

CRITÈRES AGRONOMIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX LIÉS À LA DISPONIBILITÉ, LA SOLUBILITÉ ET LA SATURATION EN PHOSPHORE DES SOLS AGRICOLES DU QUÉBEC

M. GIROUX¹ ET T.S. TRAN¹

RÉSUMÉ

L'accumulation du phosphore à des niveaux excessifs dans les sols du Québec, associée aux pratiques de fertilisation minérale et organique, peut comporter des risques pour la qualité de l'eau. Il est important d'approfondir nos connaissances sur la dynamique de cet élément dans le sol, tant sous les aspects agronomiques, qu'environnementaux. Le but de ce travail est d'étudier les facteurs qui affectent la disponibilité du P à la plante et de trouver aussi des indices pour estimer les risques environnementaux liés à l'excès de cet élément dans le sol. Une expérience, comportant 58 sols prélevés en surface dans différentes régions du Québec, a été menée en serre sur le ray-grass. Les traitements consistaient en une fertilisation complète avec et sans phosphore. Les relations entre le rendement relatif de la culture, le P Mehlich-3, le P soluble à l'eau, la capacité de fixation et la saturation en P du sol ont été établies. Ces relations ont démontré l'importance de la capacité de fixation en P et de la saturation en P sur la disponibilité du P pour la plante et sur la solubilité du phosphore du sol. La capacité de fixation en P a varié entre 401 et 4202 mg P kg⁻¹ dans la couche de labour de 58 sols de cette étude. Deux méthodes rapides d'évaluation de la capacité de fixation en P ont été comparées à la méthode de référence (isotherme de Langmuir). La première méthode, basée sur l'addition d'une quantité connue de P dans un sol, permet de mesurer à l'équilibre la quantité de phosphore fixé avec une bonne précision ($r=0,95^{**}$). La seconde méthode, basée sur la relation avec la teneur en aluminium extrait avec Mehlich-3, a également fourni une bonne évaluation de la capacité de fixation en P ($r=0,78^{**}$). Le rapport P Mehlich-3/capacité de fixation P, s'est révélé un très bon indice de la saturation en P des sols. Cet indice de saturation en P a varié entre 0,51 et 47,1 % alors que le P soluble à l'eau variait entre 0,07 et 15,60 mg P kg⁻¹. Cet indice de saturation en P est très corrélé avec le rapport P Mehlich-3/Al Mehlich-3 ($r=0,98^{**}$). Une classification des risques environnementaux pour P a été établie pour le niveau de saturation en P et la teneur en P soluble dans les sols. Des valeurs de saturation en P supérieures à 10 % sont considérées comme élevées et provoquent un accroissement marqué de la solubilité du phosphore.

Mots clés : Phosphore, saturation en P des sols, capacité de fixation de P, P soluble, aluminium libre, aluminium Mehlich-3.

INTRODUCTION

L'utilisation en agriculture d'importantes quantités de phosphore a provoqué dans certains sols un enrichissement excessif du P disponible. L'inventaire sur la qualité des sols agricoles du Québec réalisé par Tabi et al. (1990) a démontré une accumulation de P dans l'horizon de surface des sols sous monoculture de maïs-grain ou de plantes horticoles. On observe une situation semblable dans certains secteurs où l'élevage intensif est pratiqué et où les surfaces disponibles pour l'épandage des engrais de ferme font défaut (Simard et al. 1993, Simard et al. 1995). Les doses d'application des engrais de ferme sont habituellement basées sur les besoins en azote de la culture. Il en résulte souvent que les applications de P excèdent le besoin des cultures et provoquent une accumulation dans les sols. Une prise en compte plus rigoureuse du phosphore dans le plan de fertilisation devrait être faite de manière à cesser l'accumulation de phosphore dans les sols trop riches.

Les données relatives au niveau de phosphore dans les sols analysés dans les laboratoires régionaux du MAPAQ confirment qu'il y a dans plusieurs régions, un enrichissement des teneurs en P des sols. Sept régions agricoles ont déjà atteint en moyenne le niveau riche (>150 kg P/ha) dans le sol. La situation observée au Québec en zone de production intensive est semblable à celle rapportée par Sims (1993) sur les sols américains et ontariens où plus de 50 % des sols présentent des concentrations riches ou excessivement riches. Cependant, plusieurs régions, comme le Bas Saint-Laurent et l'Abitibi-Témiscamingue, sont encore à des niveaux de fertilité faibles en P et bénéficieraient d'un redressement de la teneur en P des sols.

Lorsqu'il y a un enrichissement de la teneur en P disponible, les équilibres sol-solution sont affectés. Il en résulte un accroissement du phosphore en solution. Il faut alors préciser le niveau de redressement et d'entretien convenable en phosphore dans les sols. Cet accroissement de solubilité du P peut être bénéfique aux cultures en favorisant l'absorption de P et en diminuant l'utilisation des engrais phosphatés. Par contre, Heckrath et al. (1995), Sharpley (1995) et Sharpley et al. (1996) ont démontré qu'une richesse et une solubilité excessive en P peuvent entraîner davantage de perte de phosphore vers les eaux de surface ou de drainage. Simard et

¹Centre de recherche et d'expérimentation en sols, CRES, MAPAQ 2700 rue Einstein, Sainte-Foy, Québec G1P 3W8

Lapierre (1990) et Simard et al. (1994) ont étudié la désorption du P dans les sols du Québec. Ils ont établi que celle-ci se fait en fonction de plusieurs paramètres dont la teneur en P disponible, le pH, le fer et l'aluminium libre, le calcium échangeable et la texture. Des travaux menés en Caroline du Nord, rapportés par Tisdale et al. (1985), ont démontré que le rapport du phosphore disponible sur la teneur en oxydes de fer et d'aluminium libres, est un indice très valable pour expliquer la solubilité et la désorption du P du sol. Les teneurs en oxydes de fer et d'aluminium libres extraits à l'oxalate d'ammonium, sont aussi des facteurs importants pour expliquer la capacité de fixation du P des sols et la disponibilité en P pour les cultures au Québec (Giroux et Tran 1985).

