

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

* M. GIROUX¹ ET R. ROYER¹

RÉSUMÉ - M. Giroux et R. Royer, 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. Une étude a été réalisée pour mesurer l'effet de trois doses d'engrais P (0, 30 et 60 kg P₂O₅/ha) appliquées annuellement sur les rendements de cultures commerciales (maïs-grain, soya ou blé) et l'évolution des teneurs, de la saturation et de la solubilité du P dans deux sols très riches pendant huit années. Les rendements des cultures n'ont pas été affectés de façon significative par la fumure P. La teneur initiale en P Mehlich-3 du loam sableux Du Contour était en moyenne de 394 kg /ha en 1996. Après huit années de culture, elle était de 270, 281 et 294 kg P/ha respectivement pour les doses 0, 30 et 60 kg P₂O₅/ha. La teneur initiale en P du loam Sainte-Rosalie était en moyenne de 354 kg/ha en 1997. Après huit années de culture, elle est respectivement de 236, 253 et 315 kg P/ha pour les doses 0, 30 et 60 kg P₂O₅/ha. Les exportations moyennes annuelles de P ont été de 46 kg P₂O₅/ha dans le sol du Contour et de 44 kg P₂O₅/ha dans le sol Sainte-Rosalie. Le phénomène de rétroversion des phosphates est actif dans ces sols. Même pour la dose 60 kg P₂O₅/ha, supérieure aux exportations, une diminution de la teneur en P Mehlich-3, en P soluble et de la saturation en P est observée dans les deux sols. Les taux annuels de réduction de la saturation en P du sol Du Contour ont été de 1,087, 0,891 et 0,750 %/an respectivement pour les doses 0, 30 et 60 kg P₂O₅/ha. Le temps nécessaire pour atteindre le seuil de saturation en P de 13,1 % de la réglementation québécoise est de 10 ans pour la dose 0 kg P₂O₅/ha, de 12 ans pour la dose 30 kg P₂O₅/ha et de 14 ans pour la dose 60 kg P₂O₅/ha. Les taux annuels de réduction de la saturation en P du sol Sainte-Rosalie ont été de 1,034, 0,883 et 0,642 %/an respectivement pour les doses 0, 30 et 60 kg P₂O₅/ha. Le temps nécessaire pour atteindre le seuil de saturation en P de 13,1 % est de 8 ans pour la dose 0 kg P₂O₅/ha, de 10 ans pour la

dose 30 kg P₂O₅/ha et de 14 ans pour la dose 60 kg P₂O₅/ha. Les seuils critiques de saturation en P, correspondant à une concentration de P soluble à l'eau de 9,7 mg P/kg, déterminés à partir de la courbe de solubilité du P, ont été de 15,0 % pour le loam sableux Du Contour et de 10,0 % pour le loam Sainte-Rosalie.

Mots clés : Phosphore assimilable, évolution des teneurs en P, bilan du P, rétroversion du P, saturation en P, P soluble à l'eau.

ABSTRACT - M. Giroux and R. Royer, Long term effects of phosphate applications on yields, evolution of P soil test, saturation and solubility in two very rich soils. *Agrosolutions* 18 (1): 17-24. A study was carried out to measure the effect of three P fertilizer rates (0, 30 and 60 kg P₂O₅/ha) applied annually on yields of cash crops (corn, soybean or wheat) and evolution of the soil test values, saturation and P solubility in two very rich soils during eight years. Yields were not significantly affected by P fertilizer. The initial soil test P value in 1996 was 394 kg P/ha for the Du Contour loamy sand. Eight years after, it were 270, 281 and 294 kg P/ha respectively for the 0, 30 and 60 kg P₂O₅/ha rates. The initial soil test P value in 1997 was 354 kg P/ha for the Sainte-Rosalie loam. Eight years after, it were 236, 253 and 315 kg P/ha respectively for the 0, 30 and 60 kg P₂O₅/ha rates. The annual P exportations during this experiment were 46 and 44 kg P₂O₅/ha respectively for the Du Contour and the Sainte-Rosalie soils. The phosphate reversion process is active in these soils. Even the 60 kg P₂O₅/ha rate, higher than P exportation, decreased Mehlich-3 P, water extractable P and P saturation in both soils. The annual rates of P saturation decrease in the Du Contour soil were 1.087, 0.891 and 0.750%/yr respectively for 0, 30 et 60 kg P₂O₅/ha rates. The P saturation value of 13.1% of the Quebec regulation is achieved after 10 years for the 0 kg P₂O₅/ha rate, 12 years for the 30 kg P₂O₅/ha rate and 14 years for the 60 kg P₂O₅/ha rate. The annual

1. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA), 2700 rue Einstein, Québec (Québec), G1P 3W8, Canada

*Auteur pour la correspondance : téléphone : 418 644-6838, télécopieur : 418 644-6855, courriel : marcel.giroux@irda.qc.ca

rates of P saturation decrease in the Sainte-Rosalie soil were 1.034, 0.883 and 0.642%/yr respectively for the 0, 30 and 60 kg P₂O₅/ha rates. The P saturation value of 13.1% is achieved after 8 years for the 0 kg P₂O₅/ha rate, 10 years for the 30 kg P₂O₅/ha rate and 14 years for the 60 kg P₂O₅/ha rate. The critical P saturation values, corresponding to 9.7 mg P/L of water extractable P, determined from P solubility curve of each soil, were 15.0% for the Du Contour loamy sand and 10.0% for the Sainte-Rosalie loam.

