

Fiche technique n° 2

Les sources, les formes et la gestion du PHOSPHORE en milieu agricole



Institut de recherche
et de développement
en agroenvironnement



Centre de référence en agriculture
et agroalimentaire du Québec

Comité *ad hoc* groupe mobilité
phosphore

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.



Agriculture et
Agroalimentaire Canada

Agriculture and
Agri-Food Canada

Canada

Agriculture, Pêcheries
et Alimentation

Québec



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 019

© 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

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

Aubert Michaud, chercheur en conservation des sols et de l'eau, 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

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

Le phosphore du sol.....	1
Évaluation de la biodisponibilité du phosphore	1
La mobilité du phosphore	2
Enrichissement et rétroversion du phosphore	4
La gestion des apports de phosphore	5
<i>Bilan des apports et enrichissement des sols</i>	6
<i>Forme, mode et période d'épandage des engrais</i>	6
Références	9
Glossaire	11

Le phosphore du sol

À l'état naturel, les sols contiennent d'une à trois tonnes de phosphore (P) total dans les premiers 20 centimètres. Cette quantité dépasse grandement les besoins annuels des plantes. Toutefois, seule une petite partie, appelée phosphore biodisponible, est utilisable pour la nutrition des végétaux. Le phosphore biodisponible est surtout présent sous forme d'ions orthophosphates en solution qui sont directement assimilables par les plantes. Cependant, la plus large part du phosphore éventuellement disponible pour les cultures est adsorbée sur les particules de sol et est graduellement libérée dans la solution du sol où elle sera prélevée par les racines. Les phosphates adsorbés sur les particules du sol sont généralement associés à des cations, à des oxydes ou à des hydroxydes de fer (Fe) et d'aluminium (Al). Leur disponibilité varie grandement. Certains se retrouvent rapidement en solution, d'autres migrent plus lentement de la phase solide (phosphates adsorbés) vers la solution, ou encore ne se solubilisent qu'avec l'activité d'organismes vivants (microbes ou champignons).

Comme les plantes assimilent le phosphore majoritairement par la voie des racines sous forme d'ions orthophosphates en solution, la disponibilité du phosphore pour les cultures est définie comme la quantité totale de phosphore dans le sol susceptible de se retrouver dans la solution du sol sous forme d'ions orthophosphates pendant une période équivalente à la durée de croissance de la culture. Toutefois, étant donné la grande complexité du système sol-plante, la quantité de phosphore réellement disponible pour la végétation est encore difficile à évaluer.

Évaluation de la biodisponibilité du phosphore

Afin d'évaluer la disponibilité du phosphore pour les cultures, il faut tenir compte de trois facteurs, soit l'intensité, la quantité et la capacité. Le facteur intensité représente la portion du phosphore immédiatement disponible pour les plantes dans la solution du sol. Le facteur quantité représente la portion du phosphore total présent dans le sol qui, selon toute probabilité, passera éventuellement en solution, alors que le facteur capacité représente l'aptitude du sol à maintenir le facteur intensité au même niveau, peu importe les circonstances.

Il existe plusieurs méthodes pour déterminer la quantité de phosphore disponible pour les cultures, soit les méthodes isotopiques, physicochimiques et chimiques. Les méthodes isotopiques font appel aux isotopes radioactifs du phosphore et reposent sur l'hypothèse que ces isotopes ont un comportement identique pendant les processus chimiques, physiques et biologiques. Comme ces isotopes sont révélés par leur radiation, il est possible de suivre leurs déplacements dans le système sol-eau-plante. Les méthodes physicochimiques, telles les membranes échangeuses d'ions, permettent également de mesurer le flux de phosphore qui passe en solution et simulent en quelque sorte le prélèvement par les racines. Les méthodes chimiques sont cependant plus largement utilisées. Celles-ci peuvent faire appel à des acides forts, à des concentrations diluées d'acides faibles ou à des solutions alcalines afin d'extraire une certaine quantité de phosphore. La quantité extraite est par la suite corrélée avec la réponse des plantes à la fertilisation. L'intensité du phosphore (I), c'est-à-dire la fraction présente dans la solution du sol, est quant à elle estimée par une extraction

à l'eau ou par des sels dilués. La capacité ($\partial Q/\partial I$) d'un sol à maintenir le facteur intensité au même niveau est généralement déterminée en comparant l'intensité (I) par rapport à la quantité (Q), c'est-à-dire la quantité de phosphore adsorbé qui est susceptible de retourner dans la solution du sol. Pellerin et al. (2006a) ont démontré que la capacité des sols à maintenir une intensité de phosphore en solution varie selon leur texture, leur genèse et leur pH.