La saturation des sites de fixation du P dans les sols agricoles est un critère qui est de plus en plus considéré pour déterminer la mobilité, la solubilité et la désorption du phosphore (Giroux et al. 1996, Yuang et Lavkulich 1995, Breeuwsma et Reijerink 1992, Beauchemin 1996). Le rapport du P Mehlich-3/capacité de fixation du P, permet d'établir un indice de saturation en P des sols. Sharpley (1995) a établi la relation existant entre la saturation en P du sol \bar{A} basée sur ce rapport et le P soluble. Il établit qu'une saturation en P de 10 % et plus produit une concentration critique de P soluble supérieure à 250 $\mu\text{g/L}$ dans les eaux de ruissellement. Le critère de saturation en P serait un indicateur plus performant que l'analyse de P Mehlich-3 pour établir les risques environnementaux liés à la solubilité et la mobilité du P. Simard et al. (1993) ont démontré que la saturation des sites de fixation du P peut être responsable de l'accroissement du P soluble dans des sols très riches en P du bassin de la Beauvive. L'étude du phosphore sur le plan environnemental doit être complétée au Québec pour mieux comprendre les relations existant entre le besoin en P des cultures, la teneur en P des sols et les risques environnementaux. Il faut établir une méthodologie et calibrer des critères agro-environnementaux au niveau de l'analyse des sols pour déterminer l'importance des facteurs en cause. Ces critères serviront à préciser les niveaux d'entretien souhaitables du phosphore dans les sols, tant sur le plan agronomique qu'environnemental.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Analyse des sols

On a prélevé 58 échantillons de sols dans l'horizon Ap provenant de différentes régions du Québec. Leurs propriétés chimiques sont décrites au tableau 1. Le pH a été déterminé dans un mélange sol : eau (1:1). Le fer et l'aluminium (Al+Fe ox.) libres ont été extraits avec une solution d'oxalate acide d'ammonium (Ross et Wang 1993). Le phosphore disponible a été déterminé selon la

méthode Mehlich-3 (P Mehlich-3). Le phosphore soluble dans l'eau (P soluble) a été déterminé après une extraction à l'eau de 18 heures dans un rapport sol-solution de 1 : 10 (Tran et al. 1988). La capacité de fixation maximale du phosphore (P fixation) a été déterminée selon la méthode des isothermes de Langmuir telle que décrite par Dalal et Hallsworth (1976).

Les sols ont été séparés en trois groupes selon leur capacité de fixation de P. Le groupe 1 possède une capacité de fixation en P inférieure à 1200 mg P/kg. Pour le groupe 2, la capacité de fixation varie entre 1200 et 1499 mg P/kg, alors qu'elle est de 1500 ou plus pour le groupe 3. Une méthode de mesure rapide de la capacité maximale de fixation en P (Bache et Williams 1971, Simard et al. 1994) a également été comparée à la valeur de référence (isotherme de Langmuir). Cette méthode rapide consiste à établir la quantité de P fixé et la concentration de P à l'équilibre résultant de l'application de 1500 $\mu\text{g P/g}$ de sol dans un rapport de 40 ml de solution pour 1,00 g de sol. L'indice de fixation (X/Log C) est établi par le rapport entre la quantité de P fixé (X) sur le logarithme de la concentration à l'équilibre (C). Une régression a été établie entre l'indice de fixation (X/Log C) et la capacité de fixation de P mesurée par la méthode de référence. Une régression linéaire a également été établie entre la capacité maximale de fixation de P et l'aluminium extrait avec Mehlich-3. Les rapports P Mehlich-3/Al Mehlich-3 et P Mehlich-3/P fixation ont été utilisés comme indice de saturation en P des sols.

Une expérience en serre a été réalisée avec les 58 échantillons de sols utilisant le ray-grass (*Lolium multiflorum* L., cv. *Pennefine*) comme plante indicatrice pour mesurer la réponse aux applications de P. Les détails de l'expérience ont été décrits dans l'étude de Tran et al. (1988). Le rendement relatif ($\frac{\text{rendement sans P}}{\text{rendement avec P}} \times 100$) a été établi pour chaque sol.

On a établi des corrélations et des régressions entre les mesures de P soluble à l'eau, P Mehlich-3, le rendement relatif et les indices de saturation en P des sols.

