

Les outils de caractérisation
du risque de perte de PHOSPHORE
vers les eaux de surface

Avertissement

Au moment de sa rédaction, l'information contenue dans ce document était jugée représentative des connaissances sur la mobilité du phosphore et son utilisation demeure sous l'entière responsabilité du lecteur.

Cette fiche technique fait partie d'une série de 4 fiches techniques sur la mobilité du phosphore réalisées conjointement par le Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ), l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA) et le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ).

Cette série de fiches techniques constitue un des éléments du projet « Gestion du risque associé aux facteurs sources et transport du phosphore des sols cultivés au Québec » réalisé dans le cadre du programme « Initiative d'appui aux conseillers agricoles » selon les termes de l'entente Canada-Québec sur le Renouveau du Cadre stratégique agricole.



Canada



Pour information :

Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec
2875, boulevard Laurier, 9^e étage
Québec (Québec) G1V 2M2

Téléphone : 418 523-5411

Télécopieur : 418 644-5944

Courriel : client@craaq.qc.ca

Site Internet : www.craaq.qc.ca

Publication EVC 021

© Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec, 2008

Rédaction

Isabelle Beaudin, géomaticienne, professionnelle de recherche. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA), Québec

Pierre Beaudet, agronome, ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ), Québec

Aubert Michaud, chercheur en conservation des sols et de l'eau, Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA), Québec

Marcel Giroux, agronome, chercheur en chimie et fertilité des sols, Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA), Québec

Révision

Yveline Martin, agronome, répondante en agroenvironnement et chargée de projets, Ordre des agronomes du Québec, Montréal

Annie Pellerin, agronome, ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ), Saint-Rémi

Éric van Bochove, Ph.D., Agriculture et Agroalimentaire Canada, Québec

TABLE DES MATIÈRES

Introduction	1
Les approches agronomiques	1
Les approches de modélisation.....	2
Les approches d'indexation des risques	3
Les outils de gestion à référence spatiale ou la géomatique.....	5
Autres outils	8
Références.....	9
Glossaire	12

Introduction

Le risque de transfert du phosphore (P) vers les eaux de surface peut être évalué de plusieurs façons avec des outils dont la complexité et la précision varient grandement. La façon la plus simple de procéder consiste à effectuer des analyses de sol, ce qui permet d'estimer la quantité de phosphore disponible pour la croissance des plantes et le degré de saturation des sols en phosphore. Cependant, le portrait qui en résulte ne tient pas compte du risque relié au transport du phosphore. À l'opposé, la modélisation hydrologique, qui reproduit le cycle de l'eau et le transport du phosphore, nécessite une quantité importante d'informations concernant l'environnement géophysique et les pratiques de gestion agricole. Entre ces deux extrêmes, l'utilisation de la géomatique et l'approche d'indexation des risques de perte de phosphore offrent deux moyens de quantifier et de qualifier les risques de perte de phosphore vers le milieu aquatique.

Les approches agronomiques

Au Québec, la méthode d'extraction Mehlich-3 (M-3) est utilisée pour évaluer la disponibilité du phosphore pour les cultures. Trois indicateurs sont utilisés, soit la richesse du sol exprimée en phosphore Mehlich-3 (P_{M-3}) et les indices de saturation en phosphore, exprimés par le ratio P/Al Mehlich-3 et P/(Al+Fe) M-3. La réponse des cultures à l'engrais phosphaté est calibrée en fonction des teneurs ou de la saturation du sol en P_{M-3} à partir de résultats obtenus à la suite d'essais en parcelles expérimentales. La richesse du sol exprimée en P_{M-3} est le critère agronomique de référence dans la majorité des grilles de fertilisation publiées par le CRAAQ. Plus récemment, l'indice de saturation des sols a aussi été intégré aux grilles du maïs (grain et ensilage), de la pomme de terre et de la canneberge (CRAAQ, 2003). Cet indicateur se limite cependant aux sols minéraux. Le Règlement sur les exploitations agricoles (REA), qui vise à améliorer la qualité des eaux de surface et souterraines en gérant les engrais de ferme et autres matières fertilisantes de manière agroenvironnementale, fait aussi référence aux teneurs et à la saturation en P_{M-3} pour l'élaboration du Plan agroenvironnemental de fertilisation (PAEF).

Plusieurs études québécoises (Guérin *et al.*, 2007; Pellerin *et al.*, 2006a, b; Marchand, 2004; Khiari *et al.*, 2000; Giroux et Tran, 1996) ont établi un lien entre l'augmentation de la saturation en P/Al ou P/(Al+Fe) Mehlich-3 et l'accroissement de la quantité de phosphore disponible dans la solution du sol et, par conséquent, l'accroissement du risque relié aux exportations de phosphore des sols vers le milieu aquatique. L'indice de saturation des sols en phosphore est particulièrement intéressant, car il sert à la fois à identifier le seuil agronomique permettant d'évaluer la probabilité de réponse des cultures à l'application d'engrais et le seuil environnemental au delà duquel un sol devrait cesser d'être enrichi pour maintenir le risque environnemental à un niveau raisonnable.

Bien sûr, l'établissement de seuils critiques en fonction des cultures et des types de sols fournit de l'information importante concernant les sources de phosphore potentiellement mobilisable. Toutefois, ces seuils ne tiennent pas compte du transport du phosphore de la

solution du sol vers les plans d'eau, ni du transport subséquent vers l'exutoire des bassins versants. Leur intégration dans une approche plus globale, comme la modélisation hydrologique ou l'indexation des risques, est donc souhaitable.