Puisque le phosphore est présent sous différentes formes dans le sol et que les méthodes d'extraction chimique n'extraient pas le phosphore avec la même agressivité, des portions variables sont attribuées aux différentes formes de phosphore selon la méthode utilisée. Certaines méthodes ont tendance à extraire plus facilement le phosphore attaché aux particules de sol alors que d'autres représentent davantage le phosphore en solution. De plus, la nature du sol et sa pédogenèse ont un effet important sur les résultats obtenus avec les différentes méthodes d'extraction du phosphore des sols. Aucune méthode n'est donc universellement adaptée à l'ensemble des types de sol pour prédire la quantité totale de phosphore pouvant être libérée pendant la période de croissance d'une culture ainsi que sa vitesse de libération. Plusieurs méthodes d'extraction du phosphore ont ainsi été développées dans le monde et calibrées en fonction du prélèvement des cultures et des propriétés physicochimiques des sols.

Au Québec, la méthode Mehlich-3 (Mehlich, 1984) est utilisée depuis 1986 dans le dosage simultané de plusieurs éléments nutritifs du sol, notamment le P, Mg, Ca, Na et K, ainsi que les oligo-éléments suivants : Al, Cu, Zn, Mn et Fe. C'est une méthode robuste qui fonctionne tant sur les sols acides, neutres que légèrement calcaires. Elle est bien adaptée pour la majorité des sols du Québec, sauf pour les sols calcaires.

La mobilité du phosphore

En réponse aux préoccupations croissantes à l'égard de la mobilité du phosphore vers les écosystèmes aquatiques, la caractérisation des risques de perte de phosphore vers les cours d'eau s'est greffée aux besoins d'évaluer la quantité de phosphore disponible pour les plantes. Le concept d'indice de saturation des sols en phosphore, initialement développé en Hollande par Breuwsma et Silva (1992), répond à cet impératif environnemental. L'indice de saturation en phosphore consiste à définir des seuils environnementaux au delà desquels le risque de contamination des eaux de surface est accru. La prise en compte du taux de saturation en phosphore dans la gestion de la fertilisation à l'échelle du champ permet ainsi 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, les taux de saturation correspondant au rapport P/Al ou $P/(Al+Fe)$ extrait selon la méthode Mehlich-3 ont été validés comme indices de solubilité et de désorption du phosphore dans les sols agricoles (Guérin et al. 2007; Pellerin *et al.*, 2006a et b; Parent et al., 2006; Parent *et al.*, 2002; Khiari *et al.*, 2000; Giroux et Tran, 1996).

Ces indices représentent la proportion des sites d'échanges de la matrice du sol déjà occupés par le phosphore. L'aluminium et le fer demeurent les principaux sites de fixation du phosphore dans les sols du Québec, en raison de la dominance des sols acides. Les formes de phosphore liées au calcium sont cependant dominantes dans les sols calcaires et neutres.

Un indice de saturation élevé témoigne d'une occupation importante des sites d'adsorption du sol par le phosphore, de même que d'une solubilité élevée. Ainsi, les probabilités que la quantité de phosphore dans la solution du sol soit suffisante pour la croissance des plantes augmentent avec l'indice de saturation, mais le risque de perte de phosphore vers le milieu aquatique également. Au Québec, l'indice P/Al est déjà utilisé pour la gestion des fertilisants dans les cultures du maïs (grain et ensilage) et de la pomme de terre alors que l'indice P/(Al+Fe) est utilisé pour la culture de la canneberge. Ces indices sont utiles à la fois comme indicateur agronomique et comme indicateur environnemental.

