur résidus réduisent aussi considérablement les exportations de phosphore (46 % en moyenne pour les superficies en cultures annuelles). Leur efficacité relative démontre cependant une variabilité plus importante que les cultures de couverture, en raison de l'influence des propriétés du sol sur les

hauteurs d'eau ruisselée et de l'accumulation des nutriments dans la couche superficielle du sol en interaction avec le ruissellement. En ce qui a trait aux aménagements hydro-agricoles, les efficacités de piégeage des sédiments et du phosphore utilisées dans la modélisation traduisent essentiellement l'influence des structures de contrôle du ruissellement et des bandes riveraines arbustives documentées en bassin expérimental.

Un important constat découlant des efficacités relatives des PAAC modélisées est la priorité à accorder en première ligne à l'implantation de pratiques culturales de conservation des sols au champ. L'aménagement de structures de contrôle du ruissellement remplit un rôle complémentaire et ponctuel au plan spatial dans le traitement des zones particulièrement vulnérables au ruissellement de surface, en raison des attributs du paysage. Dans une perspective opérationnelle, la forte discrimination spatiale de la mobilité du phosphore milite pour un ciblage spatial des interventions agroenvironnementales. Le modèle hydrologique constitue dès lors un outil privilégié pour cibler la mise en œuvre de pratiques culturales et d'aménagements hydro-agricoles, de façon à en optimiser les retombées sur la qualité des eaux de surface. Dans une perspective de planification stratégique d'interventions ciblées sur la qualité de l'eau, la structure de la base de données à référence spatiale développée, combinée aux capacités prédictives de SWAT, constitue un outil privilégié d'accompagnement du milieu agricole et des différents intervenants de la communauté dans l'élaboration et la mise en œuvre concertée de plans d'action réalistes, susceptibles de satisfaire les attentes de l'ensemble de la population.

10. Conclusion

La dynamique du phosphore mise en relief dans le programme de recherche sur le bassin-versant de rivière aux Brochets souligne la nécessaire complémentarité d'interventions à l'égard des sources de phosphore et de la gestion du ruissellement, afin de 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 sa richesse en P et une régie 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.

L'encadrement financier et réglementaire de la production agricole en matière agroenvironnementale au Québec a essentiellement soutenu à ce jour des interventions à l'égard de la gestion des sources de phosphore, notamment l'équilibre des bilans d'apport ou les structures d'entreposage des engrais de ferme. Dans

les bassins-versants agricoles où la récupération des eaux de surface commande la réduction des charges agricoles diffuses de phosphore, l'amélioration de la qualité de l'eau ne s'obtiendra vraisemblablement qu'au prix d'investissements complémentaires dans l'aménagement hydro-agricole du parcellaire et l'accroissement des superficies sous pratiques culturales anti-érosives. Le système de transfert du phosphore décrit dans le bassin-versant de rivière aux Brochets met en relief une distribution temporelle des exportations diffuses de P, qui se concentrent dans les crues de la fin de l'hiver et tôt au printemps, plusieurs semaines précédant 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 ces épisodes printaniers, par des pratiques culturales et des aménagements hydro-agricoles qui laminent la pointe de crue, favorisent l'infiltration dans le sol et l'évacuation par le réseau de drainage souterrain, provoquent la sédimentation dans les zones de concentration du ruissellement de surface ou interceptent les écoulements latéraux et de surface dans des lisières riveraines.

En raison de l'origine diffuse des sources de contamination en milieu agricole, retenons enfin que le bassin-versant constitue l'unité naturelle d'analyse et d'intervention agroenvironnementale. Le constat de la difficile réversibilité des exportations de P de sources agricoles diffuses milite pour des échelles d'intervention d'envergure réaliste et une stratégie préventive dans des bassins-versants ciblés. 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. 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 l'enjeu environnemental qui motive l'intervention, ce sont l'engagement et la responsabilisation du milieu, la concertation des intervenants et la complémentarité des encadrements réglementaire, financier et technique de la production qui demeurent 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'agir local » prennent tout leur sens.

