

Journée Grandes cultures (Section Fertilisation)

Saint-Rémi, 7 décembre 2010

NOS RECOMMANDATIONS DE FERTILISATION PHOSPHATÉE DANS LE MAÏS SONT-ELLES ADÉQUATES POUR L'OBTENTION DE RENDEMENTS MAXIMUMS ?

Louis Robert, M.Sc., agr.
MAPAQ Chaudière-Appalaches

Suite à l'obtention de rendements très inférieurs à leurs attentes ces dernières années, plusieurs intervenants et producteurs de grandes cultures ont remis en question les recommandations de fertilisation formulées sur la base du Guide du CRAAQ. En utilisant l'exemple du phosphore dans le maïs, ciblé de surcroit à cause des limites imposées par le Règlement sur les exploitations agricoles (RÉA), nous allons voir ici que les recommandations québécoises dépassent largement celles de provinces et états voisins, qu'elles ont fait l'objet de nombreux tests de validation, autant en parcelles de recherche que sur des entreprises agricoles, et qu'elles ne limitent aucunement la productivité.

La saison 2010 a probablement déjà contribué à dissiper ces doutes. En effet, si la fertilité chimique des sols avait été limitative à ce point, il eut été impossible d'obtenir les rendements moyens que l'on a vus cette année dans la plupart des cultures et des régions du Québec.

À lire et entendre ce qui se dit parfois au Québec dans le domaine de la fertilisation des sols, on ne peut s'empêcher de se dire « on nous raconte n'importe quoi ! ». Tout agronome expérimenté dans ce domaine sait que nos recommandations et applications moyennes d'engrais ont toujours été plus élevées qu'ailleurs. C'est un fait très facilement vérifiable, et c'est ce que j'ai fait en utilisant un exemple : un sol typique de Chaudière-Appalaches, sur lequel un producteur voulait cultiver du maïs-grain. Plus spécifiquement, j'ai comparé nos recommandations de phosphore avec celles de 10 états du nord-est des États-Unis et de l'Ontario.

EXEMPLE AVEC UN CAS TYPIQUE

Il s'agit d'un cas réel soumis par un producteur de ma région, dont les caractéristiques sont très représentatives : loam sableux de série Ste-Marie, teneurs en P de 110 kg/ha, Al 1138 parties par million (saturation P de 4,3 %). Il ne s'agit certainement pas d'un cas spécial ni exceptionnel : une saturation de 4,3 % n'est ni excessive, ni pauvre par rapport aux teneurs communément rencontrées (bien que le Guide de référence en fertilisation du CRAAQ situe l'optimum à plus de 5 %); la classe texturale loam sableux recouvre à peu près 70 % des superficies cultivées en Chaudière-Appalaches; et la série Ste-Marie est membre du grand groupe des Gleysols, comme beaucoup de sols de la plaine du St-Laurent.

Ce sol serait toutefois considéré très ou excessivement riche partout ailleurs dans le nord-est de l'Amérique du Nord. Le tableau 1 montre que la recommandation en engrains phosphaté pour ce cas au Québec est supérieure d'au moins 50 kg P₂O₅/ha par rapport à celle de nos plus proches « compétiteurs ».

Notre rendement moyen n'est pas très loin de la moyenne obtenue ailleurs. Ce qui est encore plus frappant, c'est la teneur en P du sol au-delà de laquelle on cesse de recommander du P₂O₅ dans les différentes juridictions. Par exemple, en Illinois, on ne recommande aucun phosphate pour du maïs sur tout sol dont la teneur en P dépasse 78 kg/ha : ni à la volée, ni comme démarreur. Ces recommandations doivent être assez fiables : le maïs se cultive dans cet État sur une superficie environ 12 fois grande comme celle du Québec, avec un rendement de près de 2 t/ha de plus qu'ici! Aucun engrais phosphaté n'y serait recommandé pour ce sol, jusqu'à ce que l'analyse ne redescende plus près du niveau optimal, ce qui peut prendre quelques années de culture sans ajout de P₂O₅. Seulement lorsque la teneur optimale serait atteinte proposerait-on alors l'application d'une quantité modérée. C'est la mise en pratique du concept que l'on appelle des « niveaux de suffisance », par opposition aux deux autres philosophies de recommandations, « enrichissement et entretien », et « saturation en bases ».