Pour qu'un test de saturation ait une signification environnementale, il faut toutefois qu'il y ait un lien entre le degré de saturation et une concentration de phosphore en solution. L'établissement de seuils critiques environnementaux est effectué en se basant sur une concentration critique de phosphore en solution dans le sol. Quelques études réalisées au Québec ont d'ailleurs proposé des seuils de saturation critique pour certains types de sol, au delà desquels le risque de perte de phosphore devient élevé alors que le risque agronomique est nul ou très faible (Tableau 1).

Tableau 1. Seuils environnementaux proposés au Québec

Sols	Seuil de saturation (P/Al) M-3	Signification	Base	Risques	Auteurs
Histosols	5 % * Utilisation du ratio (P/(Al + Fe)) M-3	Valeur critique environnementale au-delà de laquelle il y a risque de contamination des eaux de surface	9,7 mg Pw/L correspondant à une saturation de 0,25 DSPox	Contamination des eaux de surface	Guérin <i>et al.</i> , 2007
Sols sableux acides	11,3 % * Utilisation du ratio (P/(Al + Fe)) M-3	Valeur critique environnementale au-delà de laquelle il y a risque de contamination des eaux de surface	9,7 mg Pw/L correspondant à une saturation de 0,25 DSPox	Contamination des eaux de surface	Parent et Marchand, 2006.
Acides à neutres Texture fine (> 30 % argile) Texture grossière (≤ 30 % argile)	7,6 % 13,1 %	Limite supérieure de la classe de fertilité et de risque environnemental moyen-élevé	9,7 mg Pw/L correspondant à 0,10 mg Pi/L dans la solution du sol	Contamination des eaux de surface	Pellerin <i>et al.</i> , 2006a et b
Podzol 0 - 20 % argile 20 - 30 % argile 30 - 60 % argile > 60 % argile Gleysol 0 - 20 % argile 20 - 30 % argile 30 - 60 % argile > 60 % argile	17,0 et 8,5 % 12,5 et 8,5 % 7,8 % 5,8 % 13,7 et 8,5 % 9,7 et 8,5 % 7,8 % 5,8 %	Valeurs critiques environnementales pour l'écoulement latéral et vertical respectivement, selon l'objectif d'enrichissement de la solution du sol	9,7 mg Pw/L correspondant 0,10 mg Pi/L dans la solution du sol	Contamination des eaux souterraines	Parent <i>et al.</i> , 2002

Sols	Seuil de saturation (P/Al) M-3	Signification	Base	Risques	Auteurs
Acides à texture grossière 0 - 20 % argile	15,0 %	Limite inférieure de la classe de risque environnemental élevé	25 % (P/α(Al+Fe)) _{ox} (Breuwsma et Silva, 1992) ou 0,10 mg Pi/L dans solution du sol	Contamination des eaux de surface Enrichissement du sous-sol	Khiari <i>et al.</i> , 2000
Sols agricoles	10 % 20 %	Limites inférieure et supérieure de la classe de risque environnemental élevé	250 à 600 µg Pw/L dans le ruissellement	Contamination des eaux de surface	Giroux et Tran, 1996

DSPox = saturation calculée à partir du P, Al et Fe extraits avec une solution d'oxalate d'ammonium; M-3 = méthode Mehlich-3; Pw = P extrait à l'eau; Pi = ions orthophosphates.