Références bibliographiques

- ARNOLD J.G. & FOHRER N., 2005.– SWAT2000 : Current Capabilities and Research Opportunities in Applied Watershed Modelling. *Hydrol. Process.*, n° 19 (3), p. 563-572.
- BEAUCHEMIN S., SIMARD R.R. & CLUIS D., 1998.– Forms and concentration of phosphorus in drainage water of twenty-seven tile-drained soils. *J. Environ. Qual.*, n° 27, p. 721-728.

- BLAIS S., 2002.– La problématique des cyanobactéries (algues bleu-vert) à la baie Missisquoi en 2001. *Agrosol*, n° 13(2), p. 103-110.
- BREUWSMA A. & SILVA S., 1992.– *Phosphorus fertilisation and environmental effects in the Netherlands and the Po Region (Italy)*. Agr. Res. Dep. Rep 57, DLO, The Winard Staring Center for Integrated Land, Soil and Water Research, Wageningen, The Netherlands.
- CÔTÉ D., THI SEN TRAN & N'DADYEGAMIYE A., 1996.– Efficacité fertilisante du lisier de porc épandu en post-levée du maïs. *Agrosol*, n° 9(1), p. 21-30.
- CÔTÉ D., MICHAUD A.R., THI SEN TRAN & BERNARD C., 1999.– Slurry side-dressing and top-dressing can improve soil and water quality in the lake Champlain basin. In : *Lake Champlain in transition : from research toward restoration* (T.O. Manley & P.L. Manley, eds.). Water sciences and application, n° 1, p. 225-238. American Geophysical Union, Washington.
- DESLANDES J., MICHAUD A. & BONN F., 2002.– Développement et validation des indicateurs agroenvironnementaux associés aux pertes diffuses de phosphore dans le bassin-versant de la rivière aux Brochets. *Agrosol*, n° 13 (2), p. 111-123. <http://www.irda.qc.ca/publications/1.htm>
- DESLANDES J., MICHAUD A.R. & BONN F., 2004.– Use of GIS and remote sensing to develop indicators of phosphorus non-point source pollution in the Pike river basin. In : *Lake Champlain : partnerships and research in the new millennium* (T.O. Manley, P.L. Manley & T.B. Mihuc eds), p. 271-290. Kluwer Academic/Plenum pub., New York NY.
- DESLANDES J., BEAUDIN I., MICHAUD A., BONN F. & MADRAMOOTOO C.A., 2007.– Influence of landscape and cropping system on phosphorus mobility within the Pike River watershed of Southwestern Quebec. Model parametrization and validation. *Canadian Water Resources Journal*, n° 32 (1), p. 21-42.
- DORIOZ J.M. & FERHI A., 1993.– Non-point pollution and management of agricultural areas : phosphorus and nitrogen transfer in an agricultural watershed. *Water Res.*, n° 28-2, p. 395-410.
- DUGUET F., MICHAUD A.R., DESLANDES J., RIVEST R. & LAUZIER R., 2002.– Gestion du ruissellement et de l'érosion pour limiter les pertes en phosphore en bassin-versant agricole. *Agrosol*, n° 13 (2), p. 14-148. <http://www.irda.qc.ca/publications/1.htm>
- DUY T.N., LAM P.K.S., SHAW G.R. & CONNELL D.W., 2000.– Toxicology and risk assessment of freshwater cyanobacterial (blue-green algal) toxins in water. *Rev. Environ. Contam. Toxicol.*, n° 163, p. 113-186.