RÉSULTAT

Capacité de fixation en P

La capacité de fixation en P est définie comme le pouvoir d'un sol à retenir une quantité de P donnée selon divers mécanismes physico-chimiques. La capacité de fixation en P, telle qu'établie par la méthode des isothermes de Langmuir, a varié entre 401 et 4202 mg P/kg. Pour le groupe 1, à faible pouvoir fixateur (inférieur à 1200 mg P/kg), la moyenne est de 881 mg P/kg avec des valeurs variant entre 401 et 1195 mg P/kg. Pour le groupe 2, à pouvoir fixateur

Tableau 1. Caractéristiques chimiques des sols utilisés et groupement selon les classes de fixation du phosphore

Groupe 1 : fixation P (moins de 1200 mg/kg)										
Nom des séries pédologiques	Al Ox. g/kg	Fe Ox. g/kg	P Fixation mg/kg	P Soluble mg/kg	P Meh. mg/kg	pH H ₂ O	Al Meh. mg/kg	P Meh. P Fix (%)	P Meh. Al Meh. (%)	Rend. Relatif (%)
Sainte-Sophie	1,2	1	401	8,95	140	5,5	774	34,9	18,1	98,9
Saint-Damase	0,6	1	427	15,60	201	5,9	437	47,1	48,0	99
Saint-Hyacinthe	0,9	1,8	464	8,09	82	7,8	501	17,7	18,4	93
Kierkoski	1,1	1,8	504	12,56	115	6,6	540	22,8	21,3	94,9
Saint-Hyacinthe	1,3	3,1	697	7,60	70	5,7	805	10,0	8,7	93,8
Sainte-Rosalie	1,6	2	714	8,58	122	6,6	850	17,1	14,4	96
Gatineau	1,5	2,2	717	0,36	23	7,4	584	3,2	3,9	64,5
Dalhousie	3	2,8	855	1,22	39	6,7	725	4,8	5,4	83,4
Saint-Bernard	2	4,1	1015	2,88	57	6,8	794	5,8	7,2	88,9
Mawcook	2,4	5,5	1025	1,86	39	5,4	725	3,8	5,4	75,4
Aston	2,7	2	1062	1,07	54	5,8	1109	5,1	4,9	61,9
Chicot	2,1	5	1063	5,34	73	7,1	719	6,9	10,2	95,1
Magog	1,3	6,1	1076	1,18	29	6,1	570	2,7	5,1	68
Levard	2,8	8,3	1150	0,73	55	5,1	1255	4,8	4,4	63,6
Saint-Damase	2	0,8	1150	2,80	133	5,2	1448	11,8	9,2	97
Saint-Samuel	3,3	2,3	1150	3,10	170	6,5	1302	14,8	13,1	96
Saint-Rosalie	2,1	8,8	1190	2,05	70	6,3	794	5,9	8,8	97
Fouquette	1,8	8,8	1195	1,92	74	6,8	981	8,2	7,5	94,2
Moyenne	1,9	3,7	881	4,65	88	6,3	829	12,5	11,7	88,6
Groupe 2 : fixation P (1200 à 1499 mg/kg)										
Nom des séries pédologiques	Al Ox. g/kg	Fe Ox. g/kg	P Fixation mg/kg	P Soluble mg/kg	P Meh. mg/kg	pH H ₂ O	Al Meh. mg/kg	P Meh. P Fix (%)	P Meh. Al Meh. (%)	Rend. Relatif (%)
Le Bras	2,2	4,5	1200	0,35	47	4,9	988	3,92	4,86	63,8
Saint-Urbain	1,9	3,8	1200	1,85	45	7,3	808	3,75	5,57	81,8
Chapais	2	5,8	1210	0,88	41	5,2	914	3,39	4,49	74,4
Des Sauffs	1,9	4,7	1212	0,29	25	6,0	1083	2,08	2,31	48,1
Chaloupe	1,9	3,8	1222	0,60	30	7,1	758	2,45	3,97	71
Normandin	1,5	4	1250	0,45	18	6,4	952	1,44	1,89	61,4
Saint-Urbain	2,3	5,5	1259	2,10	55	6,6	950	4,37	5,79	88,5
Chaloupe	1,9	3,9	1259	0,58	50	6,5	985	3,97	5,08	71,8
Saint-Hyacinthe	2,4	8,1	1295	0,47	27	6,4	943	2,08	2,86	55,1
Saint-Pacôme	3,6	4,4	1300	0,45	47	5,0	1194	3,62	3,94	54
Kamouraska	2,5	6,2	1340	2,11	52	6,7	917	3,88	5,67	87,2
Sainte-Rosalie	2,6	6,8	1408	0,48	39	6,8	983	2,77	3,97	74,7
Saint-André	4	5,6	1408	0,63	50	4,8	1398	3,55	3,58	76,5
Hébertville	2,9	3,4	1447	0,78	23	7,5	978	1,59	2,35	64,8
Saint-Bernard	3	7,1	1471	0,77	25	7,6	672	1,70	3,72	68
Albanet	2,9	8,4	1477	0,83	30	6,3	969	2,03	3,10	70,9
Greenborough	2,4	7,2	1495	0,68	36	6,8	746	2,41	4,83	91
ChAMPLAIN	2,3	7,5	1495	0,32	24	6,2	891	1,61	2,60	82,2
Moyenne	2,5	5,6	1330	0,79	37	6,3	950	2,81	3,92	69,8
Groupe 3 : fixation P (1500 mg/kg et plus)										
Nom des séries pédologiques	Al Ox. g/kg	Fe Ox. g/kg	P Fixation mg/kg	P Soluble mg/kg	P Meh. mg/kg	pH H ₂ O	Al Meh. mg/kg	P Meh. P Fix (%)	P Meh. Al Meh. (%)	Rend. Relatif (%)
Saint-Nicolas	2,9	7	1500	0,52	40	6,1	1027	2,67	3,89	73,1
Saint-Urbain	2,3	3,7	1500	2,26	59	7,9	1002	3,93	5,89	90,5
Saint-Nicolas	3,2	5	1524	2,15	173	4,4	1312	11,35	13,19	93,8
Saint-Gabriel	2,7	3,9	1528	0,42	34	6,7	1229	2,23	2,77	47,7
Sainte-Rosalie	3,4	8,4	1613	0,88	39	6,8	1026	2,42	3,80	73,4
Rideau	2,9	7,2	1615	1,05	30	6,7	1062	1,86	2,82	75,2
Normandin	2,4	5,1	1715	0,60	50	5,7	1218	2,92	4,11	76,3
Sainte-Rosalie	3,3	8,1	1754	1,10	39	6,8	1026	2,22	3,80	91
Péribonka	8,8	3,8	1912	0,13	42	4,7	1717	2,20	2,45	40,8
Heberville	2,9	4,7	2012	0,70	31	7,7	893	1,54	3,47	78,6
Rivi-du-loup	5	6,1	2024	0,52	52	5,6	1472	2,57	3,53	81,8
Leeds	6,9	8,4	2101	0,77	26	5,0	1670	1,24	1,58	43,4
Dessaint	7,2	3,3	2180	1,07	43	5,4	1656	1,97	2,60	70,5
Alma	4,5	6,9	2358	0,31	15	6,0	1200	0,64	1,25	47,2
Beaurivage	7,7	9,5	2364	0,86	42	5,6	1543	1,78	2,72	62,8
Batiscan	8,4	8,6	2513	0,62	19	5,2	1761	0,76	1,08	47,7
Quisibis	6,4	13,1	2577	0,80	54	4,5	1651	2,10	3,27	72,5
Saint-Jude	6,1	3,7	2646	0,33	35	5,6	1382	1,32	2,53	51,5
Chapais	3,8	1,2	2800	0,38	18	5,8	1890	0,64	0,95	47,8
Chicoutimi	5	8,3	3003	0,17	17	6,6	1250	0,57	1,36	49,3
Lapointe	7,2	2,7	3717	0,07	19	4,8	1584	0,51	1,20	46,9
Bourget	26,8	8,2	4202	0,18	25	4,8	1902	0,59	1,31	58,4
Moyenne	5,9	6,2	2234	0,72	41	5,8	1385	2,18	3,16	64,6