Enrichissement et rétroversion du phosphore

Bien que la dynamique d'enrichissement soit relativement bien documentée, le taux de réduction de la saturation des sols en phosphore (rétroversion) en fonction des apports et du temps nécessaire pour atteindre les niveaux souhaitables au plan agroenvironnemental est par contre encore assez mal connu. C'est que l'évolution de la teneur en phosphore assimilable et de la saturation d'un sol en phosphore dépend non seulement des quantités apportées, des exportations de phosphore et de la teneur initiale en phosphore assimilable, mais aussi de la dynamique de rétroversion du phosphore liée à la nature pédologique et physicochimique des sols (Giroux et Royer, 2007; Giroux *et al.*, 2002). Différentes possibilités peuvent survenir en rapport avec le bilan des apports en phosphore et conduire à une diminution, au maintien ou à l'accroissement de la teneur en phosphore assimilable des sols. La figure 1 illustre l'évolution de la teneur en phosphore d'un sol riche, en relation avec des doses de phosphore, obtenue au moyen de dispositifs aux champs (Giroux et Royer, 2007). Lorsque les apports de phosphore sont inférieurs aux exportations (bilan négatif), une diminution de la teneur en phosphore assimilable des sols est observée en sols riches, mais beaucoup moins en sols pauvres en phosphore. Dans le cas où le bilan est équilibré ou modérément excédentaire, on observe une baisse du phosphore assimilable dans les sols riches et un maintien dans les sols pauvres. Lorsque le bilan du phosphore est excédentaire d'environ 30 kg P₂O₅/ha, la rétroversion du phosphore compense le surplus du bilan de sorte que les sols maintiennent leur teneur en phosphore assimilable. Dans le cas où les apports de phosphore sont importants et excèdent de plus de 30 kg P₂O₅ ha⁻¹ les exportations, une augmentation du phosphore assimilable est observée dans tous les sols.

Tous les sols tendent vers un équilibre entre les fractions non labile et assimilable du phosphore. Dans les sols riches, les apports élevés et répétitifs ont contribué, au fil des ans, à élever la fraction assimilable du phosphore. Lorsque ces apports sont éliminés ou restreints, la rétroversion du phosphore vers des formes plus stables ramène relativement rapidement l'équilibre entre les fractions non labile et assimilable. Dans les sols pauvres

n'ayant pas ou ayant moins reçu d'apports, la fraction assimilable du phosphore est plus faible et la rétroversion du phosphore vers des formes plus stables s'effectue plus lentement.

Une implication pratique de ces études sur la rétroversion du phosphore est que la saturation en phosphore des sols présentant un risque environnemental élevé est appelée à diminuer relativement rapidement, compte tenu du temps requis pour enrichir ces sols (près de 30 ans). Selon les projections de la figure 1, de 10 à 13 ans seraient nécessaires pour ramener la saturation d'un sol riche à un niveau de saturation moyen en réponse à des apports de phosphore en équilibre avec les besoins des cultures.