Key words : Available phosphorus, evolution of soil test P, P balance, P reversion, P saturation, water extractable P

Introduction

Le maintien d'un niveau adéquat de phosphore dans les sols agricoles, suffisant pour la croissance des plantes mais sans excès du point de vue environnemental, est un élément important pour réduire les pertes de P sur les fermes. Afin d'éviter une accumulation excessive de P, la réglementation sur les exploitations agricoles en vigueur au Québec détermine un dépôt maximal de P sur les terres, variable selon les cultures, les rendements, la teneur et la saturation en P des sols. De plus, elle stipule que l'agronome doit, par ses recommandations, faire en sorte que le niveau de saturation du sol en phosphore (P/Al) soit abaissé à une valeur inférieure à 7,6 % pour un sol avec une teneur en argile supérieure à 30 et à 13,1 % pour un sol avec une teneur en argile égale ou inférieure à 30 % et qu'il soit maintenu sous ce seuil (Gouvernement du Québec, 2007). Le taux annuel de réduction de la teneur et de la saturation en P des sols et le temps nécessaire pour atteindre les niveaux prescrits par la réglementation sont encore assez mal connus selon les apports de P au sol. L'évolution de la teneur en P assimilable et de la saturation en P d'un sol dépend des quantités apportées, des exportations de P, de la teneur initiale en P assimilable et de la rétroversion du phosphore liée à la nature pédologique et physico-chimique des sols (Giroux et al., 2002).

Les apports de P par les engrais et les exportations par les récoltes permettent

d'établir un bilan annuel du P pour chaque parcelle. Ce bilan constitue un élément important de l'évolution de la teneur en P assimilable des sols. Différentes possibilités peuvent survenir en rapport avec ce bilan et conduire soit à une diminution, au maintien ou à l'accroissement de la teneur en P assimilable des sols. Giroux et al. (2002) ont étudié l'évolution de la teneur en P des sols en relation avec le bilan du P. Lorsque les apports de P sont inférieurs aux exportations (bilan négatif), une diminution de la teneur en P assimilable des sols est observée en sols riches mais beaucoup moins en sols pauvres. Dans le cas où le bilan est équilibré ou modérément excédentaire, une baisse du P assimilable est observée dans les sols riches et un maintien dans les sols pauvres. Lorsque le bilan du P est excédentaire d'environ 30 kg P₂O₅/ha, la rétroversion du P compense pour le surplus du bilan de sorte que les sols maintiennent leur teneur en P assimilable. Dans le cas où les apports de P sont importants et excèdent de plus de 30 kg P₂O₅/ha les exportations, une augmentation du P assimilable est observée dans tous les sols.

L'évolution des teneurs en P assimilable dépend également des caractéristiques physico-chimiques du sol et de sa nature pédologique. On trouve dans les sols plusieurs tonnes par hectare d'oxydes de fer et d'aluminium libres, surtout dans les sols podzologiques. La capacité de fixation du phosphore est particulièrement influencée par la teneur en aluminium libre des sols. Dans les sols argileux, le contenu en calcium et en magnésium joue un rôle mais le fer et l'aluminium exercent aussi un effet. Dans les sols calcaires, c'est le carbonate de calcium libre qui est responsable de la fixation du P. Lorsque le phosphore est adsorbé ou précipité, un équilibre s'établit avec la solution du sol et celui-ci dépend de la nature chimique des produits de réaction, des formes de P et du pH. Cet équilibre est dynamique; il va changer dans le temps. À long terme, les phosphates précipités vont évoluer sur le plan chimique vers des formes de plus en plus stables. Pour le calcium, ces formes peuvent être des phosphates dicalciques, tricalciques, octocalciques ou des apatites. Pour le fer et l'aluminium, les phosphates vont être transformés en minéraux très stables, tels que la strengite et la variscite. Comme cette évolution rend de

moins en moins disponible le phosphore résiduel des engrais, on appelle ce phénomène la rétroversion des phosphates. Il est important d'en connaître la nature car il constitue un élément important de l'évolution des teneurs en P assimilable des sols.

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 réagir différemment, être plus ou moins disponibles aux cultures, enrichir plus ou moins les sols selon leur nature pédologique et leur texture. Les courbes de solubilité du phosphore sont également affectées par les processus pédologiques, le pH et la texture des sols, ce qui explique les seuils critiques de saturation de 7,6 % pour les sols argileux avec plus de 30 % d'argile, généralement gleysoliques et de 13,1 % pour les autres sols (Pellerin et al., 2006a). Ces valeurs représentent un seuil agroenvironnemental moyen pour chacun de ces groupes de sol mais il existe un seuil environnemental spécifique à chaque sol. Il peut être établi à partir de la courbe de solubilité du P, correspondant à une teneur en P soluble à l'eau de 9,7 mg P/L extrait avec la méthode Sissingh (1971); Khiari et al. (2000). Pellerin et al. (2006b) ont démontré que le seuil critique de saturation varie entre les types de sol non seulement au plan environnemental mais aussi au plan agronomique, ce qui affecte la réponse des cultures aux engrais P. Ils ont déterminé le besoin en engrais P du maïs selon deux groupes texturaux de sols, soit ceux avec 30 % ou moins d'argile et ceux avec plus de 30 % d'argile. Pour une même saturation en P, le besoin en engrais P est moindre dans les sols avec plus de 30 % d'argile.

Au Québec, les résultats de recherche indiquent qu'il faut généralement appliquer 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 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) ont obtenu une valeur de 2,3 kg P/ha au Wisconsin.

Par contre, dans des sols sableux très pauvres, Rehm et al. (1984) ont trouvé des rapports beaucoup plus élevés qui variaient de 5,6 à 9,3 kg P/ha pour chaque augmentation de 1 kg P/ha. Certains sols sont donc difficiles à enrichir et on ne peut pas facilement prédire l'accroissement des teneurs en P d'un sol sans examiner soigneusement ses caractéristiques. La modélisation de l'évolution des teneurs en P d'un sol devrait donc tenir compte en plus du bilan du P, de sa teneur en P assimilable, de sa nature pédologique et de sa texture qui déterminent la capacité de rétroversion du P des sols et sa solubilité.