moyen, la moyenne est de 1330 mg P/kg et les écarts se trouvent entre 1200 et 1405 mg P/kg. Pour le groupe 3, à fort pouvoir fixateur (1500 mg P/kg et plus), la moyenne est de 2234 mg P/kg, avec des écarts entre 1500 et 4202 mg P/kg. Il s'agit donc d'une propriété très variable dans les sols du Québec (entre 401 et 4202 mg P/kg). Il existe une très bonne relation entre la capacité de fixation en P des sols et la teneur en Fe + Al extrait à l'oxalate ($r = 0,76^{**}$) et la teneur en Al Mehlich-3 ($r = 0,78^{**}$) (Figure 1). L'erreur-type d'estimation de ces deux régressions est respectivement 490 et 469 mg P/kg. La détermination d'un indice de fixation de P par la méthode rapide (X/log C) a été réalisée sur 20 sols. Une régression très significative ($r=0,95^{**}$) a été établie entre cet indice et la capacité de fixation de P mesurée par la méthode de l'isotherme de Langmuir. L'erreur-type d'estimation de cette méthode est de 218 mg P/kg. Cette méthode rapide est plus précise que la méthode estimative à partir de Al Mehlich-3 mais elle nécessite un dosage supplémentaire en laboratoire alors que la valeur de Al-Mehlich-3 est plus facilement disponible.

Saturation en P des sols

La saturation en P du sol représente la proportion des sites de fixation déjà occupés par le phosphore. Deux indices de saturation ont été comparés (Figure 2). Le rapport P Mehlich-3/Al Mehlich-3 et celui de P Mehlich-3/P fixation constituent tous les deux des indices de saturation très valables et fortement reliés entre eux ($r=0,98^{**}$). Le rapport P Mehlich-3/Al Mehlich-3 est celui qui peut être obtenu le plus facilement à partir des analyses de sols réalisées dans les laboratoires.

La classification des deux indices de saturation en phosphore des sols est présentée au tableau 2. En considérant le rapport P Mehlich-3/P fixation comme indice, le niveau de saturation en P des sols est généralement inférieur à 1,0% pour les sols pauvres (0-60 kg P/ha). Il varie entre 1 et 5% pour les sols moyens et bons (61-150 kg P/ha), entre 5 et 10% pour les sols riches (151-250 kg P/ha) et plus de 10% pour les sols excessivement riches (> 250 kg P/ha).

Un niveau critique de saturation de 10%, correspondant à une concentration de P soluble de 250 µg P/L dans les eaux de ruissellement, a été obtenu par Sharpley (1995). Ce niveau critique est souvent dépassé en sols excessivement

Tableau 2. Classification de la teneur en P soluble et de la saturation en P des sols.