- ENRIGHT P. & MADRAMOOTOO C.A., 2004a.– Phosphorus losses in surface runoff and subsurface drainage waters on two agricultural fields in Quebec. *In : Drainage VIII – Proceedings of the Eight International Drainage Symposium* (R.A. Cooke, ed.), p. 160-170. ASAE, St. Joseph, MI, USA.
- GIROUX M. & TRAN T.S., 1996.– Critères agronomiques et environnementaux liés à la disponibilité, la solubilité et la saturation en phosphore des sols agricoles du Québec. *Agrosol*, n° 9(2), p. 51-57.
- GIROUX M. & ROYER R., 2006a.– *Influence des modes de fertilisation sur les pertes d'éléments nutritifs dans les drains agricoles sous prairie et orge grainée*. Observatoire de la qualité des sols du Québec, Site de Saint-Lambert-de-Lauzon, Cahier n° 5, Institut de recherche et de développement en agroenvironnement, 57 p.
- GIROUX M. & ROYER R., 2006b.– *Influence des modes de fertilisation sur les pertes d'éléments nutritifs dans les drains agricoles sous le maïs-grain, l'orge et le canola*. Observatoire de la qualité des sols du Québec, Site de Saint-Lambert-de-Lauzon, Cahier n° 5, Institut de recherche et de développement en agroenvironnement, 84 p.
- GIROUX M. & ROYER R., 2007.– Effet à long terme des applications de phosphore sur les rendements, l'évolution des teneurs, de la saturation et de la solubilité du P dans deux sols très riches. *Agrosolutions*, n° 18(1), p. 17-24. <http://www.irda.qc.ca/publications/1.htm>
- GIROUX M., DUCHEMIN M., MICHAUD A.R., BEAUDIN I., LANDRY C., ENRIGHT P., MADRAMOOTOO C.A. & LAVERDIÈRE M.R., 2008.– Relation entre les concentrations en phosphore particulaire et dissous dans les eaux de ruissellement et les teneurs en P total et assimilable des sols pour différentes cultures. *Agrosolutions*, n° 19(1), p. 4-14. <http://www.irda.qc.ca/publications/1.htm>
- GOUVERNEMENT DU QUÉBEC, 2002.– *Règlement sur les exploitations agricoles en bref, un gain durable pour l'environnement*. Québec, Canada, 40 p.
- GOUVERNEMENT DU QUÉBEC, 2007.– *Liste régionale des mises en garde et des avis de santé publique reliés aux lacs et rivières affectés par les algues bleu-vert en 2007*. Ministère de la Santé et des Services sociaux. http://www.msss.gouv.qc.ca/sujets/santepub/environnement/index.php?repertoire_lacs_rivieres
- HEGMAN W., WANG D. & BORER X.C., 1999.– *Estimation of Lake Champlain basin wide non-point source phosphorus export*. Technical report n° 31. Lake Champlain Basin Program publication series.

- JAMIESON A., MADRAMOOTOO C. & ENRIGHT P., 2002.– Phosphorus losses in surface and subsurface runoff from a snowmelt event on an agricultural field in Quebec. *Can. Biosystems Eng.*, n° 45, p. 1.1-1.7.
- KHIARI L., PARENT L.E., PELLERIN A., ALIMI A.R.A., TREMBLAY C., SIMARD R.R. & FORTIN J., 2000.– An Agri-Environmental Phosphorus Saturation Index for Acid Coarse-Textured Soils. *J. Environ. Qual.*, n° 29, p. 1561-1567.
- LANDRY C., 2007.– *Impact à long terme de l'application de lisier de porc sur les flux de nutriments du sol*. Fiche technique. <http://www.irda.qc.ca/resultats/publications/74.html>.
- MEALS D.W., 2004.– Water Quality Improvements Following Riparian Restoration in Two Vermont Agricultural Watersheds. *In : Lake Champlain : Partnerships and Research in the New Millennium* (T.O. Manley, P.L. Manley & T.B. Mihuc, eds.), p. 81-95. Kluwer Academic/Plenum Pub., New York, NY.
- MEDALIE L. & SMELTZER E., 2004.– Status and trends of phosphorus in Lake Champlain and its tributaries, 1990-2000. *In : Lake Champlain : Partnership and Research in the New Millennium* (T.O. Manley, P.L. Manley & T.B. Mihuc, eds.), p. 191-219. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York.
- MICHAUD A.R. & LAVERDIÈRE M.R., 2004.– Cropping, soil type and manure application effects on phosphorus export and bioavailability. *Can. J. Soil Sci.*, n° 84(3), p. 295-305. *Erratum* n° 84(4), p. 525.
- MICHAUD A.R., LAVERDIÈRE M.R. & LAUZIER R., 2004a.– Temporal and spatial variability in non-point source phosphorus in relation to agricultural production and terrestrial indicators : the Beaver brook case study, Pike river basin, Quebec. *In : Lake Champlain : Partnership and Research in the New Millennium* (T.O. Manley, P.L. Manley & T.B. Mihuc, eds.), p. 97-121. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York NY.
- MICHAUD A.R., DESLANDES J. & DESJARDINS J., 2004b.– *Réseau d'actions concertées en bassins-versants agricoles : ruisseau Walbridge, ruisseau Fourchette et rivière Laguerre. Phase I (calibrage) et II (aménagement)*. Rapport final. Fonds d'action québécois pour le développement durable, 106 p. [http://www.agrireseau.qc.ca/agroenvironnement/documents/Rapport %20final.pdf](http://www.agrireseau.qc.ca/agroenvironnement/documents/Rapport%20final.pdf)
- MICHAUD A.R., LAUZIER R. & LAVERDIÈRE M.R., 2005.– Mobilité du phosphore et intervention agroenvironnementale en bassin-versant agricole : Étude de cas du Ruisseau au Castor, tributaire de la Rivière aux Brochets, Québec. *Agrosol*, n° 16(1), p. 47-59. <http://www.irda.qc.ca/publications/1.htm>