Les approches de modélisation

Afin de mieux évaluer les risques associés aux exportations de phosphore ou de tout autre élément vers les eaux de surface, une bonne compréhension de la complexité des processus qui régissent le transport de l'eau, des sédiments, des nutriments et des polluants est nécessaire. Les modèles hydrologiques, qui sont formés d'un amalgame de formules mathématiques reproduisant les différentes dynamiques physiques observées dans l'environnement, sont des outils très utiles à cet égard.

L'échelle spatiale de travail de ces modèles varie selon l'application à laquelle ils sont destinés. Certains modèles effectuent leurs calculs en considérant une colonne de sol alors que d'autres le font à l'échelle du champ agricole ou du bassin versant. Alors que certains modèles, comme l'USLE et ses dérivés (Wall *et al.*, 2002; Renard *et al.* 1996), ne simulent qu'un seul processus (érosion), d'autres, comme SWAT (Neitsch *et al.*, 2002), AGNPS (Perrone, 1997) ou GIBSI (Rousseau *et al.*, 2002), intègrent plusieurs processus (climat, hydrologie, érosion, croissance des plantes, transport des nutriments, etc.) afin de mieux reproduire les dynamiques des écosystèmes.

Les changements technologiques, et particulièrement la performance accrue des systèmes informatiques, ainsi que l'approfondissement des connaissances et des problématiques agroenvironnementales favorisent maintenant l'utilisation de modèles plus complexes, fonctionnant à des échelles spatiales variables. Certains de ces modèles ont d'ailleurs été développés afin de prédire les impacts des pratiques agricoles sur les transferts hydriques et les quantités de sédiments, d'éléments nutritifs et de pesticides à l'échelle de grands bassins versants hétérogènes et sur de longues périodes. Au Québec, le modèle SWAT a été utilisé pour simuler la dynamique de la mobilité du phosphore dans les sols et l'écosystème aquatique, de même que pour prédire le devenir du phosphore en réponse à différents scénarios d'interventions agroenvironnementales (Beaudin *et al.*, 2006; Michaud *et al.*, 2006) dans le bassin versant de la rivière aux Brochets, un tributaire important de la baie Missisquoi.

Toutefois, l'utilité des modèles hydrologiques comme outil décisionnel face aux risques d'exportation de phosphore des terres vers le milieu aquatique demeure limitée et n'est certainement pas applicable à l'ensemble du territoire agricole québécois. Leur grande complexité et l'importante quantité de données nécessaire à leur fonctionnement demeurent un obstacle important. En effet, ces modèles peuvent exiger l'intégration d'informations touchant à la climatologie, à la topographie, à l'hydrographie, aux sols et à leurs propriétés, aux pratiques culturales et à la gestion des fertilisants. De plus, l'intégration des données, le calage et la validation des résultats issus de ces modèles sont souvent des processus longs et complexes qui doivent être accomplis par un personnel qualifié.

Les approches d'indexation des risques

Moins complexes que les modèles hydrologiques et de qualité de l'eau, les méthodes d'indexation des risques d'exportation du phosphore fournissent tout de même une information qualitative pertinente pour l'interprétation de la vulnérabilité d'un territoire agricole aux processus de contamination diffuse des eaux de surface par le phosphore.

Les indices de risque d'exportation du phosphore (IRP ou P-Index en anglais) peuvent être utilisés à l'échelle du champ ou d'un territoire. L'IRP, originellement développé par Lemunyon et Gilbert en 1993, et dont le but est d'identifier la vulnérabilité des champs agricoles aux exportations de phosphore, a été repris par presque tous les États des États-Unis et par plusieurs provinces au Canada. L'IRP fournit aux intervenants en agriculture et agroenvironnement un outil pour identifier les champs plus vulnérables aux exportations de phosphore et les pratiques agricoles qui augmentent le risque, tout en laissant aux entreprises agricoles de la flexibilité dans l'élaboration des mesures correctives. L'avantage de l'IRP, comparativement aux modèles déterministes qui reproduisent les processus physiques complexes, est qu'il est calculé à partir de données plus aisément disponibles et qu'il est adapté pour une utilisation à l'échelle du champ.

Depuis sa création, l'IRP de Lemunyon et Gilbert a subi plusieurs modifications afin de l'ajuster aux conditions régionales. Il existe donc une multitude d'IRP adaptés à presque chaque État américain, à plusieurs provinces canadiennes et à certains pays européens. Toutes les variantes de l'IRP sont basées sur une matrice regroupant des facteurs *source* et *transport* du phosphore caractérisant le champ. Certaines y ajoutent des facteurs *bassin* afin de tenir compte des aménagements hydroagricoles en place et de la connectivité des champs agricoles aux cours d'eau. Les facteurs *source* comprennent généralement la teneur en phosphore du sol et les taux et méthodes d'application des fertilisants minéraux et organiques. Les facteurs *transport* incluent l'érosion, le ruissellement et l'écoulement souterrain. La connectivité des champs agricoles aux cours d'eau, les distances des champs par rapport aux cours d'eau et la priorité donnée à certains bassins versants font habituellement partie des IRP qui incorporent des facteurs *bassin*. Le tableau 1 présente quelques exemples supplémentaires de facteurs considérés dans les IRP recensés par Beaudin (2006).

