

Colloque sur le phosphore

Une gestion éclairée !

L'ÉVOLUTION DES TENEURS EN PHOSPHORE DANS LES SOLS SELON LEUR FERTILITÉ, LEUR RICHESSE EN PHOSPHORE ET LES TYPES DE SOL

Marcel Giroux agr., M.Sc.

Chercheur à l'Institut de recherche et développement en agroenvironnement (IRDA)
marcel.giroux@irda.qc.ca

Co-auteurs : Jean Cantin, agr., conseiller agricole et
Roger Rivest, agr., conseiller agricole
Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du
Québec (MAPAQ)
Gilles Tremblay, agr., chercheur
Centre de recherche sur les grains inc. (CEROM)

M. Marcel Giroux est agronome et chercheur en chimie et fertilité des sols à l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA). Ses activités de recherche portent, entre autres, sur l'évaluation des méthodes d'analyse des sols, le développement du critère de saturation en phosphore (P/AI) des sols et la mesure des pertes d'éléments nutritifs dans les eaux de ruissellement et de drainage souterrain ainsi que sur la valeur fertilisante des engrais de ferme. Il réalise également des essais de longue durée sur l'évolution des propriétés des sols et de leur teneur en éléments nutritifs. M. Giroux contribue à l'établissement de grilles de fertilisation NPK pour les cultures de la pomme de terre, du canola, du maïs et des prairies.

ÉVOLUTION DES TENEURS EN PHOSPHORE DES SOLS SELON LA FERTILISATION, LEUR RICHESSE EN P ET LES TYPES DE SOLS

Introduction

Facteurs affectant l'évolution des teneurs en phosphore des sols

Le taux d'enrichissement des teneurs en phosphore (P) du sol suite à des applications de fertilisants dépend beaucoup des caractéristiques chimiques du sol et de sa nature pédologique. Le phosphore soluble des engrais organiques ou minéraux se présente principalement sous formes de $H_2PO_4^-$ et de HPO_4^{2-} . Ces ions orthophosphates sont très réactifs avec les minéraux du sol. Ils sont soit adsorbés par le calcium présent sur le complexe d'échange ou précipités par les formes de fer et surtout d'aluminium libres. On trouve dans les sols d'importantes quantités de ces oxydes de fer et d'aluminium, soit de l'ordre de 0,2 à 0,7 %, ce qui correspond à plusieurs tonnes par hectare. Lorsque le phosphore est adsorbé ou précipité, il va s'établir avec la solution du sol un équilibre qui va dépendre de la nature chimique des produits de réaction et du pH. Cet équilibre est dynamique: il va changer dans le temps.

À plus 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 ou octocalciques et des apatites. Pour le fer et l'aluminium, les phosphates vont être transformés en minéraux très stables : strengite et variscite. Le devenir des engrais P est décrit plus en détail par Tisdale et al. (1985).

Comme cette évolution tend à rendre de moins en moins disponible le phosphore du sol et celui résiduel des engrais, on appelle ce phénomène la rétroversion des phosphates. Il est nécessaire d'en connaître la nature car il constitue un élément important de l'évolution de la fertilité en P des sols. La mesure du phosphore disponible avec la méthode Mehlich-3 va fluctuer dans le temps selon l'évolution des formes de phosphore puisque cette méthode a été développée pour extraire sélectivement les formes de P disponible selon leur nature minéralogique. Le processus inverse de la rétroversion est l'altération. Il contribue à rendre annuellement disponible une faible quantité de P présent dans les minéraux du sol. C'est sans doute un phénomène important pour l'équilibre des écosystèmes forestiers mais en agriculture,

ce processus a peu d'ampleur sur l'évolution des teneurs en P des sols, compte tenu des bilans du P en cause.

Mallarino *et al.* (2001) ont établi des classes relatives aux pertes annuelles de P total par érosion, ruissellement et drainage souterrain en provenance des terres agricoles : faible (0 à 2,25 kg P/ha), moyenne (2,25 à 5,6 kg P/ha), élevée (5,6 à 16,8 kg P/ha) et très élevée (> 16,8 kg P/ha). Les pertes de P auront peu d'effet sur la teneur en P des sols si la classe de risque est faible ou moyenne. Cependant, dans le cas de la classe élevée ou très élevée, les pertes de P sont suffisantes pour affecter la teneur en P des sols. La rétroversion des phosphates et l'exportation du P par les récoltes sont généralement les facteurs les plus importants pour expliquer les diminutions des teneurs en P des sols, mais si ceux-ci sont exposés à des pertes de phosphore élevées, il faudra également en tenir compte pour bien comprendre l'évolution du P du sol.

Importance du type de sol

Plusieurs travaux réalisés au Québec ont démontré que la capacité de fixation du phosphore est particulièrement influencée par la teneur en aluminium libre des sols. L'aluminium extrait avec Mehlich-3 donne une bonne indication de la présence de ces formes. La nature pédologique des sols est également révélatrice du phénomène. Vézina *et al.* (2000) ont établi un groupement des séries de sol quant à leur aptitude à fixer le phosphore en faisant intervenir les grands groupes pédologiques, soit les podzols, les brunisols et les gleysols, de même que leur texture. Les engrais phosphatés appliqués vont donc réagir différemment, être plus ou moins disponibles aux cultures, enrichir plus ou moins les sols, selon leur nature pédologique et plus spécifiquement selon leur teneur en aluminium libre.

Les essais sur l'enrichissement en phosphore des sols montrent des niveaux d'application très variables pour enrichir les sols. Au Québec, les résultats de recherche indiquent qu'il faut appliquer généralement entre 2 et 5 kg, exceptionnellement 7 kg P/ha pour enrichir les sols de 1 kg P Mehlich-3/ha. Zhang *et al.* (1995) ont obtenu des valeurs de 3,2 à 5,3 kg P/ha en excès des exportations pour enrichir le sol de 1 kg P Mehlich-3/ha dans la région de Montréal sur le loam sablo-argileux Chicot. Peck *et al.* (1971) ont obtenu une valeur de 4 kg P/ha en Illinois. Peterson et Krueger (1980) au Wisconsin ont obtenu une valeur de 2,3 kg P/ha. Par contre,

dans des sols sableux très pauvres. Rehm *et al.* (1984) ont trouvé des rapports beaucoup plus élevés qui variaient entre 5,6 et 9,3 kg P/ha pour chaque augmentation de 1 kg P/ha.