Classe	P Mehlich-3x100	P Mehlich-3x100	P soluble à l'eau mg/kg
	P fixation %	Al Mehlich-3 %	
Faible	0-5	0-4,9	0-1
Moyenne	5-10	4,9-9,8	1-2,5
Élevée	10-20	9,8-19,6	2,5-6
Très élevée	> 20	> 19,6	> 6

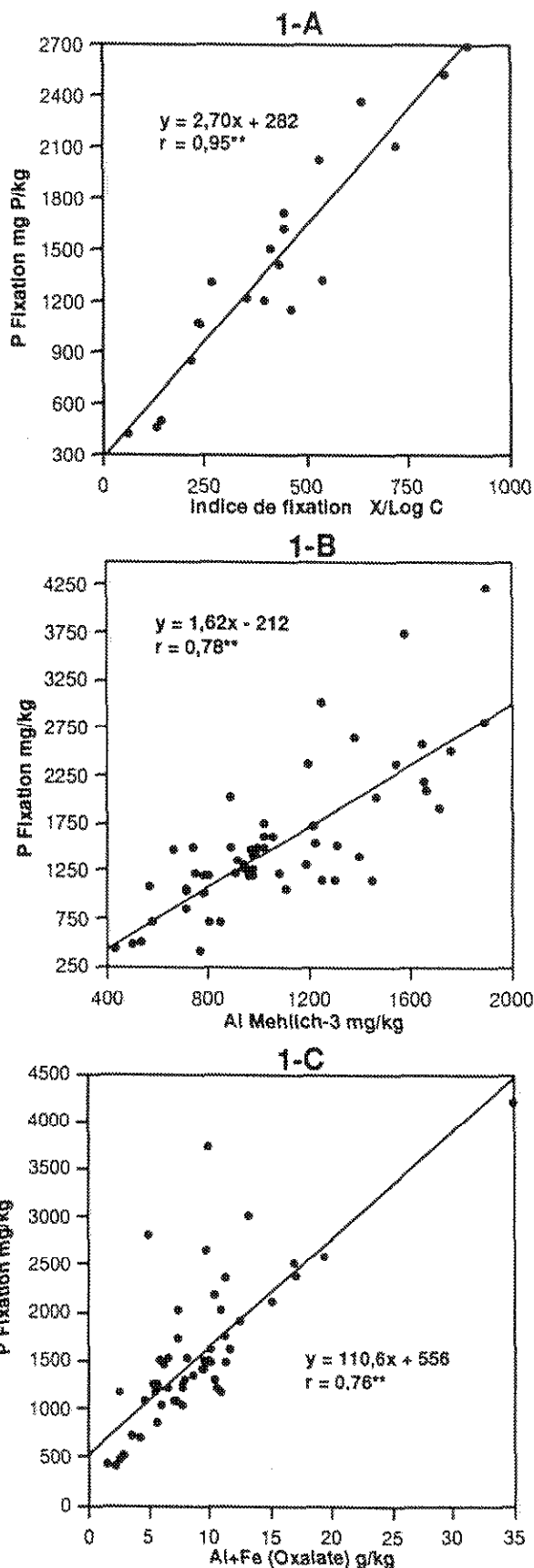


Figure 1. Relation entre la capacité de fixation en phosphore des sols, l'indice de fixation (X/LogC) (1-A), Al Mehlich-3 (1-B), et (Fe+Al) oxalate (1-C).

riches. Une teneur élevée en phosphore dans les sols combinée à une faible capacité de fixation sont les deux facteurs qui prédisposent à un niveau de saturation élevée dans les sols. Le niveau souhaitable d'entretien de la teneur en phosphore des sols se situent entre 5 et 10% de saturation. Les pratiques de fertilisation qui contribuent à enrichir un sol dont la saturation en P est plus grande que 10% sont considérées comme abusives.

P soluble versus saturation en P

Lorsque la teneur en P disponible s'accroît dans les sols, le niveau de saturation en P est augmenté et les équilibres sol-solution sont affectés. On note alors un accroissement de la solubilité en P des sols. Le phosphore soluble à l'eau mesuré est proportionnel à la teneur en P Mehlich-3 ($r=0,74^{**}$) et à la saturation en P des sols ($r=0,92^{**}$) mais inversement proportionnel à la capacité de fixation en P ($R^2=0,73^{**}$), à la teneur en Al + Fe (oxalate) ($R^2=0,68^{**}$) et à la teneur en Al Mehlich-3 ($R^2=0,47^{**}$) (Figures 3).

Comme la saturation en P est un indice qui tient compte à la fois du P disponible et de la capacité de fixation du P, ceci peut expliquer le coefficient de corrélation très élevé ($r=0,92^{**}$) entre P soluble et la saturation en P. La saturation en P est donc une donnée importante à considérer sur le plan environnemental pour évaluer la solubilité et la désorption du phosphore. Généralement en sols pauvres la teneur en P soluble est inférieure à 1 mg P/kg, en sols moyens et bons elle varie entre 1 et 2,5 mg P/kg, en sols riches entre 2,5 et 6 mg P/kg, et en sols excessivement riches à plus de 6 mg P/kg.