L'approche des niveaux de suffisance stipule qu'au-delà d'une teneur seuil en un élément donné « teneur optimale », aucune augmentation de rendement ne peut être espérée d'un apport de cet élément.

TABLEAU 1. Statistiques de production et recommandations d'apport en phosphore (kg P₂O₅/ha) pour un sol de texture loam sableux dosant 110 kg P/ha et 1138 ppm Al (Mehlich-3 ICP, 4,3 % saturation P) destinés à la culture du maïs grain, pour différents états et provinces du Nord Est de l'Amérique du Nord.

État/province	Superficie en maïs-grain 2007 (ha)	Rendement Moyen 2007 (t/ha)	Méthode d'extraction P	Résultat converti	Recommandation (kg P ₂ O ₅ /ha)	Teneur max avec recom. > 0*
Québec	449 000	9,1	Mehlich- III	110 kg/ha	70	510**
Ontario	831 600	8,5	Olsen	16 ppm	20	208
Illinois	5 281 335	11,0	Bray-1	47 ppm	0	78
Indiana	2 630 550	9,7	Bray-1	47 ppm	0	78
Iowa	5 605 095	10,7	Mehlich- III	49 ppm	0	103
Michigan	951 045	7,8	Bray-1	47 ppm	0	78
Minnesota	3 156 660	9,2	Olsen	16 ppm	14	172
Nebraska	3 723 240	10,0	Bray-1	47 ppm	0	67
Ohio	1 460 967	9,4	Bray-1	47 ppm	0	78
Pennsylvanie	396 606	8,0	Mehlich- III	49 ppm	21	112
Vermont	37 232		Modified Morgan	4,8 ppm	20	160
Wisconsin	24 282	8,5	Bray-1	47 ppm	0	70

*Il s'agit de la teneur du sol, en kg P/ha extraite (ou convertie) au Mehlich 3, à partir de laquelle il n'y a plus d'engrais P₂O₅ recommandé;

**Au Québec, sur sol léger, aucune teneur maximale spécifiée pour la recommandation de 20 kg P₂O₅/ha;

Sources : USDA National Agricultural Statistics Service : superficies et rendements par état; Statistique Canada, Division de l'agriculture, Série de rapports sur les grandes cultures, Publ. No 22-002-XIF, Vol.87 (2008) no.1; Quirine Ketterings, Cornell University, Ithaca, NY; Steve Ebelhar, University of Illinois; Bill Jokela, University of Vermont; Keith Reid, Ontario Ministry of Agriculture, Food, and Rural Affairs; John Sawyer, Iowa State University.

Dans tous les cas connus d'études comparatives, les résultats économiques et agronomiques des producteurs ont supporté l'utilisation des niveaux de suffisance, et invalidé les autres théories (Chase et al, 1991; Eckert, 1987; Eckert et McLean, 1981; McLean et al, 1983). Les compagnies d'engrais minéraux puissent souvent dans l'une ou l'autre de ces théories des éléments pour appuyer leur approche (Black, 1993). Par exemple, de la théorie « enrichissement et entretien », la quantité de P exportée par les récoltes est évoquée pour majorer les quantités de P₂O₅ à apporter pour des objectifs de rendements supérieurs. De la même théorie, on assimile le sol à une banque dont le solde doit être maintenu élevé. Pourtant, les travaux de recherche ont depuis longtemps démontré que, dû au phénomène de fixation du phosphore dans le sol, maintenir un sol largement au-dessus du niveau de suffisance requiert beaucoup plus d'engrais que de viser la limite supérieure du niveau de suffisance (Blackmer, 1997; McCollum, 1991; Thomas, 1989).