- MICHAUD A.R., BEAUDIN I., DESLANDES J., BONN F. & MADRAMOOTOO C.A., 2007.– SWAT-predicted influence of different landscape and cropping systems alterations on phosphorus mobility within the Pike River watershed of South-western Quebec. *Can. J. Soil Sci.*, n° 87(3), p. 329-344.
- PARENT L.E., PELLERIN A. & KHIARI L., 2002.– Le flux et la dynamique du phosphore dans les sols agricoles québécois. In : *Colloque sur le phosphore : Une gestion éclairée*, Québec, nov. 2002, 27 p. Ordre des agronomes du Québec, Drummondville.
- PELLERIN A., PARENT L.E., FORTIN J., TREMBLAY C., KHIARI L. & GIROUX M., 2005.– Environmental Mehlich-3 soil phosphorus saturation indices for Quebec acid to near neutral mineral soils varying in texture and genesis. *Can. J. Soil Sci.*, n° 86, p. 711-723.
- QUÉBEC & VERMONT, 2002.– *Entente entre le gouvernement du Québec et le gouvernement de l'État du Vermont concernant la réduction du phosphore dans la baie Missisquoi*. Ministère de l'Environnement, Direction régionale de la Montérégie, Québec, 4 p.
- RIVEST R. & LEDUC P., 1997.– *Évaluation du risque de pollution diffuse associée au phosphore des sols classés excessivement riches*. Rapport final, Société d'agriculture de Saint-Hyacinthe et MAPAQ, ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Bureau de renseignements agricoles de St-Hyacinthe, 59 p.
- RIVEST R. & GOSSELIN S., 2002.– Mesures de précision du relief pour la gestion du sol et de l'eau. In : *Lake Champlain in the new millennium*, 2002 Spring Symposium, p. 46-47. Lake Champlain Research Consortium, Saint-Jean-sur-Richelieu, Québec.
- SARR J.-B., GIROUX M., MICHAUD A. & AUROUSSEAU P., 2007.– Comparaison de diverses méthodes d'évaluation de la saturation & de la solubilité du phosphore dans des sols de Bretagne (France) à des fins agroenvironnementales. *Agrosolutions*, n° 18(1), p. 4-11. <http://www.irda.qc.ca/publications/1.htm>
- SIMARD R.R., CLUIS D., GANGBAZO G. & BEAUCHEMIN S., 1995.– Phosphorus status of forest and agricultural soils from a watershed of high animal density. *J. Environ. Qual.*, n° 24(5), p. 1010-1017.
- VERTÈS F., LEMERCIER B. & MOREL C., 2005.– Evolution of phosphorus status during 30 years in soils receiving high amount of slurry : description of the temporal trend in a farm monitoring network. In : *Présentation Colloque Porcherie Verte*, Mai 2005, INRA UMR SAS. Chambre d'agriculture du Finistère, p. 77-78.