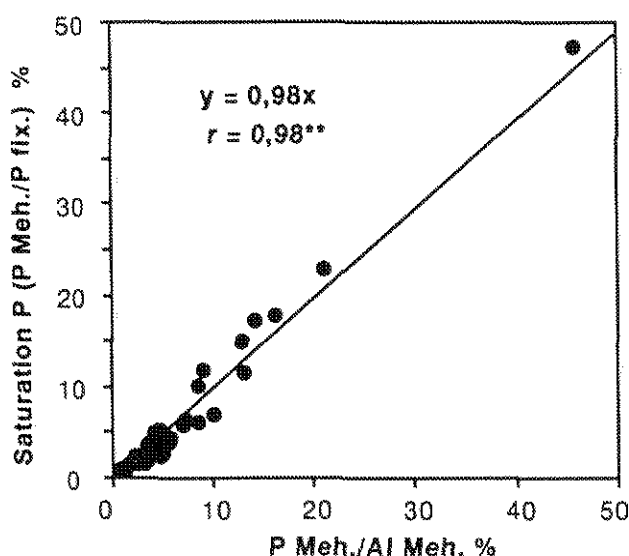


Figure 2. Relation entre la saturation en phosphore des sols et le rapport P Mehlich-3/Al Mehlich-3

Rendement relatif versus P disponible, saturation P et P soluble

Dans le but de déterminer les teneurs en P et le niveau de saturation en P souhaitable dans les sols, tant sur le plan agronomique qu'environnemental, nous avons établi les relations entre le rendement relatif (pourcentage du rendement maximum) de la culture, P Mehlich-3, P soluble (eau) et la saturation en P (Figure 4). Considérant que d'une part, la réponse de la culture à l'application d'engrais P est significative jusqu'à une teneur en P de 67 mg P/kg (150 kg/ha) et que d'autre part, la solubilité de P augmente avec la teneur en P Mehlich-3, on ne devrait pas maintenir des niveaux de P excessif (> 250 kg P/ha) ou supérieurs à 10 % de saturation en P. L'accumulation au-delà de ces valeurs peut constituer un risque sur le plan environnemental si les sols comportent notamment un risque d'érosion. Par contre, en sols pauvres, la faible solubilité de P accentue la déficience pour les plantes et augmente le besoin en engrais. Ces sols bénéficieraient d'un redressement de leur niveau de fertilité. Ce redressement doit cependant se faire graduellement en respectant les principes de fertilisation des cultures.

CONCLUSION

Cette étude a permis de démontrer l'importance de la capacité de fixation en P des sols agricoles sur la solubilité et la disponibilité du P pour les cultures. Deux méthodes de mesures rapides de la capacité de fixation en P ont été comparées à la méthode de référence (isotherme de Langmuir). La première méthode, basée sur l'addition d'une concentration connue de P en solution à un sol et la détermination de l'équilibre sol-solution ($X/\log C$), constitue une méthode très précise d'évaluation de ce facteur. Une seconde méthode, basée sur la relation entre la capacité de fixation en P des sols et la teneur en Al Mehlich-3, a fourni une bonne évaluation de la capacité de fixation de P. Cette dernière méthode, un peu moins précise, permet cependant de déterminer avec plus de facilité la capacité de fixation en P des sols avec un coût minime puisque la teneur en Al Mehlich-3 peut être déterminée simultanément avec celle du phosphore dans l'extrait.

Le rapport P Mehlich-3/P fixation a été utilisé pour déterminer le taux de saturation en P des sols. La saturation en P, mesurée avec ce rapport, est très reliée au rendement relatif (pourcentage du rendement maximum sans P) et à la teneur en P soluble des sols. Le rapport P Mehlich-3/P fixation constitue un indice agronomique et environnemental très performant. Cet indice de saturation est très relié avec le rapport P Mehlich-3/Al Mehlich-3 qui peut-être établi très facilement à partir des analyses de sol. Les résultats de cette étude ont démontré que les sols