Tableau 1. Facteurs *source*, *transport* et *bassin* recensés dans la littérature

Source	Transport	Bassin
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Teneur ou saturation en phosphore des sols ▪ Aluminium réactif du sol ▪ Bilan phosphore à la surface du sol (P excédentaire) ▪ Doses et méthodes d'application des fertilisants ▪ Présence des résidus de culture 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Présence de drains souterrains et leur écartement ▪ Profondeur de la nappe phréatique ▪ Classes de drainage des sols tirés de cartes pédologiques ▪ Texture des sols ▪ Présence de zones humides ▪ Fréquence des inondations ▪ Périodes de gel et de dégel ▪ Pluviométrie 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Distance des champs par rapport aux cours d'eau ▪ Prise en compte de pratiques de gestion bénéfiques (bandes enherbées, avaloirs, voies d'eau engazonnées, etc.) ▪ Présence et largeur des bandes riveraines ▪ Catégorie de sensibilité des bassins versants ou plans d'eau (définie par les instances gouvernementales) ▪ Distance d'un habitat critique

Chacun de ces facteurs est généralement classé selon une échelle de risque, comportant communément 5 classes de risque, allant de négligeable à très élevé. Comme ces facteurs n'affectent pas l'exportation de phosphore de la même manière, un coefficient de pondération est attribué à chacun d'eux. La classe de risque de chacun des facteurs est ensuite multipliée par ce coefficient et les valeurs qui en résultent sont additionnées afin d'obtenir le niveau de risque de perte de phosphore, soit l'IRP. Il est à noter qu'une variante additionne les facteurs *transport* et *source* de façon indépendante et les résultats sont ensuite multipliés entre eux. Généralement, la valeur finale de l'indice est redécomposée en 5 classes de risque allant de négligeable à très élevé.

Les IRP de 12 États américains et celui de la Norvège ont une structure multiplicative (facteurs *source* x facteurs *transport*) alors que les IRP canadiens (Beaudet *et al.*, 1998; van Bochove *et al.*, 2005) sont de forme additive. Le nouvel indicateur de risque de contamination de l'eau par le phosphore à l'échelle des bassins versants du Canada, prévu pour 2008, sera multiplicatif (van Bochove *et al.*, 2006). Au moins deux IRP ont aussi été modifiés afin de convertir les classes de risque à 5 niveaux en valeurs continues et ainsi éviter qu'une augmentation minimale d'un facteur n'entraîne un changement de catégorie. De plus, certains États américains, tels l'Iowa et le Wisconsin, ont développé des IRP dont le résultat final est quantitatif. Ces IRP permettent de prédire les exportations de phosphore perdu par ruissellement, par érosion et dans les drains agricoles ainsi que les pertes événementielles liées aux apports d'engrais. Par conséquent, il existe un grand nombre d'indices de risque de perte du phosphore adaptés aux conditions locales et faisant intervenir une multitude de facteurs *source*, *transport* et *bassin*.

Ces outils, bien que relativement simples et logiques quant aux critères utilisés, soulèvent tout de même plusieurs questions, dont la principale est la relation réelle entre les valeurs des IRP qualitatifs et les charges réelles de phosphore exportées. Afin de minimiser l'incertitude du résultat, une validation des IRP qualitatifs devrait donc être effectuée par un diagnostic basé sur une connaissance réelle du champ concerné avant de l'utiliser dans la gestion des champs agricoles. Toutefois, la compréhension actuelle des relations sol-plante-eau rend possible la quantification des exportations de phosphore à l'aide d'IRP quantitatifs qui évaluent directement les pertes de phosphore et leur provenance. Au Québec, dans le cadre du programme « Initiative d'appui aux conseillers agricoles », le projet sur la *Gestion du risque associé aux facteurs sources et transport du phosphore des sols cultivés aux Québec* (Beaudin *et al.*, 2007) vise justement à créer un IRP qui permettra de quantifier les exportations de phosphore, leur provenance (ruissellement, érosion, drains) et leur forme (particulaire, soluble).

Les outils de gestion à référence spatiale ou la géomatique

La géomatique est une discipline qui gère de façon informatique des données géographiques en faisant appel aux sciences et aux technologies reliées à leur acquisition, leur stockage, leur traitement et leur diffusion. Cette discipline en englobe plusieurs autres, dont la topométrie, la cartographie, la télédétection, la photogrammétrie, la géodésie et l'informatique (OQLF, 2004). La géomatique demeure avant tout au service d'autres disciplines et les applications géomatiques sont nombreuses. En agriculture, la connaissance et la compréhension de la variabilité spatiale des conditions qui prévalent à l'échelle du territoire, ainsi qu'à l'intérieur des champs, sont primordiales, car elles permettent de contrôler de façon plus précise la gestion des sols et les intrants. Par exemple, dans le contexte de l'agriculture de précision, le rôle de la géomatique est d'offrir aux producteurs la possibilité de suivre l'évolution de leurs terres dans le temps et dans l'espace (variabilité spatiale) en introduisant des méthodes, des techniques et des outils de collecte, d'analyse et de gestion des données. Pour ce faire, la géomatique doit fournir des outils de positionnement précis, procurer des outils de gestion des données à référence spatiale en plus de produire et gérer l'information géographique (cartes, tableaux, graphiques) (Boisvert *et al.*, 2003).