Il faut aussi comprendre que les quantités d'engrais requises n'ont pas grand-chose à voir avec les « exportations », ni même les rendements : encore une croyance populaire, qui va complètement à l'encontre du concept des niveaux de suffisance. Pourquoi? Les explications ne manquent pas :

1. À partir du moment où le sol peut fournir la quantité suffisante d'un élément, le rendement devient limité par un autre facteur : chaleur, humidité, aération, ensoleillement, etc.
2. Dans le calcul de ces exportations, on doit se rabattre sur des valeurs essentiellement théoriques : concentration (d'un tableau) X rendements (probable, mais obtenu ?) = quantités exportées. Les vérifie-t-on ces valeurs en pratique ? Les résultats réels sont souvent très loin des calculs.
3. Il y a autant de variabilité à l'intérieur d'un champ pour la concentration en P dans la partie récoltée (grain) qu'il y en a pour sa concentration dans le sol; et ces deux mesures (P dans le

grain et P dans le sol) sont la plupart du temps indépendantes, c'est-à-dire que les champs (ou zones dans le champ) à forte teneur en P dans le sol ne correspondent pas du tout aux endroits où l'on mesure plus de P dans le grain. Ajoutez à cela la variabilité du rendement, elle-même indépendante des deux autres, et on comprend vite qu'on ne peut calculer la fertilisation en fonction des exportations.

4. En empruntant un raisonnement « comptable », on oublie le fait que le phosphore disponible à la culture est la résultante d'un système infiniment plus complexe qu'un simple réservoir. Qu'il comporte des échanges continuels entre P organique, P inorganique, P labile, adsorbé, etc., et dont certains sont dépendants de la vie microbienne. Bref, on perçoit le sol comme une chaudière, plutôt qu'un système vivant. À titre d'exemple, des travaux ont démontré qu'un changement de mode de travail du sol (du labour au semis direct) a plus d'impact sur l'évolution du P dans le sol à long terme que le choix des cultures dans la rotation.

Une illustration éloquente du manque relation entre « exportations » et équilibre de la teneur du sol en P nous a été donnée par les travaux de Marcel Giroux de l'IRDA.

Tableau 2. Évolution de la [P]sol suite à des cultures successives sans apports P2O5 (Giroux, 2002)

Série de sol	P initial	P/orge	P/maïs	P/dactyle	Diminution cumul. P
----- kg P/ha -----					
Pontiac	116	103	94	90	26
Rideau	132	116	105	95	37
Ste-Rosalie	157	148	123	121	36
St-Urbain	213	188	175	164	49
Achigan	401	376	361	358	43
Lanoraie	513	475	470	448	65
Baisse/culture	21	13	9		
Prélèvement	33	58	50		

Le discours prédominant au Québec est à cet égard plutôt contradictoire : on associe facilement la culture du maïs aux pertes de P dans l'environnement, tout en lui conférant, par ses exportations théoriques, une capacité d'absorption en P supérieure aux autres cultures.

UNE LONGUE HISTOIRE

La recommandation ontarienne pour notre sol exemple (20 kg P₂O₅/ha) démontre d'ailleurs une stabilité remarquable depuis les années 1970 (Figure 1). Il en a été tout autrement au Québec, depuis les premières éditions de « La fertilisation rendue facile » (Les Engrais Chimiques du Québec inc. 1976), des « Grilles de fertilisation » du Conseil des productions végétales du Québec (CPVQ, 1989), jusqu'au Guide de référence en fertilisation du CRAAQ (publié en 1re édition en 2003 et utilisé jusqu'à ce jour). C'est entre 1994 et 2003 que la recommandation au Québec a été la plus basse, à 48 kg/ha.