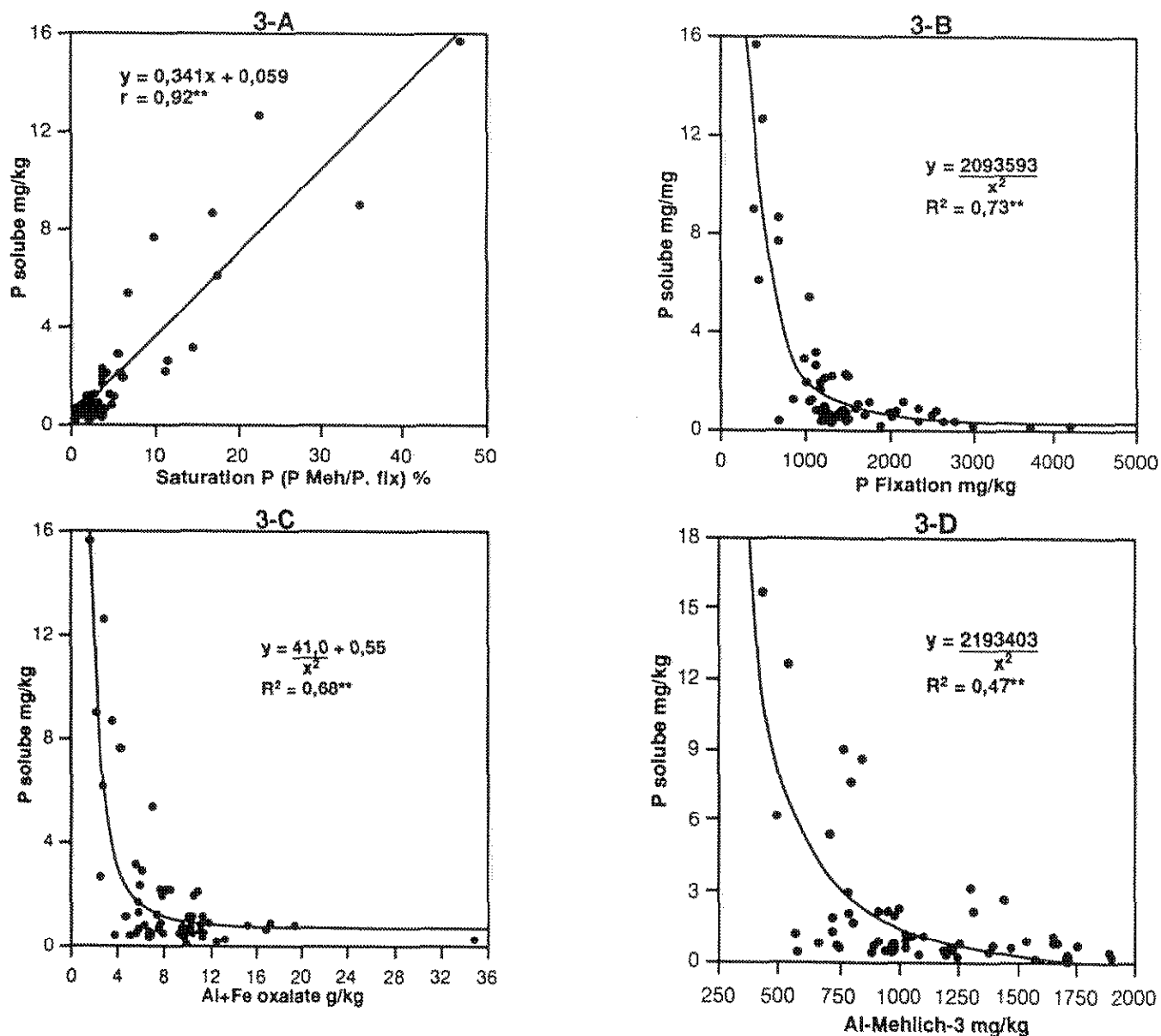


Figure 3. Relation entre la teneur en P soluble à l'eau des sols, la saturation en P (3A), la capacité de fixation en P (3B), Al+Fe oxalate (3C) et la teneur en Al Mehlich-3 (3D).

pauvres possèdent une saturation en P et une teneur en P trop faibles pour nourrir adéquatement la culture. Ces sols ont intérêt à être redressés, considérant les déficiences observées dans la récolte et les fortes réponses obtenues avec les engrais phosphatés. Ce redressement doit cependant se faire graduellement en respectant les principes de fertilisation des cultures. À l'inverse, les sols excessivement riches (>250 kg P/ha) fournissent généralement un niveau de saturation en P plus grand que 10 %, aucune réponse à l'apport d'engrais P et une solubilité très élevée du P. Il ne faudrait donc pas, pour des raisons environnementales, maintenir des niveaux de P supérieurs à 250 kg P/ha ou un niveau de saturation en P plus grand que 10 % dans les sols agricoles. Le niveau d'entretien souhaitable du phosphore du sol se situe entre 5 et 10% de saturation en P.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bache, B.W. et E.G. Williams 1971. A phosphate sorption index for soil. *J. Soil Sci.* 22 (3) : 289-301.
- Beauchemin, S. 1996. Évaluation du risque de lessivage du phosphore dans les sols agricoles. Thèse de doctorat, Institut National de Recherche scientifique, INRS-Eau Université du Québec : 154 p.
- Breeuwsma, A. et J. GA. Reijerink 1992. Phosphate-saturated soils : a "new" environmental issue. Proceeding of the European state-of-the art conference on delayed effects of chemicals on soil and sediments, Holland.
- Dalai, R.C. et E.G. Hallsworth 1976. Evaluation of the parameters of soil phosphorus availability factors in predicting yield response and phosphorus uptake. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40 : 541-546.