La géodésie et les systèmes de positionnement globaux (GPS) permettent de déterminer une position (latitude, longitude et altitude) et sont donc très utiles pour géoréférencer, c'est-à-dire positionner par rapport à un système de référence géodésique, les observations recueillies aux champs ou les données obtenues par télédétection. Les applications de la technologie GPS au Québec sont nombreuses. Par exemple, depuis plusieurs années, l'équipe du MAPAQ en Montérégie-Est offre aux agriculteurs un service de microtopographie (Rivest, 2005) qui permet de mieux niveler les terres et de contrôler la gestion de l'eau dans les champs et à leurs sorties. Cette technique est particulièrement utile dans les champs où la pente est très faible ou sur les terres à pentes multiples.

Depuis quelques années, des modèles numériques de terrain (MNT) de haute précision sont obtenus à partir de la technologie GPS, et aussi à l'aide du lidar. Le lidar est un appareil généralement monté sur un avion, qui émet un faisceau lumineux (laser). En connaissant l'altitude de l'avion, la vitesse de propagation de la lumière et le temps de retour du signal,

il est possible de connaître l'élévation des surfaces terrestres. À partir de ces élévations ponctuelles, un MNT peut être produit (Figure 1). D'une précision altimétrique centimétrique (5 à 15 cm), les MNT lidar et GPS permettent de déterminer le parcours de l'eau, de calculer les superficies contributives au débit des fossés et des cours d'eau, ou encore de calculer les dimensions des zones tampons ou des fossés avaloirs. De plus, une multitude d'informations, telles que les rendements des cultures et les caractéristiques des échantillons de sol comme la teneur ou la saturation en phosphore, peuvent aussi être attachées au positionnement GPS. Ces informations peuvent ensuite être traitées dans un système d'information géographique (SIG) afin d'obtenir, par dérivation, des informations complémentaires, ou tout simplement être cartographiées et visualisées.

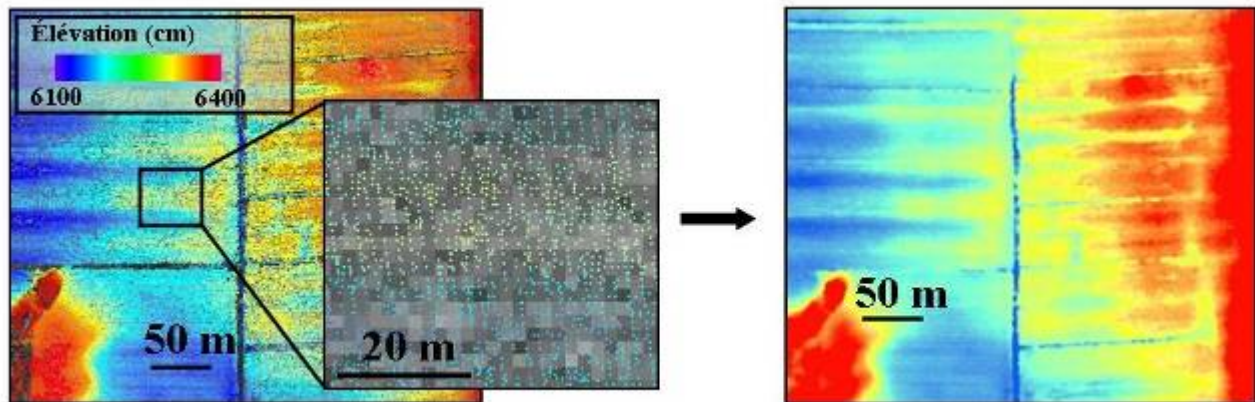


Figure 1. Données lidar brutes et MNT produit à partir des données Lidar

La télédétection permet elle aussi de recueillir, au moyen de mesures prises à distance, un grand nombre d'informations relatives à la variabilité spatiale et temporelle des caractéristiques physiques et biologiques de la surface terrestre. Les mesures sont effectuées à partir de capteurs mobiles ou montés sur de la machinerie, ou encore à partir de capteurs placés à bord d'avions ou de satellites. L'information peut être captée par des films photographiques (noir et blanc, infrarouge), ou encore par des capteurs d'ondes qui transforment le signal reçu en code numérique. Celui-ci est ensuite transformé, rectifié géométriquement et géoréférencé, puis distribué sous forme d'images numériques. Le choix du type d'image et de la résolution spatiale et spectrale dépend du type d'application visé. Par exemple, l'utilisation d'images aériennes multispectrales printanières et estivales (Figure 2), combinée avec le relief de précision, les propriétés des sols et les rendements, peut offrir un support à la gestion localisée des sols et des cultures.