Certains sols sont donc difficiles à enrichir et on ne peut prédire facilement l'accroissement des teneurs en P d'un sol sans examiner soigneusement ses caractéristiques. C'est donc avant tout par des analyses de sols répétées à des fréquences de trois ans environ que doit se faire le suivi de l'évolution de la teneur en phosphore des sols. La modélisation de cette évolution à partir d'un bilan prévisionnel du phosphore et d'un taux d'enrichissement uniforme pour tous les sols ne donne pas toujours des résultats satisfaisants.

Importance de la richesse en phosphore des sols

L'absence de fertilisation phosphatée va créer une diminution progressive de la teneur en P disponible dans le sol. Une expérience menée en serre sur l'épuisement du phosphore du sol (Tableau 1), suite à des cultures d'orge, de maïs et de dactyle sans apport de P, a démontré une diminution lente et progressive du niveau de fertilité (Giroux et Tran, 1994). La vitesse d'épuisement dépendait surtout des exportations par les cultures et de la teneur initiale en P du sol. Plus les sols sont riches en P, plus la diminution de la teneur en P est rapide lorsqu'on cesse les applications de P. Dans une expérience à long terme sur une rotation maïs-soya, McCollum (1991) a suivi pendant 30 ans l'épuisement du P disponible dans un loam sableux. Dans les parcelles ayant des teneurs initiales de 350 à 430 kg P/ha, le taux de diminution, suite à l'arrêt de la fertilisation, a été de 23 kg P/ha par an. Dans les parcelles dont la teneur initiale en P Mehlich-3 était plus faible, soit de 78 à 200 kg P/ha, le taux de diminution a été respectivement de 3,2 et de 11,7 kg P/ha par an. Webb *et al.* (1992) ont démontré que la dose de P nécessaire pour maintenir la teneur en P des sols a varié de 38 kg à plus de 75 kg P_2O_5 /ha selon la richesse des sols dans une rotation maïs-soya. Plus la teneur en P des sols est élevée, plus la dose de P nécessaire au maintien de la fertilité est élevée. Les exportations annuelles moyennes en P dans cette étude étaient respectivement de 60 kg P_2O_5 /ha pour le maïs et de 32 kg P_2O_5 /ha pour le soya, soit de 46 kg P_2O_5 /ha en moyenne.

Tableau 1 : Évolution de la teneur en phosphore des sols (P Mehlich-3) suite à des cultures successives sans apport d'engrais phosphatés.

Série de sol	P initial	P après orge	P après maïs	P après dactyle (3 coupes)	Diminution P
Pontiac	116	103	94	90	26
Rideau	132	116	105	95	37
Sainte-Rosalie	157	148	123	121	36
Saint-Urbain	213	188	175	164	49
Achigan	401	376	361	358	43
Lanoraie	513	475	470	448	65

La fertilité dans les horizons inférieurs pourrait également affecter l'évolution de la teneur en P des sols. Richards *et al.* (1994) ont démontré que dans certains sols de l'Ontario, une contribution significative du P provenait de la couche 25-36 cm. Cependant, les résultats de deux études ont démontré qu'au Québec les horizons de sols 20-40 et 40-60 cm sont généralement pauvres et contribueraient vraisemblablement assez peu à la nutrition phosphatée des cultures (Tabi *et al.*, 1990; Rivest et Leduc, 1998).

Formes de phosphore du sol versus solubilité du phosphore

La quantité et la nature des formes de réserves minérales du sol, en équilibre avec la fraction disponible, vont également affecter l'évolution du P du sol. De même, la quantité et la nature des formes de réserves organiques vont affecter la minéralisation du P organique. Cette dynamique n'a pas encore fait l'objet d'études détaillées au Québec pour les formes organiques. Par contre, pour le P minéral, on dispose d'une méthode de fractionnement et de spéciation des formes de phosphore du sol. Les formes de P liées au fer (Fe-P) mais surtout à l'aluminium (Al-P) dominent dans les podzols; par contre, dans les gleysols, c'est une dominance des formes calciques (Ca-P) ou une combinaison des formes Al-P, Fe-P et Ca-P qu'on observe. Cette spéciation des formes permet de comprendre la dynamique du P des sols. Des études sur la solubilité du P ont démontré que le P soluble dans la solution du sol dépend beaucoup des formes de P. Les gleysols, plus riches en formes Ca-P, équilibrent mieux la solution du sol que les podzols, plus riches en Al-P et Fe-P, et ce, pour une même teneur en P Mehlich-3. Rivest et Leduc (1998) ont démontré ce phénomène dans des sols de la Montérégie. Bayazid (2001) a également établi des distinctions entre les types de sols et précisé les formes du P contribuant à la solubilité du phosphore au Québec. Pour une même teneur dans les sols,

la disponibilité du P Mehlich-3 pour les cultures sera généralement plus grande dans les gleysoils que dans les podzols. C'est pour cette raison que les grilles de fertilisation des cultures vont de plus en plus considérer l'Al Mehlich-3 comme indice de fixation ou de saturation (P/Al) du phosphore dans les sols pour ajuster les applications d'engrais phosphatés. On intègre ainsi la dynamique des formes de P du sol dans les programmes de fertilisation.

Systèmes culturaux et bilan de phosphore

L'évolution de la teneur en P des sols va aussi dépendre des systèmes culturaux. D'abord, les cultures ne prélèvent pas toutes les mêmes quantités de P. Par exemple, par ordre croissant, les prairies de graminées prélèvent 2,5 kg P/t, le maïs ensilage 2,5 kg P/t, les prairies de légumineuses 3 kg P/t, le maïs-grain 3 kg P/t, les céréales à pailles 4 kg P/t, le soya 6 kg P/t et le canola 7 kg P/t. La nature de la culture ainsi que son rendement vont déterminer l'exportation du phosphore. Celle-ci peut varier de 10 à 40 kg P/ha selon la nature de la culture ainsi que son rendement. On ne peut mesurer sur une base annuelle les effets de ces exportations sur l'évolution du P du sol, compte tenu de la variation spatiale souvent assez élevée des teneurs en P. Toutefois, pour des périodes de trois ans ou plus, les exportations sont suffisamment importantes pour en mesurer les effets sur la teneur en P des sols, à condition toutefois que la variabilité de la teneur en P des sols soit faible. La localisation des points d'échantillonnage des sols pourrait permettre de mieux cerner la variabilité spatio-temporelle du phosphore dans les sols.