L'absence de fertilisation phosphatée va provoquer une diminution progressive de la teneur en P disponible dans le sol. Une expérience menée en serre sur l'épuisement du phosphore du sol suite à des cultures d'orge, de maïs et de dactyle sans apport de P, a démontré que la vitesse d'épuisement dépendait surtout des exportations par les cultures et de la teneur initiale en P du sol (Giroux et Tran, 1994). 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 a été de 23 kg P/ha par an, suite à l'arrêt de la fertilisation. Dans les parcelles dont la teneur initiale en P Mehlich-3 varie de faible à riche, soit de 78 à 200 kg P/ha, le taux de diminution est respectivement de 3,2 et 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 à plus de

75 kg P_2O_5 /ha selon la richesse des sols dans une rotation maïs-soya. Plus la teneur en P assimilable des sols est élevée, plus la dose de P nécessaire au maintien de la fertilité est élevée.

La présente étude a pour objectif d'établir l'effet des doses de P appliquées sur les rendements des cultures, les exportations et le bilan du P. L'évolution des teneurs en P assimilable et en P soluble à l'eau a été déterminée dans deux champs de texture différente sous cultures commerciales. On a également mesuré les taux de diminution de la saturation en P et le temps nécessaire pour ramener les sols à leur niveau critique de saturation selon les doses de P. Les courbes de solubilité du P à l'eau selon la saturation ont été établies et le seuil agro-environnemental critique de saturation spécifique à chaque sol a été déterminé.

Matériel et méthodes

Une expérience comportant trois doses de P (0, 30 et 60 kg P_2O_5 /ha) a été réalisée à Saint-Hyacinthe en Montérégie sur deux séries de sol très riche en P. Le loam sableux Du Contour et le loam Sainte-Rosalie ont été cultivés pendant 8 ans sous cultures commerciales, soit deux cycles de rotation maïs-maïs-soya-blé. La description des sols est présentée au tableau 1. Il s'agit de deux sols gleysoliques, faiblement fixateurs pour le P, avec moins de 800 mg/kg d'aluminium extrait avec la méthode Mehlich-3. Les sols gleysoliques présentent une solubilité du P plus élevée que les sols podzoliques lorsque s'accroît la saturation en P et ils présentent aussi un risque environnemental plus grand (Pellerin et al., 2006a). C'est pourquoi nous

les avons étudiés dans cette étude. L'essai a débuté en 1996 pour le sol Du Contour et en 1997 pour le sol Sainte-Rosalie. La description détaillée des hybrides ou des cultivars utilisés et de leur taux de semis est présentée au tableau 2. Les champs ont été labourés annuellement à une profondeur de 20 cm. La préparation du sol au printemps est faite avec un passage d'une herse à disque suivi d'un passage de vibroculteur, de l'application à la volée des engrais et d'un autre passage de vibroculteur pour incorporer les engrais.

Dans le cas du maïs-grain, les engrais phosphatés ont été appliqués en bandes au semis, 5 cm à côté et 5 cm sous la semence aux doses variables de P telles que décrites. Des doses d'engrais minéraux de 160 kg N/ha et de 30 kg K_2O /ha ont été appliquées à la volée en pré-semis et incorporées dans les 10 premiers cm de sol. Dans le cas du blé, les engrais ont été appliqués en pré-semis et incorporés aux doses de 80 kg N/ha, 30 kg K_2O /ha et aux doses variables de P décrites. Dans le cas du soya, les engrais ont été appliqués en pré-semis et incorporés aux doses de 20 kg N/ha, 30 kg K_2O /ha et aux doses variables de P décrites. Nous avons procédé au mélange des engrais à partir d'engrais simples dont la pureté a été vérifiée. Les sources d'engrais utilisées ont été le nitrate d'ammonium (34-0-0), le superphosphate triple (0-46-0) et le chlorure de potassium (0-0-60).

Des sols ont été prélevés périodiquement à l'automne dans la couche de labour (0-20 cm) afin de suivre l'évolution du P dans les sols. Les teneurs en P assimilable ont été extraites selon la méthode Mehlich-3 (Mehlich, 1984). La saturation en P a été déterminée selon le rapport P/Al Mehlich-3. Le P soluble à l'eau a été extrait selon la

Tableau 1. Analyse des sols utilisés au début et à la fin de l'expérience.

Série de sols	Année	pH eau	M.O. (%)	Mehlich-3				Granulométrie		
				K	Ca	Mg	Al	Sable	Limon	Argile
Ordre pédologique				----- (kg/ha) -----				----- (%) -----		
Du Contour	1996	6,32	1,94	277	2046	119	763	59	28	13
Gleysol	2003	6,38	1,38	216	1964	107	764			
Sainte-Rosalie	1997	6,74	2,42	397	4713	354	704	37	37	26
Gleysol	2004	6,82	2,48	373	4490	332	755			

Tableau 2. Description des cultures et des taux de semis pour les huit années de l'expérience.

SÉRIE DU CONTOUR			
Année	Cultures	Hybrides ou cultivars	Taux de semis
1996	Maïs-grain	Pioneer 3921 2700 UTM	76 000 grains/ha
1997	Maïs-grain	Pioneer 3921 2700 UTM	76 000 grains/ha
1998	Soya	Nordet	115 kg/ha
1999	Blé	Casavant	145 kg/ha
2000	Maïs-grain	Pioneer 38P05 2850 UTM	74 000 grains/ha
2001	Maïs-grain	Pioneer 39D81 2850 UTM	80 000 grains/ha
2002	Soya	Korada	115 kg/ha
2003	Blé	Casavant	145 kg/ha
SÉRIE SAINTE - ROSALIE			
1997	Maïs-grain	Pioneer 3921 2700 UTM	76 000 grains/ha
1998	Maïs-grain	Pioneer 3921 2700 UTM	76 000 grains/ha
1999	Soya	Korada	115 kg/ha
2000	Blé	Casavant	145 kg/ha
2001	Maïs-grain	Pioneer 39 D 81	80 000 grains/ha
2002	Maïs-grain	Pioneer 3921 2700 UTM	74 000 grains/ha
2003	Soya	Korada	115 kg/ha
2004	Blé	Saku	170 kg/ha

méthode Sissingh (1971) dans un rapport sol-eau de 1 : 60. Le P total a été extrait selon la méthode EPA avec HCl et HNO₃ (EPA, 1996).