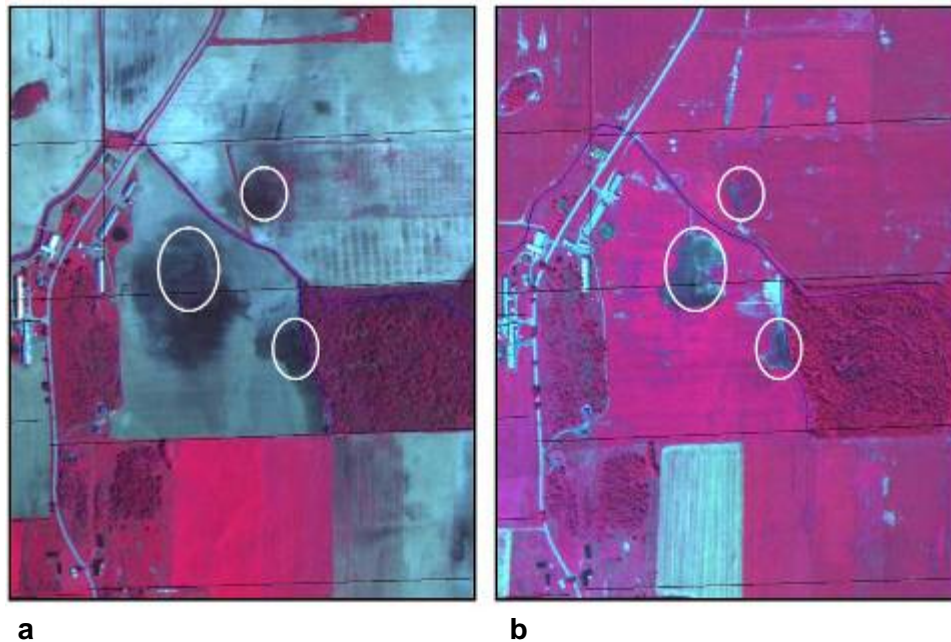


Figure 2. Images multispectrales printanière (a) et estivale (b)

La collecte d'information à l'aide des diverses techniques géomatiques pour la gestion agricole génère cependant une grande quantité de données. La gestion de toutes ces sources et tous ces types de données s'effectue grâce aux SIG. Ces derniers sont des systèmes informatiques spécialement conçus pour gérer les données à caractère spatial ainsi que leurs attributs et métadonnées. Les données sont généralement représentées sous forme ponctuelle (points), vectorielle (lignes), matricielle (pixels) ou tabulaire (tableaux). En plus de stocker les diverses sources d'informations, les SIG permettent aussi d'effectuer diverses analyses spatiales et de cartographier les résultats.

Dans un contexte de gestion du risque de perte de phosphore vers le milieu aquatique, la géomatique est donc un outil très approprié. Même si elle n'évalue pas directement les exportations de phosphore, elle permet de circonscrire certains facteurs qui influencent les pertes de phosphore. Par exemple, puisqu'une majeure partie des exportations de phosphore des champs agricoles se produit sous forme de phosphore attaché aux particules de sol, bien définir les taux d'érosion des sols permet de mieux évaluer les pertes de phosphore particulaire. Dans cette optique, plusieurs aspects de la géomatique entrent en ligne de compte. D'abord, un MNT de haute précision permet de mieux évaluer les pentes et les longueurs de pente qui ont une forte influence sur les taux d'érosion aux champs. Des capteurs, généralement montés sur la machinerie agricole ou sur un véhicule tout-terrain lors de relevés GPS, peuvent aussi fournir la distribution spatiale des taux de matière organique ou la texture des sols qui influent sur l'érodabilité des sols et, donc, sur les pertes de phosphore particulaire. D'autre part, l'imagerie satellitaire ou aéroportée dans le domaine du visible et de l'infrarouge permet de délimiter les zones où l'égouttement est déficient au printemps (zones bleu foncé à noires sur la figure 2a) après une précipitation. Ces zones correspondent généralement aux aires où les cultures croissent moins en été (Figure 2b) et où l'assimilation des éléments nutritifs par les plantes est plus faible. Ce sont

donc ces zones où le sol est mal protégé par la végétation qui sont les plus vulnérables au ruissellement, à l'érosion et aux pertes de phosphore et qui profiteraient d'une gestion agricole localisée. Les MNT de haute précision peuvent également servir à calculer la pente des champs, les voies de passage de l'eau ainsi que les superficies qui contribuent au débit afin de dimensionner les bandes riveraines, fossés avaloirs ou autres structures hydroagricoles qui retiennent le phosphore de sources agricoles diffuses.

Finalement, l'information géographique multisource, brute ou traitée, peut être intégrée dans des logiciels de visualisation des données, comme TNTAtlas ou ARC Explorer. Ces atlas électroniques conviviaux peuvent ensuite être transférés aux intervenants locaux ou aux agriculteurs. Grâce aux multiples données concernant le territoire agricole, ces atlas électroniques peuvent servir à formuler des recommandations d'aménagements hydroagricoles adaptées au cas par cas afin de réduire l'érosion par le ruissellement et les pertes de phosphore vers le milieu aquatique.

Autres outils

D'autres outils peuvent aider à évaluer les risques d'exportation de phosphore vers les eaux de surface. Ainsi, des outils ont été spécifiquement développés pour supporter la gestion des fertilisants; ils permettent aux agronomes de gérer les doses de phosphore en fonction de critères agronomiques et environnementaux. Le Plan agroenvironnemental de fertilisation (PAEF) et le bilan phosphore en sont quelques exemples. Ces outils sont souvent inclus dans des logiciels de gestion des champs, comme Agri-Champs et SigaChamp (Agri-Gestion, 2006; Siga Informatique, 2005), disponibles pour les conseillers et les entreprises agricoles. Ces logiciels intègrent généralement une description physique de la ferme (photos aériennes, routes, puits, champs, etc.), plusieurs caractéristiques de l'état des sols (type, fertilité, texture), l'utilisation du sol (cultures) ainsi que de l'information concernant la gestion des champs (semence, fertilisation, chaulage, etc.) et offrent quelques fonctionnalités des SIG. Cependant, jusqu'à présent, ils n'incluent pas l'évaluation du risque d'exportation du phosphore vers le milieu aquatique. L'ajout, à ces outils, d'un module de détermination du risque de perte de phosphore vers les plans d'eau serait souhaitable.