La notion de bilan de phosphore dans un champ donné sert à déterminer si les quantités de P exportées (sorties) sont compensées par les quantités appliquées (entrées). Les bonnes pratiques de fertilisation ne supposent pas que le bilan de P doit nécessairement être équilibré. Si on regarde les grilles de fertilisation en grandes cultures, on observe qu'en sols pauvres, le bilan de P est généralement positif, c'est-à-dire que les apports de P nécessaires au rendement économique optimal excèdent les exportations de P. Le phénomène de rétroversion des phosphates et la pauvreté des sols font en sorte que les engrais phosphatés doivent combler une part plus grande des besoins des cultures. Dans les sols de fertilité moyenne, les apports de P visent à combler les besoins en P de la culture. Ces apports sont légèrement inférieurs aux exportations de P pour plusieurs cultures. Pour les sols riches et très riches, les recommandations en P des grilles de fertilisation sont très faibles et inférieures aux exportations. On vise à combler les besoins des cultures à même les réserves disponibles du

sol, tout en stimulant, au besoin, le départ de la culture par un apport minimal de P (engrais de démarrage). Pour les engrais de ferme, on préconise dans les sols riches et très riches des apports de P basés sur une approche de bilan de P à la surface du sol. Cette différente approche de gestion entre les engrais minéraux et les engrais de ferme peut s'expliquer. D'abord, les engrais de ferme sont des engrais complets mais qui ont rarement une formulation N-P-K adaptée aux besoins spécifiques des cultures; il faut souvent faire des compromis pour leur valorisation sur la base de leur teneur en azote ou en phosphore. Ils contiennent en plus de la matière organique indispensable en abondance pour le maintien de la fertilité et de la qualité des sols. C'est l'état de saturation en P des sols qui va déterminer le meilleur compromis à faire dans les circonstances. On ignore actuellement l'incidence de l'approche du bilan sur l'évolution de la teneur en P des sols.

Objectif de l'étude

L'étude qui suit avait pour objectif d'établir, dans différents champs, l'évolution des teneurs en P des sols selon les applications de phosphore et les exportations par les récoltes (bilan de P). On pouvait ainsi déterminer notamment les taux d'enrichissement ou d'épuisement des sols selon leur richesse et les pratiques de fertilisation. Une synthèse de plusieurs essais réalisés au Québec permettra une visualisation et une meilleure compréhension de l'évolution des teneurs en P selon le bilan de P.

Les résultats qui vous sont présentés proviennent des travaux réalisés par Tran *et al.* (1996), de Zhang *et al.* (1995), de Tremblay *et al.* (2002), de Giroux et Lemieux (2000), de Bruulsema (2001) et des nouvelles données provenant de suivis aux champs réalisés en Montérégie par Rivest, Cantin et Giroux. Cette étude vise aussi à déterminer les niveaux appropriés de maintien de la teneur en P des sols selon leurs caractéristiques et des indicateurs agroenvironnementaux éprouvés.

Résultats

Évolution du phosphore du sol avec une fumure minérale

Une expérience comportant trois doses variables de P, soit 0, 30 et 60 kg P₂O₅/ha, avec une fumure N et K complémentaire, a été réalisée à Saint-Hyacinthe sur le sol Du Contour très riche en phosphore, sur des cultures successives de maïs-maïs-soya-blé-maïs (Tableau 2). Le

rendement et la teneur en P des grains ont été mesurés annuellement et un bilan de P a été établi. Sur une période de 5 ans, ce bilan de P a été de $-218 \text{ kg P}_2\text{O}_5/\text{ha}$, de $-80 \text{ kg P}_2\text{O}_5/\text{ha}$ et de $+73 \text{ kg P}_2\text{O}_5/\text{ha}$ respectivement pour les doses d'application annuelles de 0, 30 et $60 \text{ kg P}_2\text{O}_5/\text{ha}$ (Tableau 3). Les exportations cumulatives en P pour ces mêmes doses ont été respectivement de $218 \text{ kg P}_2\text{O}_5/\text{ha}$, de $230 \text{ kg P}_2\text{O}_5/\text{ha}$ et de $227 \text{ kg P}_2\text{O}_5/\text{ha}$. Sur une base annuelle, elles ont varié entre 35 et $55 \text{ kg P}_2\text{O}_5/\text{ha}$. Le rendement des cultures n'a pas été affecté significativement par la fertilisation P (Tableau 3). Le témoin sans engrais P a été aussi productif que les parcelles avec 30 ou $60 \text{ kg P}_2\text{O}_5/\text{ha}$. Le besoin en engrais P requis pour le rendement économique optimal est donc nul. Des analyses de sols ont été réalisées annuellement à l'automne dans la couche de labour (0-20 cm) afin de suivre l'évolution des teneurs en P des sols.

Tableau 2. : Effet de la fertilisation phosphatée sur le rendement des cultures et l'humidité des grains

Traitements (kg P ₂ O ₅ /ha)	Maïs-grain 1996		Maïs-grain 1997		Soya 1998		Blé 1999		Maïs-grain 2000	
	Rende- ment (t/ha (M.S.))	Humidité (%)								
0	6,74	19,6	6,94	21,9	3,01	7,24	3,07	7,08	5,99	32,5
30	7,16	18,8	6,78	21,1	3,06	6,63	3,30	7,28	6,13	32,6
60	7,17	19,2	6,39	21,0	3,09	7,12	3,26	7,23	5,86	32,8
F	1,15	1,44	0,77	1,07	0,38	1,19	1,07	1,45	0,96	1,15
P _t > F	0,36	0,27	0,58	0,41	0,85	0,96	0,13	0,26	0,48	0,38
CV	7,5	4,3	10,6	4,4	7,0	6,9	12,4	5,1	11,4	4,0

Dans les parcelles non fertilisées en P, la teneur initiale moyenne en P était de $359 \text{ kg P}/\text{ha}$. Après une période de cinq ans, elle est de $325 \text{ kg P}/\text{ha}$ (Tableau 3, Figure 1). Pour la dose de $30 \text{ kg P}_2\text{O}_5/\text{ha}$, la teneur initiale moyenne était de $366 \text{ kg P}/\text{ha}$; elle a chuté à $335 \text{ kg P}/\text{ha}$. Pour la dose de $60 \text{ kg P}_2\text{O}_5/\text{ha}$, elle était de $369 \text{ kg P}/\text{ha}$ et elle a très légèrement diminué à $359 \text{ kg P}/\text{ha}$ après cinq ans. La dose qui équilibre le bilan de P est de $46 \text{ kg de P}_2\text{O}_5/\text{ha}$, comme l'indique la figure 2. Une différence d'environ $14 \text{ kg de P}_2\text{O}_5/\text{ha}$ existe donc entre la dose d'équilibre du bilan ($46 \text{ kg de P}_2\text{O}_5/\text{ha}$) et la dose de maintien de la fertilité ($60 \text{ kg P}_2\text{O}_5/\text{ha}$). Un plan de fertilisation basé sur un bilan équilibré du phosphore va donc, à la longue, réduire la teneur en P des sols, vraisemblablement à cause du phénomène de rétroversion des phosphates discuté antérieurement.