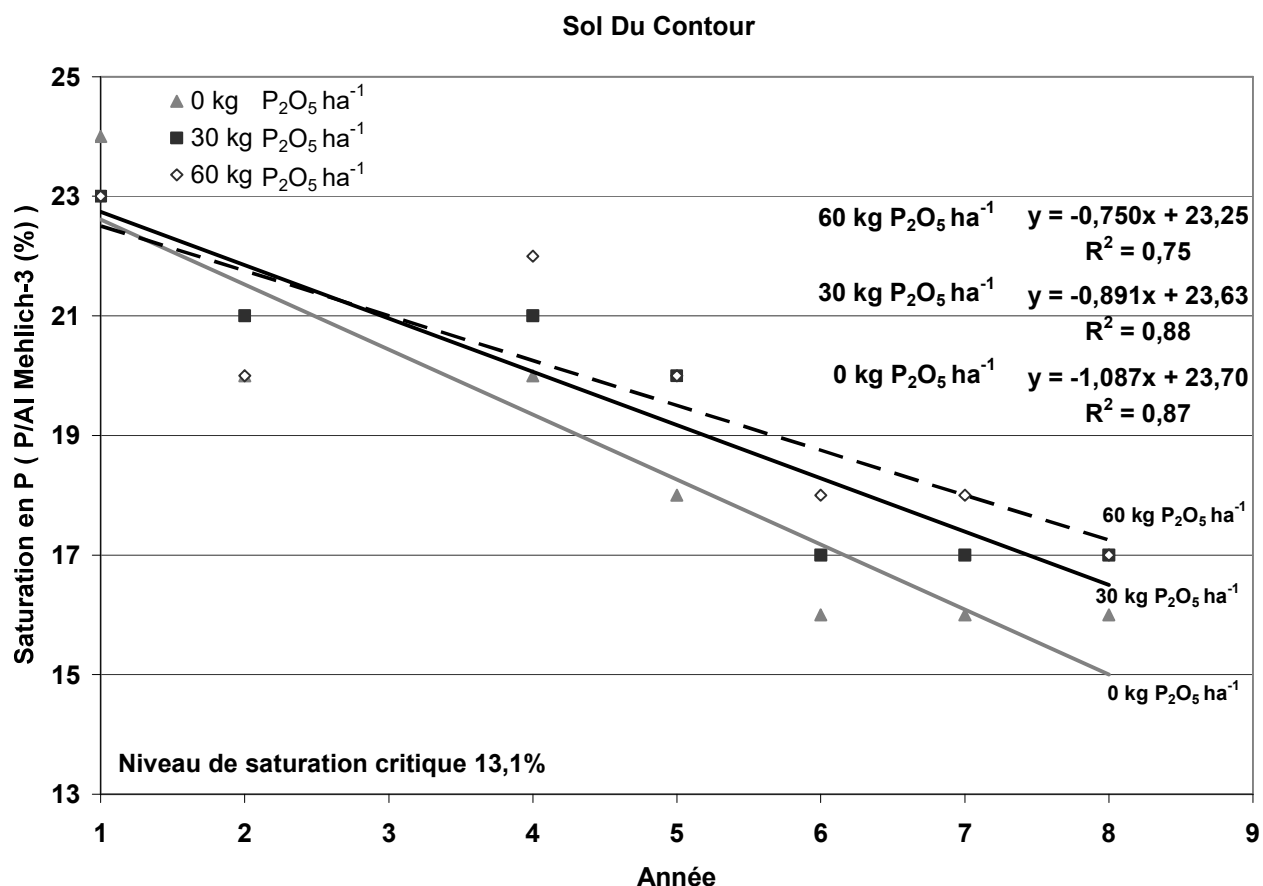


Figure 1. Évolution de la saturation en phosphore Mehlich-3 du sol Du Contour selon des doses annuelles de 0 kg, 30 kg et 60 kg P_2O_5 /ha (tirée de Giroux et Royer, 2007)

La gestion des apports de phosphore

Plusieurs facteurs influencent la mobilité des différentes sources de phosphore. À la base, les propriétés physicochimiques (texture, matière organique, présence d'hydroxydes de fer, d'aluminium et de calcium) et biologiques (mycorhizes, bactéries) des sols ont une influence sur la capacité de rétention et le mouvement du phosphore. Toutefois, l'influence des

pratiques agricoles doit aussi être prise en compte. Par exemple, un bilan des apports excédentaire entraînera à long terme un enrichissement du sol qui augmentera les risques d'exportation de phosphore vers le milieu aquatique. La forme, la période et le mode d'épandage des engrais influenceront également le risque de transport événementiel par le ruissellement des apports récents de phosphore. Finalement, les pratiques culturales influenceront la distribution du phosphore dans le profil du sol et contrôleront la vulnérabilité des parcelles face aux processus d'érosion et de transport du phosphore particulaire.

Bilan des apports et enrichissement des sols

Le Québec est une des principales provinces productrices d'animaux d'élevage au Canada et les déjections animales sont couramment utilisées comme engrais de ferme. Comme le ratio phosphore/azote des fertilisants organiques dépasse celui qui est nécessaire aux cultures, il s'ensuit qu'une fertilisation basée sur les besoins en azote (N) des plantes génère un surplus de phosphore. Des bilans excédentaires en phosphore, plus ou moins importants, ont été rapportés à l'échelle des fermes, des bassins versants et des régions au Québec. Ainsi, dans les bassins versants des rivières Chaudière et Yamaska, des bilans à la surface du sol variant entre 25 kg P_2O_5 /ha et 43 kg P_2O_5 /ha ont été rapportés entre 2000 et 2002 (Beaudet, 2002). Les résultats des analyses de sol effectuées par le laboratoire du MAPAQ (1995-1996) et le laboratoire d'AgriDirect inc. (1998-2001) offrent également un portrait de la richesse et de la saturation en phosphore des sols des 18 régions administratives du Québec. Ces résultats montrent qu'entre 1995 et 2001, plus de 15 % des analyses de sol se retrouvaient dans la classe de saturation élevée à très élevée ($10\% > P/Al > 20\%$ et $P/Al > 20\%$). Toutefois, la situation est très variable d'une région à une autre. De plus, globalement, on constate qu'une proportion encore plus importante de sols se situe au-dessous du seuil agronomique.