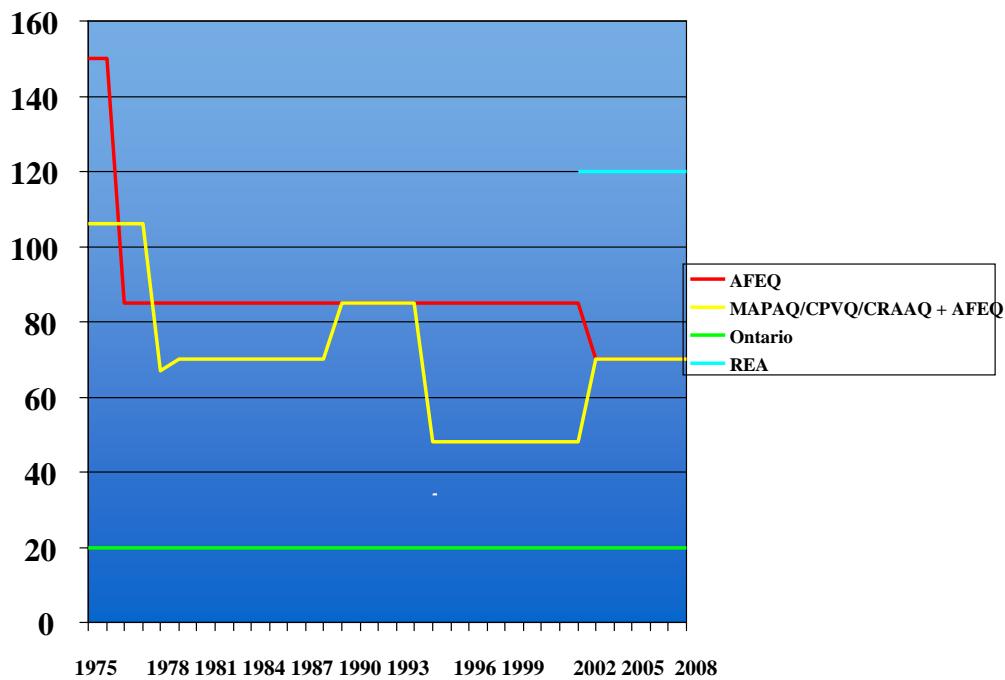


Figure 1. Évolution de la recommandation d'engrais phosphaté depuis 1975 pour le sol exemple, selon les guides de l'industrie des engrains minéraux (AFEQ), du service public (comité incluant les représentants de l'Industrie, sauf pour 1994-2003), et du ministère de l'agriculture, de l'alimentation et des affaires rurales de l'Ontario. Le dépôt maximal autorisé par le Règlement sur les exploitations agricoles de 2002 est aussi inclus (REA).

UN ÉCART GÉNÉRALISÉ, MAIS QUI S'EXPLIQUE....

Cette situation ne se limite évidemment pas au cas de l'exemple utilisé jusqu'ici. La figure 2 illustre plus clairement l'écart dans la recommandation P_2O_5 entre Québec, Ontario, et Iowa pour toutes les classes de richesse, ainsi que les intervalles jugés « optimaux ». Sauf pour les sols de moins de 40 kg P/ha, la recommandation québécoise d'engrais phosphaté pour le maïs est toujours nettement au-dessus de celles des autres états ou provinces.

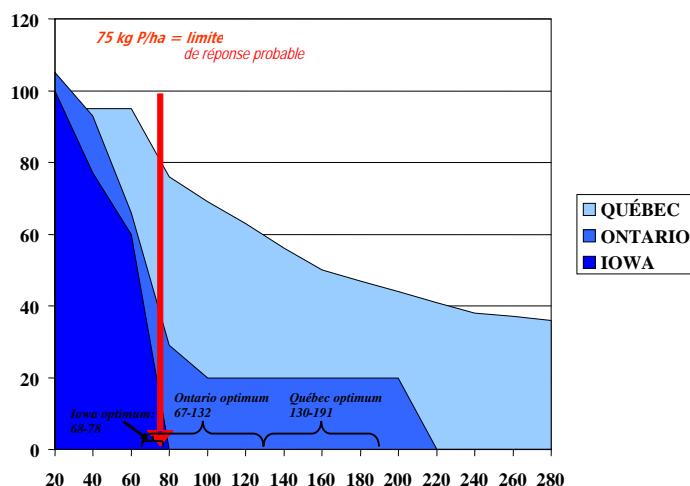


Figure 2. Dose de phosphate (kg P₂O₅/ha) en fonction de la teneur du sol en phosphore (kg P/ha) et teneurs en P jugées optimales, selon les guides de références de l'Ontario, de l'Iowa, et du Québec.

De façon trop simpliste, si on utilisait les normes américaines, les quantités de phosphore entrant sur les fermes sous forme d'engrais minéraux seraient considérablement réduites. Après tout, c'est ce qu'on fait en alimentation animale (Normes du National Research Council, 2001).