Tableau 3 : Bilan de phosphore et évolution de la teneur en P Mehlich-3 des sols dans une rotation maïs-maïs-soya-blé-maïs de 5 ans.

Doses annuelles de P appliquées	Apport de P pendant 5 ans	Exportation de P pendant 5 ans	Bilan du P après 5 ans	Teneur initiale du sol	Teneur finale du sol après 5 ans
(kg P ₂ O ₅ /ha)			(kg P ₂ O ₅ /ha)	(kg P Mehlich-3)/ha	
0	0	218	-218	359	325
30	150	230	-80	366	335
60	300	227	+73	369	359

Figure 1. : Évolution de la teneur en phosphore des sols selon les doses annuelles appliquées

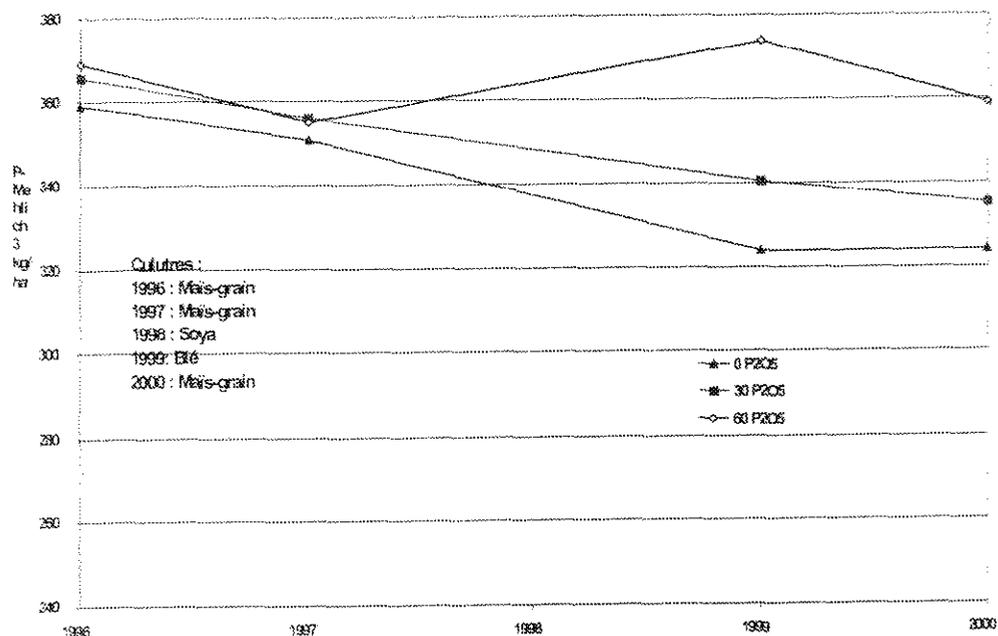
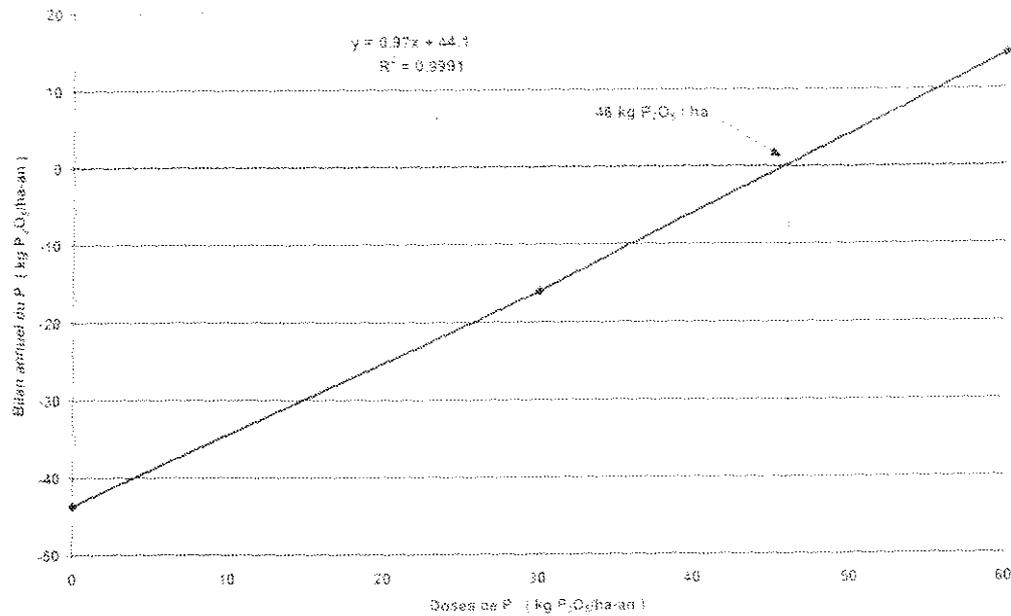


Figure 2 : Relation entre le bilan annuel moyen du phosphore et les doses annuelles de P appliquées dans une rotation maïs-maïs-soya-blé-maïs



Évolution du phosphore du sol avec les engrais de ferme

Tran *et al.* (1996) ont mesuré l'évolution de la teneur en P des sols suite à des apports prolongés de fumier de bovins et de lisier de porcs (Tableaux 4 et 5). La présence de la matière organique et des ions ammonium (NH₄⁺) favorise à court terme la formation de produits de réaction plus solubles et atténue les mécanismes de rétroversion des phosphates, ce qui est de nature à favoriser l'utilisation du P par les cultures. Toutefois, à plus long terme, à mesure que les engrais de ferme sont minéralisés, il ne semble plus exister de différence quant à la provenance du P et à son devenir. Les facteurs d'enrichissement moyen mesurés par Tran *et al.* (1996) d'environ 3,5 kg P/kg P Mehlich-3 se comparent tout à fait aux résultats généralement obtenus avec les engrais minéraux sur ce sol.