Forme, mode et période d'épandage des engrais

La teneur et la saturation en phosphore des sols et leur potentiel de sorption-désorption traduisent bien la mobilité du phosphore stocké dans les couches arables des sols agricoles. Les extractions chimiques du phosphore des sols ne tiennent toutefois pas compte de l'influence à court terme des épandages d'engrais inorganiques et organiques. En effet, la *forme* ainsi que la *période* et le *mode d'épandage des engrais* ont une influence sur les quantités et les formes de phosphore qui seront exportées des champs.

L'effet des fertilisants sur la mobilité du phosphore est principalement lié à l'ajout de fertilisants organiques. La présence des composés organiques dans le sol entrerait en compétition avec le phosphore pour les sites d'adsorption. En se liant à ces derniers (Fe, Al, Ca, minéraux argileux), ces composés organiques favoriseraient la mise en solution du phosphore. De plus, la solubilité plus élevée du phosphore contenu dans les fumiers, combinée avec une quantité d'eau plus importante dans ceux-ci, la faible densité des particules organiques et son application en surface du sol, contribuerait significativement à l'accroissement des charges solubles, majoritairement biodisponibles, de phosphore. Cette augmentation épisodique, particulièrement celle de la fraction soluble dans le ruissellement à la suite des fertilisations, est indépendante de la richesse des sols. Ces pertes événementielles, lorsqu'elles se produisent, peuvent être responsables de 50 à 98 % des

charges de phosphore mesurées en surface et dans le sous-sol. Elles représentent généralement de 5 à 10 % du phosphore total appliqué, mais peuvent représenter plus de 20 % dans des conditions défavorables (Withers *et al.*, 2003).

L'exportation potentielle des engrais sous forme soluble est maximale suivant l'application en surface et diminue progressivement alors que le phosphore soluble est adsorbé par les particules de sol. La période s'écoulant entre l'épandage et le transport du phosphore lors d'une pluie revêt donc une importance cruciale puisque le phosphore des engrais organiques nécessite du temps pour se fixer aux particules de sol. De plus, lorsque les engrais organiques sont appliqués en même temps que les engrais minéraux, le phosphore organique réduit la fixation du phosphore de l'engrais minéral par les oxydes de fer et d'aluminium. Cette synergie augmente donc la solubilité du phosphore minéral et conduit à une plus grande disponibilité du phosphore pour la plante et à un risque accru de transport du phosphore vers le milieu aquatique.

L'application d'engrais en surface, plutôt que l'incorporation, augmente aussi considérablement le risque d'exportation du phosphore qui est majoritairement transporté en surface par le ruissellement. Sans incorporation, le phosphore soluble forme généralement la fraction dominante du ruissellement. Par conséquent, l'incorporation diminue aussi la fraction soluble dans le ruissellement.

En raison des conditions agroclimatiques québécoises, les périodes d'épandage printanière et automnale sont relativement vulnérables à la production de ruissellement. Les pointes d'activité hydrologique à ces périodes sont d'autant plus préoccupantes que la majeure partie des engrais de ferme est épandue durant ces périodes de l'année. La figure 2 illustre les effets de la couverture végétale (sol nu versus prairie), de l'amendement de lisier (témoin versus 60 kg P/ha) et du type de sol sur la mobilité et la spéciation du phosphore (total, réactif dissous, particulaire et biodisponible) du ruissellement, tels qu'ils ont été observés par Michaud et Laverdière (2004) dans le cadre d'une étude avec 36 parcelles sous pluie simulée. Bien que les processus d'érosion et de transport de sédiments furent identifiés comme les principaux vecteurs d'exportation du phosphore, 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 potentiellement biodisponible dans le ruissellement. Parmi les implications pratiques de cette étude, il est à noter qu'un sol relativement pauvre en phosphore peut contribuer à des exportations significatives de phosphore si les modalités d'épandage font en sorte que la parcelle ruisselle avant l'enfouissement de l'engrais de ferme. Compte tenu de la faible profondeur effective d'interaction entre le sol et le ruissellement, l'enfouissement des amendements constitue donc un élément déterminant du devenir du phosphore.