Les récoltes du soya et du blé ont été effectuées au moyen d'une moissonneuse-batteuse qui récoltait une superficie de 12,1 m²/parcelle (1,21 m x 10 m). La récolte du maïs-grain a été effectuée à la main en prélevant les épis sur deux rangs de 5 m, soit 7,5 m²/parcelle. Les épis ont été passés dans une égraineuse. Les rendements frais des grains ont été mesurés et l'humidité a été déterminée après séchage à l'étuve d'un échantillon de 500 g à 70° C pendant quatre jours. Les rendements en matière sèche, la teneur en P des grains et les exportations de P ont été mesurés annuellement pour chaque parcelle et exprimés en kg/ha. Pour le maïs-grain et le soya, les tiges ont été laissées aux champs et ne sont pas considérées dans les exportations. Pour le blé, les pailles ont été retirées des champs et ont été considérées dans le calcul des exportations. Un bilan du P a été établi annuellement et pour toute la durée de l'essai selon chacune des doses P en établissant la différence entre les quantités de P appliquées et celles exportées des parcelles.

Le dispositif expérimental était organisé en

blocs aléatoires, répétés quatre fois et comportait trois doses de P, soit douze parcelles expérimentales par champ. Les parcelles avaient une dimension de 6 m x 10 m. Une analyse de variance de l'effet des traitements a été effectuée sur SAS selon la procédure Anova afin de déterminer la

valeur F et le niveau de probabilité de l'effet des traitements. Le coefficient de variation a été déterminé à chacun des sites et pour chacune des cultures comme indicateur de la précision des essais.

Résultats

Rendement des cultures et teneur en P des sols

Les rendements des cultures n'ont pas été affectés de façon significative par les fumures P dans aucun des champs (tableaux 3 et 4). La teneur élevée des sols en P Mehlich-3 explique ces résultats. Elle était de 394 kg P/ha dans le sol Du Contour et de 354 kg P/ha dans le sol Sainte-Rosalie, ce qui était suffisant pour combler tous les besoins en P des cultures pendant toute la durée de l'essai. La saturation initiale en P, supérieure à 20 %, excédait le seuil agro-environnemental de la réglementation québécoise de 13,1 % correspondant à ces sols. À la fin de l'expérience, le niveau de saturation dépassait encore ce seuil dans les deux sols. Ces résultats démontrent que les réserves de phosphore assimilable accumulées à des niveaux très élevés peuvent suffire au besoin des cultures pendant plusieurs

Tableau 3. Effet de la fertilisation phosphatée sur le rendement des cultures dans le loam sableux Du Contour selon les doses annuelles de P appliquées.

Traitements (kg P ₂ O ₅ /ha)	Maïs-grain		Soya	Blé	Maïs-grain		Soya	Blé
	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
	Rendement (t/ha M.S.)							
0	6,739	6,938	3,011	3,072	5,984	7,815	2,576	1,557
30	7,161	6,782	3,066	3,303	6,131	7,409	2,718	1,576
60	7,172	6,393	3,086	3,259	5,858	7,095	2,751	1,761
F	1,21	0,49	0,16	1,14	1,37	1,42	1,85	2,02
Pr > F	0,3611	0,6373	0,8519	0,3805	0,3233	0,3123	0,2369	0,2140
C.V. (%)	6,37	11,92	6,24	7,15	3,91	8,14	5,11	9,72

Tableau 4. Effet de la fertilisation phosphatée sur le rendement des cultures dans le loam Sainte-Rosalie selon les doses annuelles de P appliquées.

Traitements (kg P ₂ O ₅ /ha)	Maïs-grain		Soya	Blé	Maïs-grain		Soya	Blé
	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
	Rendement (t/ha M.S.)							
0	5,000	8,443	3,892	3,470	8,277	7,684	3,053	2,432
30	5,250	8,199	3,874	3,686	8,324	7,509	3,044	2,545
60	4,666	8,667	3,903	3,719	8,518	7,892	3,026	2,557
F	1,54	0,93	0,02	1,38	0,85	0,51	0,02	0,67
Pr > F	0,2880	0,4435	0,9839	0,3221	0,4742	0,6244	0,9795	0,5469
C.V. (%)	9,48	5,74	5,93	5,98	3,31	6,98	6,27	6,72

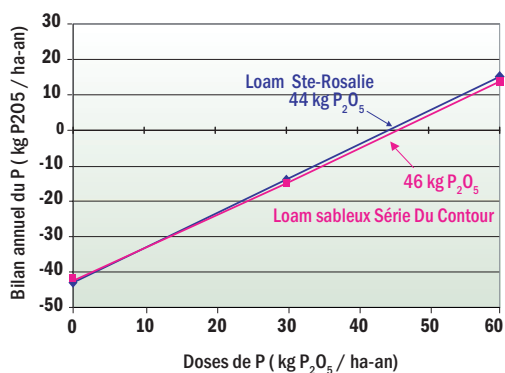


Figure 1. Relation entre le bilan annuel moyen du phosphore et les doses de P appliquées dans une rotation maïs-maïs-soya-blé.

années sans que des apports d'engrais soient nécessaires. Le niveau souhaitable d'entretien du P était donc dépassé dans ces deux sols.