Tableau 4 : Effet des apports de fumier de bovins sur le prélèvement en P par le maïs ensilage et la teneur en P Mehlich-3 du sol après 8 ans

Dose de fumier tous les 2 ans	Quantité P apportée (8 ans)	Prélèvement P (8 ans)	Teneur P Mehlich-3 après 8 ans	Taux annuel d'enrichissement moyen (8 ans)	Facteur ⁽¹⁾ d'enrichissement
---(t/ha)---	------(kg P/ha)-----	------(kg P/ha)-----	---(kg/ha)---	---(kg P/ha/an)---	
0	0	40	51	---	---
20	168	80	92	5,1	2,15
40	336	88	112	7,6	4,07
60	504	112	151	12,5	3,92
80	672	120	177	15,7	4,38
100	840	144	258	25,9	3,36
F doses	**	**	**	**	Moyenne = 3,58

** significatif à p = 0,01

(1) le facteur d'enrichissement est calculé selon la formule :

$$\text{Facteur} = \frac{\text{Quantité de P apportée} - \text{Quantité de P prélevée}}{\text{Enrichissement en P Mehlich-3 du sol}}$$

Tableau 5 : Effet des apports de lisier de porcs pendant 16 ans sur le prélèvement en P par le maïs-grain et les teneurs en P disponible du sol

Dose annuelle de lisier	Quantité P apportée (16 ans)	Prélèvement P (16 ans)	Teneur P Mehlich-3 (16 ans)	Taux annuel d'enrichissement moyen (16 ans)	Saturation P	Facteur ⁽¹⁾ d'enrichissement
---(t/ha)---	------(kg P/ha)-----	------(kg P/ha)-----	---(kg/ha)---	---(kg P/ha/an)---	-----(%)----	
0	0	92	76	---	3	---
60	672	222	202	7,9	9,1	3,57
120	1344	266	397	20,1	21,5	3,36
F doses		**	**	**	**	Moyenne = 3,47

** significatif à p = 0,01

(1) le facteur d'enrichissement est calculé selon la formule :

$$\text{Facteur} = \frac{\text{Quantité de P apportée} - \text{Quantité de P prélevée}}{\text{Enrichissement en P-Mehlich-3 du sol}}$$

Évolution de la teneur en phosphore des sols selon le bilan de phosphore

Afin de mieux comprendre les relations existant entre le bilan annuel moyen de P des champs et la variation de la teneur en P Mehlich-3 des sols, une synthèse de plusieurs travaux a été réalisée (Tableaux 6 et 7). On a ainsi pu établir, pour les sols pauvres ou moyens (150 P Mehlich-3/ha et moins) et pour les sols riches et très riches (151 kg P Mehlich-3/ha et plus), des droites de régression reliant ces deux paramètres (Figure 3).

Figure 3 : Variations des analyses de sol en P selon la moyenne annuelle du bilan de P des sols pauvres et moyens (150 kg P Mehlich-3/ha et moins) et des sols riches (151 kg P Mehlich-3/ha et plus)

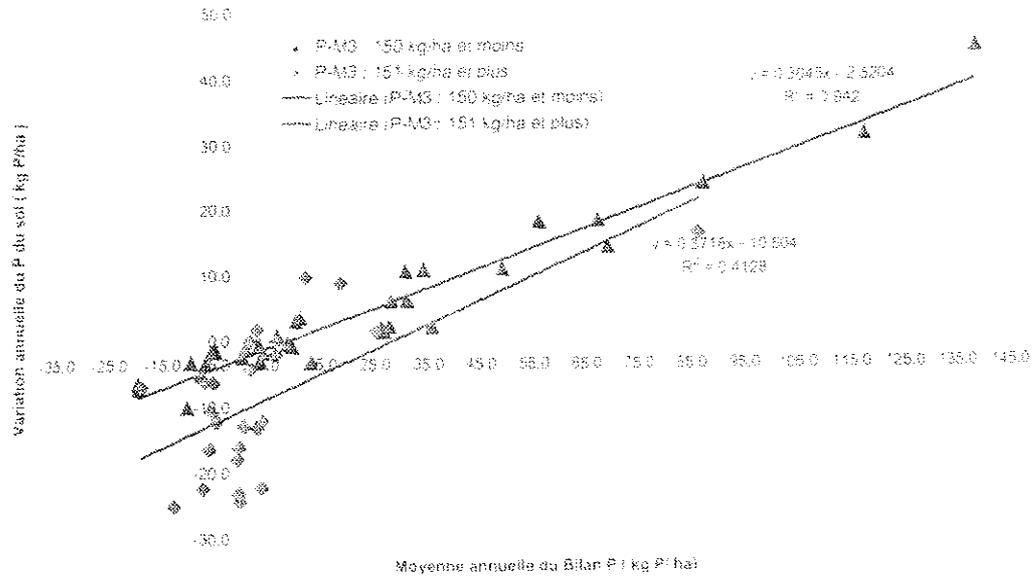


Figure 4 : Variation des analyses de sol en P selon la richesse des sols et le bilan annuel de phosphore