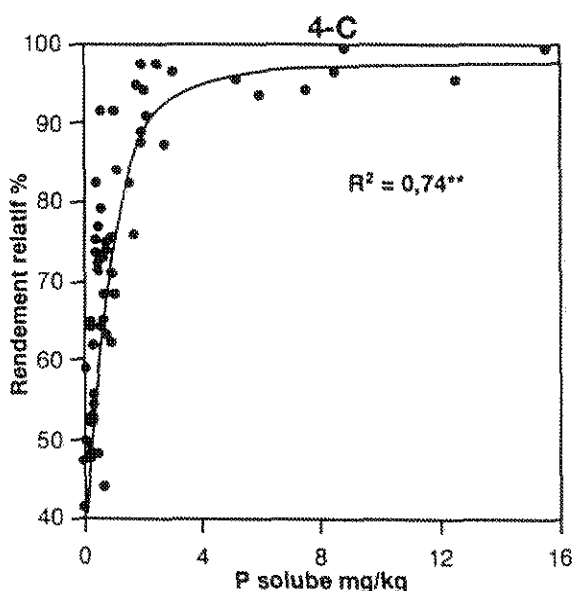
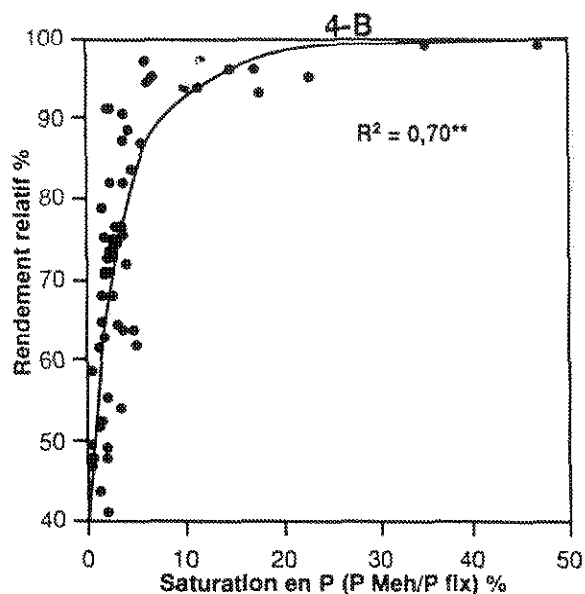
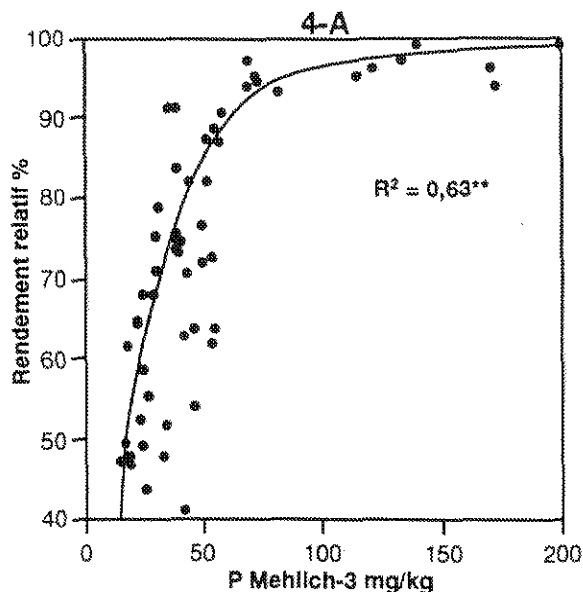


Figure 4. Relation entre le rendement relatif (pourcentage du rendement maximum), la teneur en P Mehlich-3 (4-A), la saturation en P (4-B), et le P soluble à l'eau (4-C).

Giroux, M. et T.S. Tran 1985 Évaluation du phosphore assimilable des sols acides avec différentes méthodes d'extraction en relation avec le rendement de l'avoine et les propriétés des sols. *Can. J. Soil Sci.* 65 : 47-60.

Giroux, M., D. Carrier et P. Beaudet 1996. Problématiques et méthode de gestion des charges de phosphore appliquées aux sols agricoles en provenance des engrais de ferme. *Agrosol* 9 (1) : 36-45.

Heckrath, G., P.C. Brookes, P.R. Poulton et K.W.T. Goulding 1995. Phosphorus leaching from soils containing different phosphorus concentrations in the Broadbalk experiment. *J. Environ. Qual.* 24 : 904-910.

Ross, G.C. et C. Wang 1993. Extractable Al, Fe, Mn and Si dans Soil sampling and method of analysis. M.R. Carter ed. p. 239-245.

Sharpley, A., T.C. Daniel, J.T. Sims et D.H. Pote 1996. Determining environmentally sound soil phosphorus levels. *J. Soil and Water Conservation* 51 (2) : 160-166.

Sharpley, A.N. 1995. Dependence of runoff phosphorus on extractable soil phosphorus. *J. Environ. Qual.* 24 : 920-926.

Simard, R.R., D. Cluis, G. Gangbazo et A.R. Pesant 1994. Phosphorus sorption and desorption indices in soil. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 25 : 1483-1494.

Simard, R.R., D. Cluis, G. Gangbazo et S. Beauchemin 1995. Phosphorus status of forest and agricultural soils from a watershed of high animal density. *J. Environ. Qual.* 24 : 1010-1017.

Simard, R.R. et C. Lapierre 1990. Les propriétés importantes pour la rétention des agents polluants. Colloque sur la conservation de l'eau en milieu agricole. CPVQ inc. p. 169-198.

Simard, R.R., D. Cluis, G. Gangbazo et A. Pesant 1993. Phosphorus in the Beauvillage river Watershed.

Sims, J.T. 1993. Environmental soil testing for phosphorus. *J. Prod. Agric.* 6(4) : 501-507.

Tabi, M., L. Tardif, D. Carrier, G. Laflamme, et M. Rompré 1990. Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles au Québec. Rapports synthèse et rapports régionaux. Entente auxiliaire Canada-Québec sur le développement agro-alimentaire.

Tran, T.S., J.C. Fardeau et M. Giroux 1988. Effects of soil properties on plant available phosphorus determined by isotopic dilution phosphorus-32 method. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52 : 1383-1390.

Tisdale, S.L., W.L. Nelson, J.D. Beaton 1985. Soil and fertilizer phosphorus. Dans *Soil, fertility and fertilizers*. MacMillan Pub. Co. New-York. 754 p.

Yuang, G et L. M. Lavkulic 1995. Environmental phosphorus indices in manure amended soils in Fraser basin of British Columbia, Canada. *J. Environ. Sci. Health.* 30 (6) : 841-857.