Bilan du P et évolution des teneurs dans les sols

En 1996, la teneur initiale en P du sol Du Contour était en moyenne de 394 kg P/ha. En 2003, après une période de 8 ans en 2003, elle était respectivement de 270, 281 et 294 kg P/ha pour les doses 0, 30 et 60 kg P_2O_5 /ha (tableau 6, figure 2). La réduction moyenne annuelle de P Mehlich-3 du sol a été de -15,1 kg P/ha-an dans la parcelle témoin sans engrais P, de -14,8 kg P/ha-an avec la dose 30 kg P_2O_5 /ha et de -12,1 kg P/ha-an avec la dose 60 kg P_2O_5 /ha. La teneur initiale en P du sol Sainte-Rosalie en 1997 était en moyenne de 354 kg P/ha. Après une période de 8 ans, en 2004, elle est respectivement de 236, 253 et 315 kg P/ha pour les doses 0, 30 et 60 kg P_2O_5 /ha (tableau 6, figure 2). La réduction moyenne annuelle de P Mehlich-3 a été de -13,5 kg P/ha pour le témoin sans engrais P, de -10,1 kg P/ha-an pour la dose 30 kg P_2O_5 /ha-an et de -8,5 kg P/ha-an pour la dose 60 kg P_2O_5 /ha.

Pendant les huit années de culture, les exportations cumulatives en P ont été de 344, 351 et 359 kg P_2O_5 /ha respectivement pour les doses 0, 30 et 60 kg P_2O_5 /ha dans le champ Du Contour. Elles ont été de 340, 360 et 370 kg P_2O_5 /ha respectivement pour les mêmes doses dans le champ Sainte-Rosalie. En 8 ans, le bilan net cumulatif des apports – les exportations de P (moyenne annuelle entre parenthèses) a été

de -344 kg P_2O_5 /ha (-43,0 kg P_2O_5 /ha-an) pour le témoin sans engrais P, de -111 kg P_2O_5 /ha (-13,9 kg P_2O_5 /ha-an) pour la dose de 30 kg P_2O_5 /ha et de 121 kg P_2O_5 /ha (15,1 kg P_2O_5 /ha-an) pour la dose de 60 kg P_2O_5 /ha dans le champ Du Contour. En 8 ans, le bilan net cumulatif des apports – les exportations de P (moyenne annuelle entre parenthèses) a été de 340 kg P_2O_5 /ha (-42,5 kg P_2O_5 /ha-an) pour le témoin sans engrais P, de -120 kg P_2O_5 /ha (-15,0 kg P_2O_5 /ha-an) pour la dose de 30 kg P_2O_5 /ha et de 110 kg P_2O_5 /ha (13,8 kg P_2O_5 /ha-an) pour la dose de 60 kg P_2O_5 /ha dans le champ Sainte-Rosalie (tableau 6).

La figure 1 permet de déterminer la relation entre le bilan du P et les doses de P appliquées. La dose de P correspondant à un bilan équilibré est de 46 kg P_2O_5 /ha dans le sol du Contour et de 44 kg P_2O_5 /ha dans le sol Sainte-Rosalie. La dose maximale appliquée de 60 kg P_2O_5 /ha excède d'environ 15 kg P_2O_5 /ha la dose d'équilibre du bilan (44 et 46 kg P_2O_5 /ha). Une réduction de la teneur en P des sols est obtenue avec une dose excédentaire à celle qui équilibre le bilan. Giroux et al. (2002 et

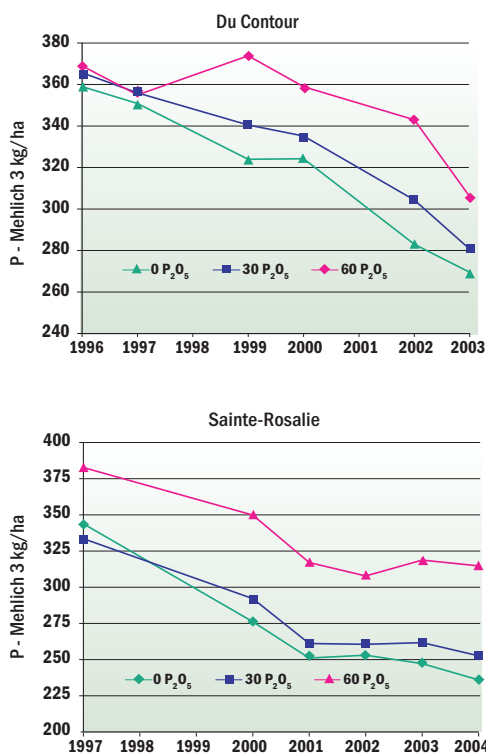


Figure 2. Évolution de la teneur en P Mehlich-3 des sols Du Contour et Sainte-Rosalie selon les doses de P appliquées annuellement.

2005) ont démontré qu'une dose de P modérément excédentaire à la dose d'équilibre du bilan pouvait réduire la teneur en P des sols. Ces résultats confirment ces observations.

Pour le maïs-grain, la réglementation québécoise prescrit un dépôt maximal de 50 à 70 kg P_2O_5 /ha selon les rendements dans des sols dont la teneur en P Mehlich-3 est entre 251 et 500 kg P/ha, avec plus de 10 % de saturation. Les sols utilisés dans cette expérience se situent dans cette catégorie. Nos résultats démontrent qu'il y aura pour ces niveaux d'application de P, une réduction de la teneur et de la saturation en P des sols. L'application d'un bilan équilibré ou modérément excédentaire est une mesure efficace de réduction de la teneur et de la saturation en P des sols très riches. La réglementation précise également un seuil agroenvironnemental critique au-delà duquel la saturation en P des sols devrait être abaissée. Pour les sols avec 30 % d'argile et moins, le seuil de saturation en P est fixé à 13,1 %. Pour les sols avec plus de 30 % d'argile, le seuil est de 7,6 %. Comme les deux sols de notre étude ont moins de 30 % d'argile, avec 13 % pour le loam