En conclusion, à la suite de la caractérisation des champs ou de la ferme à l'aide d'une ou plusieurs méthodes mentionnées précédemment, il est possible de déterminer les actions à entreprendre afin d'apporter des correctifs qui permettront de réduire les exportations de phosphore vers les eaux de surface. Pour ce faire, les conseillers et les agriculteurs peuvent s'aider de divers documents et fiches techniques portant sur la faisabilité et l'efficacité de méthodes culturales alternatives, telles que le semis direct, le travail réduit ou l'effet de résidus laissés en surface (Cazelais *et al.*, 2003, Cazelais et Nault, 2003), ainsi que sur la description et l'efficacité des méthodes de mise en place de bandes riveraines herbacées ou arbustives, de fossés avaloirs, de tranchées filtrantes ou de toute autre structure hydroagricole (Stämpfli *et al.*, 2007; Duchemin, 2006; Laroche 2000; CCSE) visant à réduire les pertes de sol et l'exportation de nutriments et de pesticides d'origine agricole diffuse.

En résumé

Les outils de gestion des risques de perte de phosphore (P)

1. *Approches agronomiques adaptées pour le Québec*

- Teneur en P Mehlich-3 ou pourcentage de saturation P/Al Mehlich-3 des sols
- Bonne relation avec la vulnérabilité du P à migrer vers le milieu aquatique
- Ne tiennent pas compte des facteurs *transport*

2. *Modélisation hydrologique*

- Tient compte de tous les facteurs biogéographiques, climatiques et agricoles
- Complexe et requiert beaucoup de temps
- Non applicable de façon pratique dans la gestion des risques de perte de P en provenance des champs agricoles

3. *Indexation des risques*

- Méthode simple et rapide
- Tient compte des facteurs source, transport et bassin
- Comporte des incertitudes dans les résultats

4. *Géomatique*

- Méthode d'analyse et de gestion spatio-temporelle du territoire efficace et complète
- De simple à très élaborée
- Investissement initial dans l'infrastructure coûteux

5. *Autres outils*

- PAEF, PAA (Plan d'accompagnement agroenvironnemental), logiciels commerciaux de gestion agricole
- Ne tiennent pas compte du transport du phosphore

Références

Agri-Gestion. 2006. Des logiciels performants. www.agrigestion.ca Consulté en 2006.

Beaudet, P., R. Beaulieu, M. Bélanger, D. Bernier, M. Bolinder, P.-P. Dansereau, C. Émond, M. Giroux, J. Magnan, J. Nadeau et R. Simard. 1998. Proposition de norme sur la fertilisation phosphatée au groupe de travail interministériel - Groupe technique sur la norme sur le phosphore. Québec. 63 p.

Beaudin, I. 2006. Revue de littérature. La mobilité du phosphore. Version finale. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ), Québec. 137 p. Disponible en ligne : <https://www.craaq.qc.ca/index.cfm?p=32&l=fr&IdDoc=1759>

- Beaudin, I., J. Deslandes, A.R. Michaud, F. Bonn et C.A. Madramooto. 2006. Variabilité spatio-temporelle des exportations de sédiments et de phosphore dans le bassin versant de la Rivière aux Brochets au sud-ouest du Québec. Partie I - Paramétrage, calibrage et validation du modèle SWAT. *Agrosolutions* 17(1): 4-20.
- Beaudin, I., A. Michaud, P. Beaudet, M. Giroux, C. Landry, M. Duchemin, G. Gagné, et J. Deslandes. 2007. ODEP; un outil d'aide à la décision face au risque d'exportation de phosphore en provenance des champs agricoles. Dans: « P-index » pour le Québec. Congrès 2007 AQSSS-SCSS. Station touristique Duchesnay, Sainte-Catherine-de-la-Jacques-Cartier, Québec.
- Boisvert, J., É. Gauvin, M.C. Nolin, I. Perron et P. Potvin. 2003. La géomatique appliquée à l'agriculture de précision. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ), Québec. 71 p.
- Cazelais, S. et J. Nault. 2003. Contrôlez l'érosion pour protéger vos investissements. Clubs-conseils en agroenvironnement. 16 p.
- Cazelais, S., J. Nault, G. Lamarre, J.-C. Hébert et È. Pontbriand-Sarao. 2003. Le travail du sol. Par où commencer? Logiag, Québec. 28 p.
- CCSE (Centre de conservation du sol et de l'eau de l'est du Canada). Les bandes riveraines et la qualité de l'eau : une revue de la littérature. Sans date. Disponible en ligne : <http://www.agrireseau.qc.ca/navigation.aspx?r=bandes%20riveraines>
- CRAAQ. 2003. Guide de référence en fertilisation, 1^{re} édition. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ), Québec. 198 p.
- Duchemin, M. 2006. Efficacité des bandes enherbées et arborées à réduire la pollution diffuse d'origine agricole. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA), Québec. 1 p.
- 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. *Agrosol* 9(2): 51-57.
- Guérin, J., L.-É. Parent et R. Abdelhafid. 2007. Agri-environmental Thresholds using Mehlich III Soil Phosphorus Saturation Index for Vegetables in Histosols. *J. Environ. Qual.* 36: 975-982.
- Khiari, L., L.-É. Parent, A. Pellerin, A.R.A. Alimi, C. Tremblay, R.R. Simard, et J. Fortin. 2000. An agri-environmental phosphorus saturation index for acid coarse-textured soils. *J. Environ. Qual.* 29:1561-1567.
- Marchand, S. 2004. Diagnostic sol-plante pour la gestion du phosphore dans la production de la canneberge. Mémoire de l'Université Laval, Québec. 55 p.