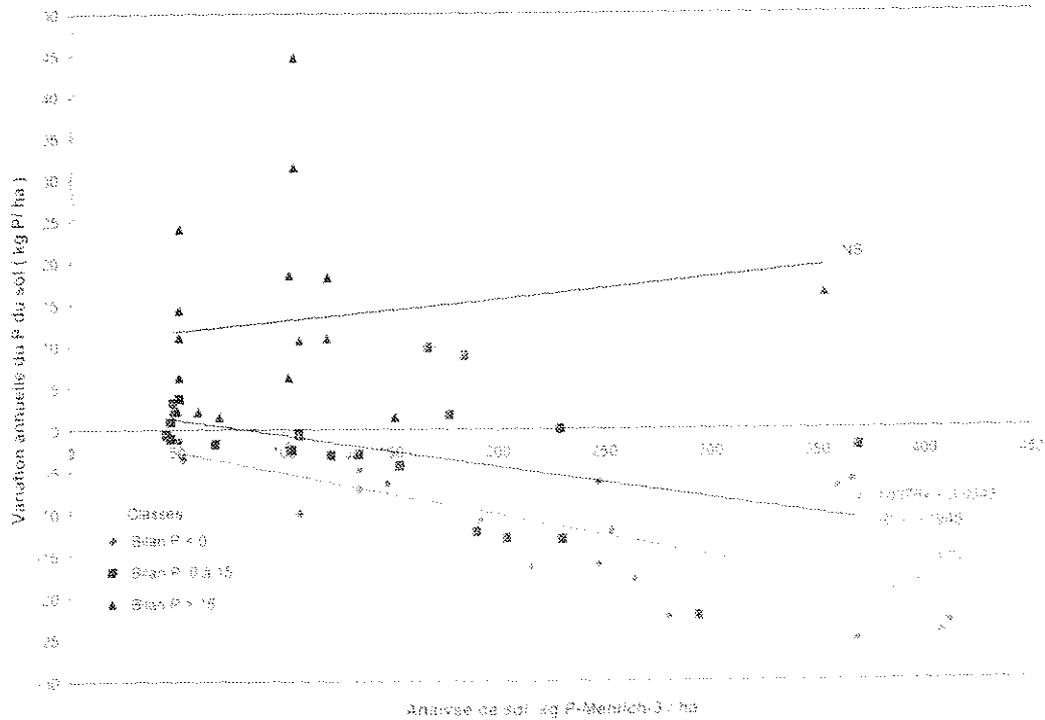


Tableau 6. : Relation entre le bilan de P à la surface du sol et la variation de la teneur en P des sols pauvres et moyens.

#	Source	Type de fumure	P initial	Moyenne	Variation moyenne
			du sol	annuelle du bilan	annuelle du sol
			(kg P M-3/ha)	(kg P/ha)	(kg P M-3/ha)
1.	Cantin	Minérale	45	3,3	-0,6
2.	Cantin	Minérale	47	6,6	0,9
3.	Cantin	Minérale	47	0,6	-1,1
4.	Cantin	Minérale	48	27,7	2,3
5.	Cantin	Minérale	48	10,1	3,2
6.	Cantin	Minérale	50	35,7	2,2
7.	Tran <i>et al.</i>	Fumier de bovins	51	5	-1,4
8.	Tran <i>et al.</i>	Fumier de bovins	51	11	3,7
9.	Tran <i>et al.</i>	Fumier de bovins	51	31	6,2
10.	Tran <i>et al.</i>	Fumier de bovins	51	49	11
11.	Tran <i>et al.</i>	Fumier de bovins	51	69	14,3
12.	Tran <i>et al.</i>	Fumier de bovins	51	87	24
13.	Cantin	Minérale	59	-8,9	-3,5
14.	Cantin	Minérale	60	26,1	2,1
15.	Cantin	Minérale	68	4	-1,7
16.	Cantin	Minérale	70	26,7	1,5
17.	Tran <i>et al.</i>	Lisier de porcs	102	-5,8	-1,6
18.	Tran <i>et al.</i>	Lisier de porcs	102	28	6,2
19.	Tran <i>et al.</i>	Lisier de porcs	102	67	18,4
20.	Cantin	Minérale	104	0	-2,4
21.	Zhang <i>et al.</i>	Minérale et fumier de bovins	104	138	44,7
22.	Zhang <i>et al.</i>	Minérale et fumier de bovins	104	117	31,4
23.	Rivest	Minérale et lisier de porcs	107	8,5	-0,4
24.	Giroux et Lemieux	Minérale	107	-10,3	-10
25.	Giroux et Lemieux	Minérale	107	9,5	-0,7
26.	Giroux et Lemieux	Minérale	107	30,7	10,7
27.	Zhang <i>et al.</i>	Minérale et fumier de bovins	120	55,8	18,2
28.	Zhang <i>et al.</i>	Minérale et fumier de bovins	120	34,1	10,9
29.	Cantin	Minérale	122	13,0	-3,1
30.	Bruulsema	Minérale	131	-9,6	-3,2
31.	Tremblay <i>et al.</i>	Minérale	135	3,4	-3,0
32.	Tremblay <i>et al.</i>	Minérale	135	-7,6	-4,9
33.	Tremblay <i>et al.</i>	Minérale	135	-19,3	-7,2
34.	Bruulsema	Minérale	148	-19,6	-6,4

Tableau 7 : Relation entre le bilan de P à la surface du sol et la variation de la teneur en P Mehlich-3 des sols riches et très riches

#	Source	Type de fumure	P initial du sol (kg P M-3/ha)	Moyenne annuelle du bilan de P (kg P/ha)	Variation moyenne annuelle du sol (kg P M-3/ha)
1.	Cantin	Minérale	152	25,1	1,5
2.	Cantin	Minérale	154	1,7	-4,3
3.	Bruulsema	Minérale	167	11,9	9,8
4.	Zhang <i>et al.</i>	Minérale et fumier de bovins	177	2,8	1,8
5.	Zhang <i>et al.</i>	Minérale et fumier de bovins	184	18,4	8,8
6.	Rivest	Minérale et fumier de bovins	190	3,8	-12,2
7.	Bruulsema	Minérale	191	-5,0	-10,8
8.	Rivest	Minérale et fumier de bovins	204	0,4	-13,0
9.	Rivest	Minérale et fumier de bovins	215	-6,1	-16,4
10.	Zhang <i>et al.</i>	Minérale	229	1,5	0
11.	Rivest	Minérale et fumier de bovins	230	3,1	-19,2
12.	Rivest	Minérale et fumier de bovins	247	-5,4	-6,3
13.	Rivest	Minérale et fumier de bovins	247	-0,5	-16,2
14.	Rivest	Minérale et fumier de bovins	253	-4,8	-12,2
15.	Rivest	Minérale et fumier de bovins	264	-0,9	-18,0
16.	Rivest	Minérale et fumier de bovins	280	-7,3	-22,4
17.	Rivest	Minérale et fumier de bovins	294	3,6	-22,3
18.	Zhang <i>et al.</i>	Minérale	353	86	16,3
19.	Giroux	Minérale	359	-19,0	-6,9
20.	Giroux	Minérale	366	-7,0	-6,2
21.	Cantin	Minérale	368	-12,7	-25,1
22.	Giroux	Minérale	369	6,4	-2,1
23.	Rivest	Minérale et fumier de bovins	407	-0,3	-24,3
24.	Cantin	Minérale	411	-0,6	-23,2