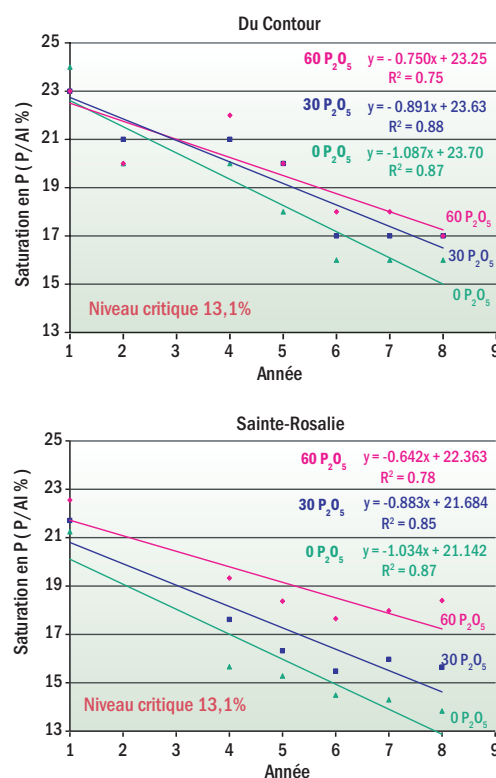


Figure 3. Évolution de la saturation en P des sols Du Contour et Sainte-Rosalie selon les doses de P appliquées annuellement.

Tableau 5. Teneur en P total, assimilable et soluble des sols au début et à la fin de l'expérience selon les doses de P appliquées

Traitements	Série du Contour							
	1996				2003			
	P total	P Mehlich-3	P/AI	P soluble	P total	P Mehlich-3	P/AI	P soluble
----- (mg/kg) -----	(%)	(mg/kg)	----- (mg/kg) -----	(%)	(mg/kg)			
0 P ₂ O ₅	636	175	22,5	14,2	645	121	15,4	9,7
30 P ₂ O ₅	648	178	24,1	15,3	593	122	16,5	10,7
60 P ₂ O ₅	666	175	22,6	14,0	609	131	17,4	11,4

Traitements	Série du Contour							
	1997				2004			
	P total	P Mehlich-3	P/AI	P soluble	P total	P Mehlich-3	P/AI	P soluble
----- (mg/kg) -----	(%)	(mg/kg)	----- (mg/kg) -----	(%)	(mg/kg)			
0 P ₂ O ₅	850	153	21,2	21,8	782	105	13,8	13,7
30 P ₂ O ₅	813	149	21,7	19,6	755	113	15,6	15,8
60 P ₂ O ₅	829	171	22,6	20,1	819	141	18,4	18,3

sableux Du Contour et 26 % pour le loam Sainte-Rosalie et que les exigences réglementaires font référence à un seuil de 13,1 %, nous avons déterminé le temps nécessaire pour atteindre cette saturation dans les sols selon les doses de P appliquées.

Les courbes de tendance de l'évolution de la saturation en P indiquent une diminution linéaire de la saturation en P pour la période étudiée (figure 3). Les taux annuels de réduction de la saturation dans le sol Du Contour sont de 1,087, 0,891 et 0,750 %/an respectivement pour les doses 0, 30 et 60 kg P₂O₅/ha. Le temps nécessaire pour atteindre le seuil de saturation en P de 13,1 % est de 10 ans pour la dose 0 kg P₂O₅/ha, de 12 ans pour la dose 30 kg P₂O₅/ha et de 14 ans pour la dose 60 kg P₂O₅/ha. Les taux annuels de réduction de la saturation en P des sols dans le sol Sainte-Rosalie sont de 1,034, 0,883 et 0,642 %/an respectivement pour les doses 0, 30 et 60 kg P₂O₅/ha. Le temps nécessaire pour atteindre le seuil de saturation en P de 13,1 % est de 8 ans pour la dose 0 kg P₂O₅/ha, de 10 ans pour la dose 30 kg P₂O₅/ha et de 14 ans pour la dose 60 kg P₂O₅/ha. Rappelons que les doses de P qui ont équilibré le bilan ont été de 46 et 44 kg P₂O₅/ha respectivement dans le champ Du contour et dans le champ Sainte-Rosalie. Un bilan du P équilibré, correspondant à une dose moyenne annuelle d'environ 45 kg P₂O₅/ha, aurait donné un taux de réduction de la saturation intermédiaire entre celui obtenu pour les doses 30 et 60 kg P₂O₅/ha, soit environ 0,82 %/an dans le sol Du Contour et environ 0,76 %/an dans le sol Sainte Rosalie. Le

temps nécessaire pour atteindre le seuil critique de 13,1 % de saturation serait d'environ 13 ans dans les deux sols pour un bilan équilibré. Dans les sols très riches, le dépôt maximal de P prescrit par la réglementation permet d'atteindre les objectifs de réduction des teneurs en P en un temps relativement court même avec une dose de 60 kg P₂O₅/ha. Un bilan de P équilibré ou légèrement excédentaire est donc une mesure qui permet une réduction des teneurs et de la saturation en P des sols très riches.

Courbe de solubilité du P et seuil critique de saturation

Le niveau critique de saturation varie selon les sols. Khiari et al. (2000) proposent de le déterminer à partir de la relation entre la saturation en P et la teneur en P soluble à l'eau du sol, pour un niveau de solubilité du P de 9,7 mg P/kg. La figure 4 présente la relation entre la solubilité du P et la saturation en P de chacun des deux sols. Pour une même saturation en P, la teneur en P soluble des deux sols est très différente. La pente des deux droites diffère également. Le seuil environnemental critique de saturation en P sera donc différent dans les deux sols.