- Michaud, A.R., I. Beaudin, J. Deslandes, F. Bonn et C.A. Madramooto. 2006. Variabilité spatio-temporelle des exportations de sédiments et de phosphore dans le bassin versant de la rivière aux Brochets au sud-ouest du Québec. Partie II - Évaluation de l'effet de scénarios agroenvironnementaux alternatifs à l'aide de SWAT. *Agrosolutions* 17(2): 21-32.
- Neitsch, S.L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry, R. Srinivasan et J.R. Williams. 2002. Soil and Water Assessment Tool. User's Manual. Version 2000.
- OQLF (Office québécois de la langue française). 2004. Le grand dictionnaire terminologique. <http://www.oqlf.gouv.qc.ca/ressources/gdt.html>. Consulté en 2007.
- Pellerin, A., L.-É. Parent, J. Fortin, C. Tremblay, L. Khiari et M. Giroux. 2006a. Environmental Mehlich-III soil phosphorus saturation indices for Quebec acid to near neutral mineral soils varying in texture and genesis. *Can. J. Soil Sci.* 86(4): 711-723.
- Pellerin, A., L.-É. Parent, J. Fortin, C. Tremblay, L. Khiari et M. Giroux. 2006b. Environmental soil phosphorus saturation index for Quebec acid to neutral mineral soils varying in texture and genesis. *Can. J. Soil Sci.* 86(5): 897-910.
- Perrone, J.T. 1997. Hydrologic Modeling of an Agricultural Watershed in Quebec using AGNPS. Department of Agricultural and Biosystems Engineering, Macdonald Campus, McGill University, Sainte-Anne-de-Bellevue, Québec. 96 p.
- Renard, K.K., G.R. Foster, G. A. Weesies, D. K. McCool et D.C. Yoder. 1996. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE). Agriculture Handbook Number 703. U.S Department of Agriculture, États-Unis. 404 p.
- Rivest, R. 2005. La micro-topographie, rendements accrus/environnement protégé. *Producteur Plus*. p. 46-54.
- Rousseau, A.N., A. Mailhot, S. Gariépy, E. Salvano et J.P. Villeneuve. 2002. Computation of probability of exceeding environmental load allocations from point and diffuse sources using the integrated modeling system GIBSI. *Rev. Sci. Eau*, 15(Special): 121-148.
- Siga Informatique. 2005. SigaChamp. <http://www.siga.net/>. Consulté en 2006.
- van Bochove, E., G. Thériault, F. Dechmi et M.-L. Leclerc. 2005. Chapitre 18 -Phosphore. Dans : Lefebvre, A., W. Eilers et B. Chunn (éd.), 2005. L'agriculture écologiquement durable au Canada : Série sur les indicateurs agroenvironnementaux – Rapport No 2. Agriculture et Agroalimentaire Canada, Ottawa, Ontario.
- van Bochove, E., G. Thériault, F. Dechmi, A. N. Rousseau, R. Quilbé, M.-L. Leclerc et N. Goussard. 2006. Indicator of Risk of Water contamination by Phosphorus from Canadian Agricultural Land. *Water Science and Technology* 53(2): 303-310.
- Wall, G.J., D.R. Coote, E.A. Pringle et I.J. Shelton. 2002. Rusle-Can/Équation universelle révisée des pertes de sol pour application au Canada. Agriculture et Agroalimentaire Canada. 127 p.

GLOSSAIRE

AGNPS	Modèle hydrologique (AGricultural Non-Point Source Pollution Model) créé par le United States Department of Agriculture. (USDA)
Bassin versant	Territoire dont les eaux se déversent vers un exutoire unique. (Adapté de <i>Le grand dictionnaire terminologique</i>)
Cartographie	Ensemble des techniques et des arts graphiques ayant pour objet la conception, la préparation, la rédaction et la réalisation de tous les types de plans ou de cartes. (<i>Le grand dictionnaire terminologique</i>)
Domaine spectral	Domaine des longueurs d'onde pour lesquelles un appareil peut être utilisé. (<i>Le grand dictionnaire terminologique</i>)
Érodabilité	Caractère d'un sol érodable (c'est-à-dire un sol que sa structure, sa composition ou sa localisation rendent sensible aux agents de l'érosion). (<i>Le grand dictionnaire terminologique</i>)
Érosion	Action d'usure et de transformation que l'eau et les agents atmosphériques font subir à l'écorce terrestre. (<i>Le Petit Robert, 1978</i>)
Géodésie	Science de la détermination mathématique des dimensions et de la forme de la Terre, ainsi que des variations de son champ de gravité. (<i>Le grand dictionnaire terminologique</i>)
Géomatique	Discipline ayant pour objet la gestion des données géographiques et qui fait appel aux sciences et aux technologies reliées à leur acquisition, leur stockage, leur traitement et leur diffusion. La géomatique fait appel principalement à des disciplines comme la topométrie, la cartographie, la géodésie, la photogrammétrie, la télédétection et l'informatique. (<i>Le grand dictionnaire terminologique</i>)
GIBSI	Modèle hydrologique (Gestion Intégrée des Bassins versants à l'aide d'un Système Informatisé) créé par l'Institut national de la recherche scientifique Eau-Terre-Environnement. (INRS-ETE)
GPS	Système de localisation qui permet, à un moment précis, de déterminer la position d'un engin ou d'un objet qui se déplace, en se servant de signaux émis par des satellites placés en orbite autour de la Terre (Global Positioning System ou système de positionnement mondial). (<i>Le grand dictionnaire terminologique</i>)