Une brève revue de littérature permet de comprendre que ce ne sont pas les résultats de la recherche qui divergent d'un endroit à l'autre, mais les quantités que l'on ajoute comme marges de sécurité, ou encore la tolérance aux baisses des teneurs des sols excessivement riches, et autres considérations. Dans un grand nombre d'états américains, on considère qu'au-dessus de 75 kg P/ha dans le sol, le rendement n'augmente plus (Heckman et al., 2006). Ce qui correspond assez bien aux résultats des travaux des chercheurs québécois Annie Pellerin et Léon-Étienne Parent : pour les sols argileux, ce seuil serait de 56 kg/ha, et 90 kg/ha pour les sableux (pour une teneur en aluminium de 1000 ppm environ- Parent, 2003; Pellerin et al. 2006). L'exercice de validation de la grille de recommandation de phosphore pour le maïs-grain, portant sur 17 sites présentant un large éventail de caractéristiques a conclu qu'on pouvait apporter des quantités de P en-deçà des exportations, même sur sols classés pauvres, sans perte de rendement (Pellerin et al., 2006). Des sites étudiés, 11 n'ont démontré aucune variation du rendement avec l'application de P₂O₅, deux ont connu une hausse, alors qu'on enregistrait une baisse de rendement aux quatre autres sites.

Les enquêtes périodiques sur l'évolution de la teneur en P et K de nos sols révèlent que les teneurs ne baissent pas, mais se maintiennent à un niveau bien supérieur au seuil de suffisance agronomique. Dans le cas du P, la moyenne se maintient à près de 149 kg P/ha pour une saturation de 6,1 % (Beaudet et al., 2003). La compilation publiée récemment par l'industrie conclue également que depuis 2001 près de 50 % des échantillons québécois dosent plus de 50 ppm P-Bray-1, soit 125 kg P/ha Mehlich-3 (IPNI, 2010).

Les essais en régions, sur des entreprises agricoles, confirment la faible probabilité d'une augmentation de rendement suite à l'ajout de phosphore sur beaucoup de nos sols. Aucun des 27 sites-années n'avaient donné d'augmentation de rendement dans le réseau établi à la fin des années 1990 (Barnett, 1997) en grande partie parce que les sols du Québec se trouvent la plupart du temps à des niveaux de richesse supérieurs au seuil de réponse. De la même façon, les résultats publiés par l'industrie démontrent que les niveaux de fertilisation P₂O₅ du maïs économiquement optimums équivalaient en général à 50 % des recommandations en vigueur à l'époque, sensiblement les mêmes que celles utilisées à ce jour (Bruulsema, 1997).

On a aussi historiquement grandement sous-estimé l'efficacité relative du phosphore provenant des engrains de ferme : jusqu'en 1994, on ne considérait que 24 % de phosphore efficace par rapport à 100 % pour l'engrais minéral, malgré l'unanimité des résultats de recherche concernant l'efficacité comparable ou supérieure des engrains de ferme comme source de P₂O₅ (MacLean et al., 1983; Barnett, 1988; Zhang et al., 1995). Depuis ce temps, on a corrigé le tir un tant soit peu, en leur attribuant aujourd'hui une efficacité relative de 40 % (fumier de bovins, automne) à 80 % (autres engrains de ferme, printemps).

Finalement, il faut relativiser l'importance de l'analyse chimique du sol comme facteur explicatif des rendements des cultures. De tout temps, les expériences à la base des recommandations d'engrais, ce qu'on appelle le calibrage des méthodes d'analyse de sol (reliant la teneur du sol en un élément donné et le rendement obtenu, tout autre facteur étant égal) n'ont jamais fait mieux que 40 à 45 % en terme de fiabilité (R^2 = coefficient de détermination). Cela veut dire que, même en contrôlant les autres facteurs (texture, drainage, densité, climat, etc), il est très possible qu'un sol classé pauvre ne produise pas plus avec l'ajout d'engrais, ou qu'une réponse soit observée sur un sol excessivement riche. Il demeure que la relation soit suffisamment étroite (« significative ») pour conférer à l'analyse de sol une fiabilité acceptable comme outil agronomique. En d'autres mots, l'analyse de sol serait un peu l'équivalent agronomique de ce que peut représenter la prise de sang en médecine : quel médecin oserait poser un diagnostic de santé globale d'un patient, sans jamais l'avoir examiner, uniquement sur la base d'une analyse de sang ? Il est grand temps que l'on s'intéresse davantage à la condition physique de nos sols, par des profils de sol par exemple.