Dans le sol Du Contour, les résultats indiquent que la teneur en P soluble est de 14,0 à 15,3 mg P/L au début de l'expérience et de 9,7 à 11,4 mg P/L à la fin de l'expérience, selon les doses de P (tableau 5). La saturation en P correspondant à une solubilité du P de 9,7 mg P/L, calculée d'après l'équation apparaissant à la figure 4, est de

15,0 %. Les résultats indiquent qu'en 2003 un niveau de P soluble de 9,7 mg P/L est atteint dans la parcelle sans engrais P (figure 4). Cette valeur représente le niveau critique pour la réponse des cultures aux engrais P. Dans les parcelles recevant 30 et 60 kg P₂O₅/ha, les niveaux de solubilité du P sont respectivement de 10,7 et 11,4 mg P/L à la fin de l'expérience, légèrement plus élevés que le niveau critique. Selon les équations de la figure 3, le temps nécessaire pour amener le sol du Contour à son seuil critique de saturation de 15,0 % est de 8,0, 9,7 et 11,0 années respectivement pour les doses 0, 30 et 60 kg P₂O₅/ha.

Pour le sol Sainte-Rosalie, les résultats indiquent que la teneur en P soluble au début de l'expérience est de 19,6 à 21,8 mg P/L; elle est de 13,7 à 18,3 mg P/L à la fin de l'expérience selon les doses de P (tableau 5). La teneur en P soluble excède encore beaucoup le seuil critique de 9,7 mg P/L. Contrairement au sol Du Contour, le seuil agroenvironnemental critique de saturation en P pour le loam Sainte-Rosalie n'est pas encore atteint. Il est donc possible de réduire davantage la teneur et la saturation en P de ce sol sans qu'il réponde aux apports d'engrais P. Dans le sol Sainte-Rosalie, nous avons déterminé le seuil de saturation critique correspondant à une teneur en P soluble à l'eau de 9,7 mg P/L, à partir de la courbe de solubilité du P de la figure 4. Le seuil critique de saturation est de 10,0 %. Nous avons aussi déterminé le temps nécessaire pour atteindre ce seuil à partir des équations de la figure 3. Il est respectivement de 10,8, 13,2 et 19,3 années pour les doses 0, 30 et 60 kg

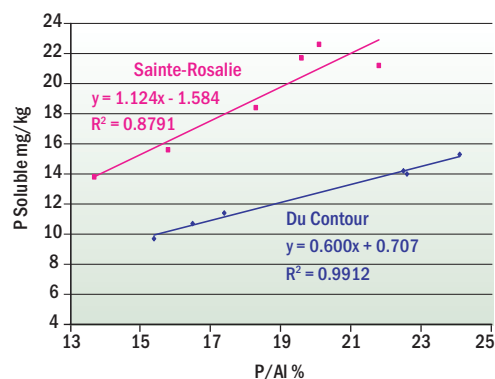


Figure 4. Relation entre le P soluble à l'eau et la saturation en P (P/AI) pour le loam sableux Du Contour et le loam Sainte-Rosalie.

Tableau 6. Bilan du phosphore et variation moyenne annuelle de la teneur en P Mehlich-3 après huit années de culture d'une rotation maïs-maïs-soya-blé.

Série du Contour									
Traitements	Teneur en P Mehlich -3		Variation moyenne annuelle	P appliqué	P exporté	Bilan P			
	1996	2003				8 ans	8 ans	8 ans	Annuel
	----- (kg/ha) -----					(kg P Mehlich -3/an)		-- (kg P ₂ O ₅ /ha) --	
0 P ₂ O ₅	391	270	-15,1	0	344	-344	-43,0		
30 P ₂ O ₅	399	281	-14,8	240	351	-111	-13,9		
60 P ₂ O ₅	391	294	-12,1	480	359	121	15,1		

Série Sainte-Rosalie									
Traitements	Teneur en P Mehlich -3		Variation moyenne annuelle	P appliqué	P exporté	Bilan P			
	1997	2004				8 ans	8 ans	8 ans	Annuel
	----- (kg/ha) -----					(kg P Mehlich -3/an)		-- (kg P ₂ O ₅ /ha) --	
0 P ₂ O ₅	344	236	-13,5	0	340	-340	-42,5		
30 P ₂ O ₅	334	253	-10,1	240	360	-120	-15,0		
60 P ₂ O ₅	383	315	-8,5	480	370	110	13,8		

P₂O₅/ha. Le temps plus long pour la dose 60 kg P₂O₅/ha s'explique en partie par une teneur initiale en P plus élevée dans le sol et par les apports de P (figures 2 et 3). La courbe de solubilité du P en relation avec la saturation peut expliquer le comportement agroenvironnemental différent de ces deux sols. Ces résultats confirment ceux obtenus par Pellerin et al. (2006a) qui ont démontré que le seuil agroenvironnemental critique de saturation est plus élevé pour les sols sableux, comparativement aux loams ou aux argiles. Le seuil critique diminue à mesure que la teneur en argile et le pH s'accroissent. Le sol du Contour a 13 % d'argile, soit deux fois moins que le sol Sainte-Rosalie avec 26 %. Son pH de 6,32 au début de l'expérience est également plus bas que celui du sol Sainte-Rosalie avec 6,74 (tableau 1). La grande différence entre la solubilité du P de ces deux sols peut s'expliquer principalement par les facteurs texturaux et le pH.

Conclusion

L'analyse de variance n'a indiqué aucune réponse significative des doses de P sur les rendements des cultures de maïs-grain, de soya et de blé dans les deux sols très riches en P. En 1996, la teneur initiale en P du sol Du Contour était en moyenne de 394 kg P/ha. Après une période de 8 ans, en 2003, elle est respectivement de 270, 281 et 294 kg P/ha pour les doses 0, 30 et 60 kg P₂O₅/ha. La teneur initiale en P du sol Sainte-Rosalie en 1997 était en moyenne de 354 kg P/ha. En 2004, après une période de 8 ans, elle est respectivement de 236,

253 et 315 kg P/ha pour les doses 0, 30 et 60 kg P₂O₅/ha.