Hydrologie	Science appliquée au cycle de l'eau, des précipitations, de l'écoulement ou de l'infiltration et des réserves en eau, de l'évaporation et de la précipitation. (<i>Le grand dictionnaire terminologique</i>)
Informatique	Discipline qui s'intéresse à tous les aspects, tant théoriques que pratiques, reliés au traitement automatique de l'information, à la conception, à la programmation, au fonctionnement et à l'utilisation des ordinateurs. (<i>Le grand dictionnaire terminologique</i>)
IRP	Indice de risque de perte de phosphore.
Lidar	Capteur actif qui, par la mesure du temps de propagation aller et retour d'un rayonnement lumineux émis par un laser, permet de déterminer la position et la distance d'une cible par rapport à l'émetteur. (<i>Le grand dictionnaire terminologique</i>)
Microtopographie	Topographie à petite échelle. (<i>Idaho State University</i>) Dans le cadre du transport du phosphore, topographie des surfaces terrestres ayant une précision verticale centimétrique.
MNT	Modèle numérique de terrain. Modèle tridimensionnel représentant, sous forme numérique, le relief d'une portion de territoire. (<i>Le grand dictionnaire terminologique</i>)
Phosphore (P)	Élément chimique non métallique et pentavalent, numéro atomique 15. Constituant essentiel des plantes. Il intervient dans la plupart des processus physiologiques (respiration, photosynthèse, etc.) et favorise la croissance, la précocité et la résistance au froid. (<i>Larousse agricole, 2002</i>)
Phosphore assimilable	Phosphore biodisponible, directement utilisable par les végétaux.
Phosphore dissous	Phosphore en solution dans le sol, sous forme d'ions orthophosphates.
Phosphore particulaire	Phosphore attaché aux particules de sol.
Photogrammétrie	Technique permettant, à partir d'un couple stéréoscopique de photographies, d'étudier et de définir avec précision les formes, les dimensions et la position dans l'espace d'un phénomène quelconque. (<i>Le grand dictionnaire terminologique</i>)

Pratiques de gestion bénéfiques (PGB)	Pratiques de gestion des champs agricoles utilisées dans le but d'améliorer la qualité des sols et de l'eau ou d'atténuer les effets néfastes de l'agriculture sur la qualité de l'environnement.
Richesse du sol	Teneur du sol en phosphore, faisant généralement référence à la quantité de phosphore assimilable.
Ruissellement	Écoulement par gravité à la surface du sol, suivant la pente de terrain, des eaux météoriques qui ont échappé à l'infiltration, à l'évaporation et au stockage à la surface du adsorption sol. (<i>Le grand dictionnaire terminologique</i>)
Saturation (en nutriment)	Concentration maximale d'un soluté dans un solvant. (<i>Le grand dictionnaire terminologique</i>) En parlant du phosphore, proportion des sites d'adsorption dans le sol qui sont occupés par le phosphore.
SWAT	Modèle hydrologique (Soil and Water Assessment Tool) développé par le <i>United States Department of Agriculture</i> . (<i>Neitsch et al. 2002</i>)
Téledétection	Ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer, au moyen de mesures effectuées à distance, les caractéristiques physiques et biologiques des phénomènes. (<i>Le grand dictionnaire terminologique</i>)
Topométrie	Technique qui détermine, en négligeant la courbure de la Terre, la position planimétrique (x, y) et altimétrique (z) de points du terrain à l'aide d'instruments usuels d'arpentage. (<i>Le grand dictionnaire terminologique</i>)

Sources :

Idaho State University. Digital Atlas of Idaho - Digital Atlas Glossary. imnh.isu.edu/digitalatlas/bio/glostxt.htm. Consulté en 2007.

INRS-ETE. Description sommaire de GIBSI (Quantité-qualité). Institut national de la recherche scientifique Eau-Terre-Environnement. <http://www.ete.inrs.ca/activites/modeles/gibsi/francais/sommaire.htm> Consulté en 2007.

Larousse agricole - Le monde paysan au XXI^e siècle. 2002 (4^e édition). Larousse. 800 p.

Le grand dictionnaire terminologique. <http://www.oqlf.gouv.qc.ca/ressources/gdt.html>. Consulté en octobre 2007.

Le Petit Robert, 1978. Dictionnaires Le Robert. Paris, France.

Neitsch, S. L., J. G. Arnold, J. R. Kiniry, R. Srinivasan et J. R. Williams. 2002. Soil and Water Assessment Tool. User's Manual. Version 2000.

USDA. AGricultural Non-Point Source Pollution Model (AGNPS). United States Department of Agriculture. <http://www.ars.usda.gov/Research/docs.htm?docid=5199>. Consulté en 2007.