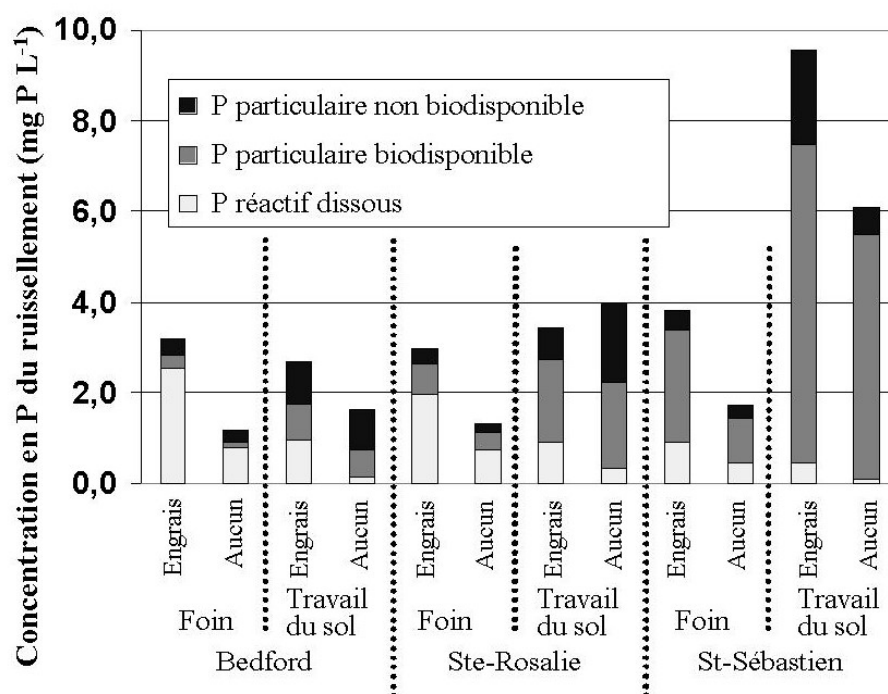


Figure 2. Effets et interactions de la couverture végétale, du type de sol et de l'amendement de lisier sur la mobilité et spéciation du phosphore sous des conditions de pluie simulée dans le bassin versant expérimental du ruisseau au Castor (tirée de Michaud et Laverdière, 2004)

En résumé

Les facteurs qui influencent la mobilité des sources de phosphore

Propriété des sols

- Teneurs en Al, Fe et Ca.
- Texture, contenu en argile, perméabilité et structure, groupes pédologiques.
- pH.

Bilan des apports et enrichissement des sols

Bilan positif = Enrichissement = ↑ saturation = ↑ solubilité = ↑ risque

Forme, période et mode d'épandage des engrais

- Les engrais organiques sont plus solubles que les engrais minéraux, car :
 - ils contiennent plus d'eau;
 - les composés organiques empêchent le P de réagir avec les minéraux (Al, Fe, Ca) du sol.
- Les engrais organiques favorisent la libération du P soluble biodisponible.
- L'application d'engrais organiques augmente la solubilité des engrais minéraux.
- Une période plus longue entre la fertilisation et une pluie favorise la fixation du P et la minéralisation du P organique et réduit les risques d'exportation vers le milieu aquatique.
- L'enfouissement réduit significativement les risques d'exportation de phosphore.

Pratiques culturales

- Elles influencent la distribution du P dans le profil du sol.
- Elles ont un effet sur la protection de la surface du sol.

Références

- Breeuwsma, A. et S. Silva. 1992. Phosphorus fertilization effects in the Netherlands and the Po regions (Italy). Agr. Res. Dep. Rep. 57. Soil and Water Research. Wageningen, Netherlands.
- Giroux, M. et T.S. Tran. 1996. Critères agronomiques et environnementaux liés à la disponibilité, la solubilité et la saturation en P des sols agricoles du Québec. Agrosol 9(2): 51-57.
- Giroux, M. et R. Royer. 2007. Effets 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 18(1): 17-24.