Pendant les huit années de culture, les exportations cumulatives en P ont été de 344, 351 et 359 kg P₂O₅/ha respectivement pour les doses 0, 30 et 60 kg P₂O₅/ha dans le champ Du Contour. Elles ont été de 340, 360 et 370 kg P₂O₅/ha respectivement pour les mêmes doses dans le champ Sainte-Rosalie. Sur 8 ans, le bilan net cumulatif des apports - les exportations de P (moyenne annuelle entre parenthèses) a été de -344 kg P₂O₅/ha (-43,0 kg P₂O₅/ha-an) pour le témoin sans engrais P, de -111 kg P₂O₅/ha (-13,9 kg P₂O₅/ha-an) pour la dose de 30 kg P₂O₅/ha et de 121 kg P₂O₅/ha (15,1 kg P₂O₅/ha-an) pour la dose de 60 kg P₂O₅/ha dans le champ Du Contour. Sur 8 ans, le bilan net cumulatif des apports - les exportations de P et la moyenne annuelle (entre parenthèses) du bilan ont été de -340 kg P₂O₅/ha (-42,5 kg P₂O₅/ha-an) pour le témoin sans engrais P, de -120 kg P₂O₅/ha (-15,0 kg P₂O₅/ha-an) pour la dose de 30 kg P₂O₅/ha et de 110 kg P₂O₅/ha (13,3 kg P₂O₅/ha-an) pour la dose de 60 kg P₂O₅/ha dans le champ Sainte-Rosalie. Une réduction de la teneur en P des sols peut être obtenue avec une dose de P supérieure à celle des exportations à cause du phénomène de rétroversion du P dans les sols. L'application d'un bilan équilibré ou même modérément excédentaire est une mesure efficace de réduction de la teneur et de la saturation en P des sols.

Le suivi de l'évolution de la saturation en P a montré une diminution linéaire pour la période étudiée. Les taux annuels de réduction de la saturation en P des sols dans le sol

Du Contour ont été de 1,09, 0,89 et 0,75 %/an respectivement pour les doses 0, 30 et 60 kg P₂O₅/ha. Le temps nécessaire pour atteindre le seuil de saturation réglementaire en P de 13,1 % est de 10 ans pour la dose 0 kg P₂O₅/ha, de 12 ans pour la dose 30 kg P₂O₅/ha et de 14 ans pour la dose 60 kg P₂O₅/ha. Les taux annuels de réduction de la saturation en P des sols dans le sol Sainte-Rosalie ont été de 1,034, 0,883 et 0,642 %/an respectivement pour les doses 0, 30 et 60 kg P₂O₅/ha. Le temps nécessaire pour atteindre le seuil de saturation en P de 13,1 % est de 8 ans pour la dose 0 kg P₂O₅/ha, de 10 ans pour la dose 30 kg P₂O₅/ha et de 14 ans pour la dose 60 kg P₂O₅/ha.

Le seuil agroenvironnemental de saturation, déterminé à partir de la courbe de solubilité du P pour une teneur de P soluble à l'eau de 9,7 mg P/kg, a été de 15,0 % dans le loam sableux Du Contour et de 10,0 % dans le loam Sainte-Rosalie. La différence entre les courbes de solubilité des deux sols peut s'expliquer par les différences entre leur teneur en argile et leur pH.

Références bibliographiques

- EPA. 1996. SW-846. Methods 3050.
- Giroux, M., J. Cantin, R. Rivest et G. Tremblay. 2002. Évaluation des teneurs en phosphore dans les sols selon la fertilisation, la richesse en P et les types de sols. Compte-rendu sur CD du colloque sur le phosphore OAQ-APAQ. « Une gestion éclairée » 19 p.

- 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., M. Quenum et R. Royer. 2005. Influence des systèmes culturaux et des modes de fertilisation sur le bilan de la matière organique, du phosphore et du potassium, l'évolution des teneurs en éléments nutritifs des sols et les rendements des cultures. Cahier no 4 de l'Observatoire de la qualité des sols du Québec. IRDA, 39 p.
- Gouvernement du Québec. 2007. Règlement sur les exploitations agricoles – Annexe 1. Abaque de dépôts maximums pour l'ensemble des matières fertilisantes utilisées sur une parcelle selon la culture qui y est pratiquée et exprimés en kg de phosphore (P_2O_5) total par hectare. Éditeur officiel du Québec.
- Khiari, 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.
- McCullum, R.E. 1991. Build-up and decline in soil phosphorus: 30 year trends on a typic Umprabult. *Agronomy J.* 83: 77-85.
- Mehlich, A. 1984. Mehlich-3 soil test extractant : a modification of Mehlich-2 extractant. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 15:1409-1416.
- Peck, T.R., L.T. Kurtz et H.L. Tandon. 1971. Changes in Bray P-1 soil phosphorus test values resulting from applications of phosphorus fertilizer. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 35 : 595-598.
- Pellerin, A., L.E. 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.* 86:711-723.
- Pellerin, A., L.E. Parent, C. Tremblay, J. Fortin, G. Tremblay, C. P. Landry et L. Khiari. 2006b. Agri-environmental models using Mehlich III soil phosphorus saturation index for corn in Quebec. *Can. J. Soil Sci.* 86:897-910.
- Peterson, L.A. et A.R. Krueger. 1980. Variation in content of available P Bray-1 and K in soil samples from a cropped N, P and K fertility experiment over 8 years. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 11:993-1004.
- 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.
- Sissingh, H. A. 1971. Analytical technique of the Pw method, used for the assessment of the phosphate status of arable soil in the Netherlands. *Plant Soil* 34: 483-486.
- 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.