D'ailleurs, en pratique, des examens du profil nous éclairent davantage sur les causes des rendements décevants obtenus sur des champs de producteurs, que l'analyse de sol : pulvérisation de la structure, compaction, problèmes d'égouttement, cuvettes, enracinement limité, etc. La diminution de la macroporosité, ainsi que le très faible taux d'infiltration de l'eau de pluie, résultantes d'un ou de plusieurs des facteurs précités, devraient retenir notre attention de façon prioritaire. Autant de facteurs directement reliés à la variation de l'état de la culture dans le champ et à son rendement final.

CONCLUSION

Ce survol permet de constater que les recommandations de fertilisation au Québec sont loin d'être limitatives au rendement. Elles peuvent même paraître relativement généreuses si on ne les replace pas dans leur objectif et leur contexte : ce sont essentiellement des guides de référence, une base utile au producteur et à son conseiller et dont l'objectif est de minimiser les risques agronomiques (perte de rendement) et environnementaux.

RÉFÉRENCES

- Association des fabricants d'engrais du Québec. 1984. Guide de fertilisation 1^{re} éd.
Association des fabricants d'engrais du Québec. 1987. Guide de fertilisation 2^e éd.
Association des fabricants d'engrais du Québec. 1990. Guide de fertilisation 3^e éd.
Association des fabricants d'engrais du Québec. 1994. Guide de fertilisation 4^e éd.
Association des fabricants d'engrais du Québec. 1999. Guide de fertilisation 5^e éd.
Barnett, G. M. 1988. Protocole d'application des fumiers et lisiers. Pp. 77-106 in Journée de perfectionnement sur la gestion des fumiers, Cahier de conférences. Trois-Rivières, 7 décembre 1988.
Barnett, G. M. 1997. Maïs-grain : besoin et placement de l'engrais, travail du sol, précédents culturaux et environnement. Pp. 79-85 in Colloque de l'Entente Canada-Québec pour un environnement durable en agriculture (Plan Vert) : « L'agriculture durable : un virage bien amorcé », Drummondville, 26 novembre 1997. Conseil des Productions Végétales du Québec (CPVQ) inc.
Beaudet, P., Grenier, M., Giroux, M., et Girard, V. 2003. Description statistique des propriétés chimiques des sols minéraux du Québec. Ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation du Québec (MAPAQ) et Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA), Québec.
Black, C.A. 1993. Soil Fertility Evaluation and Control. Lewis Publ. 746 p.
Blackmer, A.M. 1997. What about yield goals ? Integrated crop management June 2, 1997 issue, Iowa State University, pp. 82-83.
Bruulsema, T.W. 1997. Une approche à long terme pour fertiliser les sols du Québec. Pp. 57-62 in « Bien nourrir le sol... pour mieux nourrir le monde » Cahier du Symposium de l'AFEQ, St-Hyacinthe, 14 janvier 1997.
Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). 2003. Guide de référence en fertilisation, 1^{re} éd.
Chase, C., Duffy, M., Webb, J., et Voss, R. 1991. An economic assessment of maintaining high phosphorus and potassium soil test levels. Am. J. Alternative Agr. 6: 83-88.
Conseil des productions végétales du Québec. 1989. Grilles de fertilisation.
Conseil des productions végétales du Québec. 1994. Grilles de référence en fertilisation.
Centre de références en agriculture et agroalimentaire du Québec. 2003. Grilles de référence en fertilisation, 1^{re} éd.
Dionne, J.-L. 1977. Calibration des méthodes d'analyse de sols, réponse du maïs aux engrains NPK, bilan P et K. Rapport du projet de calibration des sols en vue de la culture du maïs, Commission des sols, CPVQ.
Eckert, D.J. 1987. Soil Test Interpretations: Basic Cation Saturation Ratios and Sufficiency levels. pp. 53-64 in Brown, J.R. (ed.), Soil testing: Sampling, Correlation, Calibration and Interpretation. Soil Science Society of America Special Publication no 21. SSSA, Madison, Wisconsin, 144 p.
Eckert, D.S., et McLean, E.O. 1981. Basic Cation Saturation Ratios as a basis for fertilizing and liming agronomic crops: 1. Growth Chamber studies. Agron. J. 73: 795-798.
Giroux, M., Rivest, R., Cantin, J., et Tremblay, G. 2002. Évolution des teneurs en phosphore dans les sols selon la fertilisation, la richesse en P et les types de sols. Texte d'une conférence présentée dans le Colloque sur le phosphore : une gestion éclairée ! Ordre des agronomes du Québec, Drummondville, 6 novembre 2002.
Gouvernement du Québec, Ministère de l'Agriculture. 1979. Grilles de fertilisation.
Gouvernement du Québec, Ministère de l'Agriculture. 1980. Grilles de fertilisation.
Heckman, J.R., Jokela, W., Morris, T., Beegle, D.B., Sims, J.T., Coale, F.J., Herbert, S., Griffin, T., Hoskins, B., Jemison, J., Sullivan, W.M., Bhunbla, D., Estes, G., et Reid, W.S. 2006. Soil test calibration for predicting corn response to phosphorus in the northeast USA. Agron. J. 98: 280-288.
International Plant Nutrition Institute (IPNI). 2010. <http://nane.ipni.net/articles/NANE0045-EN>
Les Engrais Chimiques du Québec inc. 1976. La fertilisation rendue facile. 3^e éd.
MacKenzie, A.F., et Kirby, P.C. 1979. Effects of fertilizers and soil series on yields of corn, barley, wheat and soybeans : a summary 1968-1978.
MacLean, A.J., Miller, M.H., et Robinson, J.B. 1983. The fertilizer potential of animal manures and environmental constraints on their use. Pp. 21-51 in Farm Animal Manures in the Canadian Environment. Publ. No 18976 du Conseil national de recherches du Canada, Ottawa. 139 p. Ministère de l'agriculture, de l'alimentation et des affaires rurales de l'Ontario. 1999. Recommandations pour les grandes cultures 1999-2000. Publ. 296F.
McCollum, R.E. 1991. Buildup and decline in soil phosphorus: 30-year trends on a typic Umbrabuult. Agron. J. 83:77-85.
McLean, E.O., Hartwig, R.C., Eckert, D.J., et Triplett, G.B. 1983. Basic cation saturation ratios as a basis for fertilizing and liming agronomic crops. II. Field studies. Agron. J. 75: 635-639.