- 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. Alini, 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.
- Mehlich, A. 1984. Mehlich-3 soil test extractant: a modification of Mehlich-2 extractant. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 15: 1409-1416.
- Michaud, A. et M. Laverdière. 2004. Cropping, soil type and manure application effects on phosphorus export and bioavailability. *Can. J. Soil Sci.* 84(3): 295-305.
- Parent, L.-É. et S. Marchand. 2006. Response to Phosphorus of Cranberry on High Phosphorus Testing Acid Sandy Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 70: 1914-1921.
- Parent, L.-É., A. Pellerin et L. Khiari. 2002. Le flux et la dynamique du phosphore dans les sols agricoles québécois. Communication scientifique. Colloque sur le phosphore. Ordre des agronomes du Québec. 27 p.
- Pellerin, A., L.-É. Parent, J. Fortin, C. Tremblay, L. Khiari et M. Giroux. 2006a. Environmental Mehlich-3 soil phosphorus saturation indices for Quebec acid to near neutral mineral soils varying in texture and genesis. *Can. J. Soil Sci.* 86: 711-723.
- Pellerin, A., L.-É. Parent, C. Tremblay, J. Fortin, G. Tremblay, C.P. Landry et L. Khiari. 2006b. Agri-environmental models using Mehlich-3 soil phosphorus saturation index for corn in Québec. *Can. J. Soil Sci.* 86: 897-910.
- Withers, P.J.A., U. Barbro, C. Stamm et M. Bechmann. 2003. Incidental phosphorus losses - Are they significant and can they be predicted? *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 166: 459-68.

GLOSSAIRE

Azote (N)	Élément chimique, constituant essentiel de la matière vivante aux côtés du carbone, de l'oxygène et de l'eau. (<i>Larousse agricole, 2002</i>)
Biodisponibilité	Aptitude d'un nutriment à être absorbé par l'organisme après ingestion. (<i>Le grand dictionnaire terminologique</i>) Biodisponible (en parlant du phosphore): directement assimilable par les végétaux.
Désorption	Libération spontanée ou provoquée des gaz absorbés ou adsorbés par un solide. (<i>Le grand dictionnaire terminologique</i>) La désorption des ions orthophosphates (Pi) de la phase solide d'un sol vers la solution est gouvernée par le gradient de concentration existant entre la phase solide et la solution. (<i>Frossard et al., 2004</i>)
Fixation	En parlant du phosphore, attachement des ions orthophosphates (Pi) à la phase solide d'un sol.
Ions orthophosphates (Pi)	Composés du phosphore (acides ou sels) caractérisés par les radicaux suivants : $\text{H}_2\text{PO}_4^{-1}$, HPO_4^{-2} ou PO_4^{-3} . (<i>Le grand dictionnaire terminologique</i>) Phosphore sous forme d'ions orthophosphates. (<i>Frossard et al., 2004</i>)
Labile	Qui est sujet à changer. En parlant du phosphore, proportion du phosphore qui est facilement mobilisable. (<i>Le Petit Robert, 1978</i>)
Phosphate	Roche contenant de l'acide phosphorique tricalcique servant d'engrais ou de matière première à des engrais. (<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 soluble à l'eau déterminé.(Pw)	Phosphore extrait à l'eau selon un rapport sol-solution
Phosphore assimilable	Phosphore biodisponible, directement assimilable par les plantes.

Les sources, les formes et la gestion du phosphore en milieu agricole

Phosphore dissous	Phosphore présent dans la solution du sol, sous forme d'ions orthophosphates ou sous forme de molécules organiques solubles
Phosphore total	Concentration de toutes les formes de phosphore présent dans le sol. En pratique, on utilise souvent une extraction avec des acides concentrés.
Rétroversion	Propension du phosphore à évoluer vers des formes plus stables dans les sols.
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.

Sources :

Frossard, E., P. Julien, J.-A. Neyroud et S. Sinaj. 2004. Le phosphore dans les sols - État de la situation en Suisse. Le phosphore dans les sols, les engrais, les cultures et l'environnement. Cahier de l'environnement n° 368. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP), Berne, Suisse. 180 p.

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.