La pente de la régression pour les sols pauvres et moyens (pente = 0,305) comparée à celle des sols riches (pente = 0,372) indique que les sols pauvres et moyens sont plus difficiles à enrichir que les sols riches. Pour les sols pauvres et moyens, l'apport de 3,28 kg P/ha appliqué au-delà des exportations enrichit le sol de 1 kg P Mehlich-3/ha. Pour les sols riches, l'apport de 2,69 kg P/ha appliqué au-delà des exportations enrichit de 1 kg P Mehlich-3/ha. La figure 3 démontre un autre phénomène intéressant. Lorsque les apports de P sont égaux aux exportations de P (bilan de P équilibré), les sols pauvres et moyens montrent une diminution annuelle de la teneur en P des sols de 2,5 kg P Mehlich-3/ha, alors que les sols riches et très riches ont une diminution de 10,5 kg P Mehlich-3/ha. Un bilan de P équilibré réduit la teneur en P Mehlich-3 des sols riches et très riches à un rythme plus rapide que pour les sols pauvres et moyens. La rétroversion des phosphates serait donc très active dans ces sols.

En l'absence de fumure en P ou en utilisant seulement une fumure de démarrage, on doit s'attendre à une diminution de la teneur en P des sols d'autant plus forte que leur teneur en P Mehlich-3 est élevée. Sur le plan environnemental, on pourra, par un bilan équilibré de P, ramener les sols très riches à des niveaux plus adéquats en des temps relativement courts. Dans ces sols, un bilan équilibré en P permet de concilier l'épandage des engrais de ferme à des doses agronomiquement acceptables avec la réduction environnementalement souhaitable des teneurs en P Mehlich-3. La dose de P qui maintient la teneur en P Mehlich-3 des sols a été de 8 kg P/ha supérieure au bilan pour les sols pauvres et moyens. Dans les sols riches, elle serait de 28 kg P/ha supérieure au bilan.

Un regroupement des sols par classe selon le bilan annuel de P permet de visualiser l'importance de ce paramètre sur l'évolution de la teneur en P des sols (Figure 4). Un bilan annuel négatif ou même légèrement positif (15 kg P/ha et moins) réduit la teneur en P des sols, et ce, d'autant plus que leur teneur en P est élevée. Par contre, un bilan de P fortement positif (supérieur à 15 kg P/ha) enrichit les sols, et ce, sans égard à leur teneur initiale en P.

Critères liés à la saturation en phosphore des sols

La saturation en P est de plus en plus considérée au niveau de la prise de décision agroenvironnementale. La réglementation québécoise mise sur ce critère pour modifier les approches de fertilisation de manière à donner priorité au phosphore lorsque la saturation en P des sols est trop élevée. Plus récemment, deux travaux de recherche en calibration, qui ont conduit à l'adoption d'une grille de fertilisation portant sur la pomme de terre (Khiari *et al.*, 2000) et d'une autre portant sur le maïs-grain (Pellerin, 2001); ces travaux ont également démontré la validité de ce critère sur le plan agronomique. Ces travaux permettent de se faire une meilleure idée de la fertilité des sols et des besoins en engrais P selon leurs caractéristiques. Ils démontrent un comportement fort différent des sols sableux acides fortement podzolisés comparativement aux sols gleysoïques plus lourds.

Ces résultats confirment les travaux de Rivest et Leduc (1998) et de Vézina *et al.* (2000) sur le comportement spécifique des groupes de sols selon leur texture et leur nature pédologique. L'interprétation des aspects agronomiques et du risque environnemental en relation avec la saturation en P des sols et leur nature pédologique est résumée dans les tableaux 8 et 9.

Tableau 8 : Critères agronomiques et environnementaux liés à la saturation en phosphore (P/AI) des sols fortement podzolisés

Critères	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5
Saturation en P (P/AI %)	0 – 4,5	4,6 – 9	9,1 – 15	15,1 – 35	> 35
Classe de fertilité	Faible	Moyenne	Riche	Très riche	Excessive
Déficiences des cultures	Élevée	Modérée	Faible	Aucune	Aucune
Besoin en engrais P	Très important	Important	Modéré	Démarré	Aucun ou démarré
Accroissement du rendement	Élevé	Modéré	Faible	Faible à nul	Nul
Solubilité du P	Très faible	Faible	Moyenne	Élevée	Très élevée
Évolution souhaitable de la fertilité	Redressement	Redressement	Maintien	Diminution	Diminution
Risque environnemental	Très faible	Faible	Modéré	Élevé	Très élevé

Adapté de Khiari *et al.*, 2000 et de Pellerin *et al.*, 2002.

Tableau 9 : Critères agronomiques et environnementaux liés à la saturation en phosphore (P/AI) des sols gleysoliques ou faiblement podzolisés

Critères	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5
Saturation en P (P/AI %)	0 – 2,5	2,6 – 5	5,1 – 10	10,1 – 20	> 20
Classe de fertilité	Faible	Moyenne	Riche	Très riche	Excessive
Déficiences des cultures	Élevée	Modérée	Faible	Aucune	Aucune
Besoin en engrais P	Très important	Important	Modéré	Démarré	Aucun ou démarré
Accroissement du rendement	Élevé	Modéré	Faible	Faible à nul	Nul
Solubilité du P	Très faible	Faible	Moyenne	Élevée	Excessive
Évolution souhaitable de la teneur en P	Redressement	Redressement	Maintien	Diminution	Diminution
Risque environnemental	Très faible	Faible	Modéré	Élevé	Très élevé

Adapté de Khiari *et al.*, 2000 et de Pellerin *et al.*, 2002

Les classes 1 et 2 sont associées à des problématiques agronomiques (infertilité des sols, besoin important en engrais, déficiences des cultures en P). Les classes 4 et 5 sont associées à des problématiques environnementales (excès de phosphore dans les sols, forte solubilité, risque important de perte de P). Pour sa part, la classe 3 représente une classe d'équilibre ou de compromis entre les contraintes agronomiques (infertilité des sols, besoin en engrais P, déficiences des cultures) et environnementales (solubilité du P, excès de fertilité, risque de perte de P). Elle représente également un compromis pour l'enrichissement en P des sols. On peut opter pour une approche de fertilisation qui va maintenir la teneur en P des sols dans cette classe de fertilité avec les engrais de ferme pour les raisons énumérées précédemment. Avec les engrais minéraux, il faut s'en tenir aux besoins en engrais P des grilles de référence en fertilisation. Pour les sols gleysoliques ou faiblement podzolisés, la classe de maintien de la

fertilité se situe entre 5 et 10 % de saturation alors qu'elle est entre 9,1 et 15 % de saturation pour les sols fortement podzolisés.