- Ministère de l'Agriculture et de la Colonisation du Québec. 1965. Le sol, sa fertilisation. Publication no. 249, Conseil des engrains chimiques.
- Ministère du développement durable, de l'environnement et des parcs (MDDEP). 2002. Règlement sur les exploitations agricoles. Gazette officielle du Québec, 12 juin 2002.
- National Research Council. 2001. Nutrient requirements for dairy cattle, 7e édition révisée. National Academy Press. Washington, D.C. 381 p.
- Parent, L.-É. 2003. L'indice du risque du phosphore comme outil d'aide à la décision pour les épandages. Texte de conférence dans le cadre du Forum de discussion sur les normes de pratiques agronomiques en fertilisation. Ordre des agronomes du Québec, Saint-Hyacinthe, 27 février 2003.
- Pellerin, A., Parent, L.-É., Tremblay, C., Fortin, J., Tremblay, G., Landry, C., et Khiari, L. 2006. Agri-environmental models using Mehlich-III soil phosphorus saturation index for corn in Québec. Can. J. Soil Sci. 86: 897-910.
- Stevenson, C.K. 1991. [Soil test calibration results for corn and soybeans in Ontario]. Information for Industry Personnel, Ontario Ministry of Agriculture and Food, Agdex 111/533.
- Thomas, G.W. 1989. The soil bank account and the farmer's bank account. J. Prod. Agric. 2 : 122-124.
- Zhang, T.Q., MacKenzie, A.F., et Liang, B.C. 1995. Long-term changes in Mehlich-3 extractable P and K in a sandy loam soil under continuous corn (*Zea mays* L.). Can. J. Soil Sci. 75: 361-367.