Conclusion

Plusieurs propriétés des sols liées à leur nature pédologique et à leur contenu chimique ont des incidences sur le devenir du P du sol et des engrais. Le phénomène de rétroversion tend à réduire le P disponible du sol et des engrais en les transformant en des formes peu solubles. Par contre, des applications excessives répétées sur les sols créent à la longue un accroissement de la solubilité du P et du risque environnemental. Par la fertilisation, il faut donc chercher à maintenir un niveau adéquat pour contrer l'infertilité des sols et les déficiences en P des cultures, d'une part, et, d'autre part, les excès de solubilité et de saturation en P des sols.

La présente étude a permis de mieux comprendre les relations entre le bilan de phosphore et l'évolution de la teneur en P Mehlich-3 des sols. La richesse initiale du sol et sa nature pédologique doivent être prises en compte pour établir l'évolution du P Mehlich-3 du sol. Les sols pauvres et moyens s'enrichissent plus lentement que les sols riches, suite à des apports de P, et d'autant moins s'ils sont podzolisés. Par contre, les sols très riches s'épuisent plus rapidement que les sols pauvres et moyens, suite à l'arrêt des apports de P ou suite à une fumure de démarrage seulement. Un bilan de P équilibré réduit de façon très marquée la teneur en P Mehlich-3 des sols très riches mais a assez peu d'effet sur la teneur en P Mehlich-3 des sols pauvres et moyens. L'objectif recherché de réduire la teneur en P des sols trop riches est atteint avec un bilan du P équilibré et même avec une fumure légèrement excédentaire au bilan. Le phénomène de rétroversion des phosphates est donc très actif dans ces sols.

Pour les sols gleysoliques ou faiblement podzolisés et pour les sols podzolisés, deux tableaux présentent les classes de richesse en P des sols. Ces tableaux sont utiles pour préciser notamment si la saturation en P des sols est appropriée, compte tenu de la nature pédologique des sols, et pour guider les pratiques de fertilisation.

Bibliographie

- Bayazid, A. 2001. Formes du P contribuant à l'indice de risque du phosphore au Québec. Thèse de maîtrise. Département des sols et génie agroalimentaire. Université Laval, Québec.
- Bruulsema, T. 2001. QFMA long-term P and K fertility research. Rapport de recherche 1996-2000 pour l'AFEQ.
- Giroux, M. et T.S. Tran. 1994. Étude des facteurs affectant l'évolution des teneurs en P et K des sols agricoles. *Agrosol* 7 (2) : 23-30.
- Giroux, M. et M. Lemieux. 1996. Effets de la fertilisation N, P et K et leurs interactions sur le rendement d'une prairie à dominance de mil (*Phleum pratense* L.), la teneur en éléments nutritifs de la récolte et l'évolution de la fertilité des sols. *Agrosol* 11 (1) : 40-47.
- Khiri, L., L.E. 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.
- Mailarino, A., B.M. Stewart, J.L. Baker, J.A. Downing et J. Sawyer. 2001. Background and basic concepts of the Iowa phosphorus index. A support document to NRCS field office note 25. NRCS and Iowa state Univ. 10 p.
- McCollum, R.E. 1991. Build-up and decline in soil phosphorus: 30 year trends on a typical Umprabuilt. *Agronomy J.* 83: 77-85.
- Pellerin, A., L.E. Parent, L. Khiri, C. Tremblay, C. Landry, R.R. Simard et J. Fortin. 2002. An agri-environmental phosphorus saturation model for corn in acid soils. *J. Environ. Qual.* (sous presse).
- Rehm, G.W., R.C. Sorenson et R.A. Wiese. 1984. Soil test values for phosphorus, potassium and zinc as affected by rate applied to corn. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 814-818.
- Richards, J.E., T.E. Bates et S.C. Sheppard. 1995. Changes in the forms and distribution of soil phosphorus due to long-term corn production. *Can. J. Soil Sci.* 75: 311-318.
- Rivest, R. et P. Leduc. 1998. Évaluation du risque de pollution diffuse associée au phosphore des sols classés excessivement riches. Bureau de renseignements agricoles de St-Hyacinthe. MAPAQ et Société d'Agriculture du comté de St-Hyacinthe. Rapport final 67 p.
- Tabi, M., L. Tardif, D. Carrier, G. Laflamme et M. Rompré. 1990. Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec. Rapport synthèse. 71 p. Entente auxiliaire Canada-Québec sur le développement agroalimentaire.
- Tisdale, S.L., W.L. Nelson et J.D. Beaton. 1985. Soil and fertilizer phosphorus. Dans *Soil fertility and fertilizers*. 4^e ed. Chapitre 8: 189-248.
- Tran, T.S., D. Côté et A. N'Dayegamiye. 1996. Effets des apports prolongés de fumier et de lisier sur l'évolution des teneurs du sol en éléments nutritifs majeurs et mineurs. *Agrosol* 9 (1) : 21-30.

Tremblay, G.J., L. Robert, P. Fillon, G. Gorvaerts, R. Mongeau, J. Filiatrault, J.M. Beausoleil, G.F. Moreau et T.S. Tran. Effets à long terme de deux régies culturales et des fertilisations minérales azotées et phosphatées dans une rotation maïs-soya sur un sol classé bon en P. *Can. J. Plant Sci.* (sous presse).

Vézina, L., D. Carrier, M. Giroux et M. Rompré. 2000. Proposition de regroupement des sols du Québec selon leur capacité de fixation du phosphore en relation avec leurs caractéristiques pédologiques. *Agrosol* 11 (1) : 15-39.

Webb, J.R., A.P. Mallarino et A.M. Blackmer. 1992. Effects of residual and annually applied phosphorus on soil test values and yields of corn and soybean. *J. Prod. Agric.* 5 (1) : 148-152.

Zhang, T.Q., A.F. MacKenzie et B.C. Liang. 1995. Long-term changes in Mehlich-3 extractable P and K in a sandy clay loam soil under continuous corn (*Zea mays L.*). *Can. J. Soil Sci.* 75 : 361-367.