

# Colloque sur le phosphore

---

Une gestion  
éclairée !

## LES OUTILS ACTUELS DE MESURE DU PHOSPHORE À LA FERME

**Jean Cantin**, agr. et conseiller en grandes cultures  
Direction régionale de la Montérégie, Centre de service de Saint-Bruno  
Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec

M. Jean Cantin est agronome et conseiller en fertilisation des grandes cultures à la Direction régionale de la Montérégie, secteur Est, du MAPAQ. Il a occupé plusieurs emplois comme conseiller en conservation des sols et en gestion des fumiers. Depuis cinq ans, M. Cantin se consacre à la problématique de la fertilisation en phosphore dans la culture du maïs-grain. Il a présenté plusieurs conférences sur les résultats d'essais d'engrais de démarrage obtenus sur près de 300 entreprises agricoles majoritairement membres des clubs agroenvironnementaux. Au cours des deux dernières années, M. Cantin a travaillé étroitement avec le Centre de Recherche sur les Grains (CÉROM) pour consolider l'expertise acquise en fertilisation phosphatée.

# LES OUTILS ACTUELS DE MESURE DU PHOSPHORE À LA FERME

## Introduction

---

Lorsque pour traiter un dossier nous rassemblons toute l'information nécessaire dans le but d'en faire l'analyse et de porter un jugement professionnel, nous devons avoir un niveau de confiance assez élevé envers les informations dont nous disposons. Avant de livrer nos recommandations et d'y engager notre compétence et notre professionnalisme, nous avons la responsabilité, en tant que professionnel, de nous assurer de la validité des informations contenues dans chaque dossier.

Au cours des dernières années, la gestion du phosphore a pris des proportions tout à fait inattendues dans le milieu agricole. Étant reconnu comme l'un des facteurs-clés de la croissance végétale, le phosphore a traditionnellement été associé à des préoccupations de productions agricoles. Victime de son propre succès, le phosphore est devenu, depuis quelques années, la source de bien des préoccupations environnementales. Il est souvent à tort comparé à la toxicité des pesticides ou aux rejets de l'industrie. Le phosphore dissous dans l'eau n'est pourtant pas directement considéré comme étant toxique pour l'humain ou les animaux (Sharpley *et al.*, 1998). En fait le phosphore est un élément essentiel en physiologie végétale; il compte parmi les trois éléments majeurs en fertilisation. Il est si efficace à stimuler la croissance des plantes qu'il provoque les mêmes effets dans les milieux où il n'était pas prévu se retrouver, c'est-à-dire dans les cours d'eau. En effet, en sa présence, la flore aquatique a une croissance excessive par rapport à la capacité du milieu à maintenir son équilibre, ce qui a pour conséquence, l'eutrophisation des cours d'eau.

Plusieurs études ont irrévocablement relié les problèmes de pollution diffuse des terres agricoles au phosphore. En 1994, l'Agence américaine de Protection de l'environnement rapportait que la dégradation des eaux d'approvisionnement des rivières et des lacs était, dans une proportion de 70 %, causée par la pollution diffuse provenant du milieu agricole (Sharpley *et al.*, 1998). De fait, plusieurs sols du Québec sont reconnus comme ayant un contenu élevé en phosphore, notamment en raison des épandages excessifs d'engrais organiques qui ont perduré pendant quelques décennies.

C'est donc en regard de préoccupations environnementales que les professionnels ont dû revoir leur références pour s'assurer d'une gestion plus efficace et plus pointue du phosphore. Une approche de gestion du phosphore à la source a donc été préconisée par le milieu.

Puisque le phosphore est considéré essentiel à la croissance des plantes, la question est aujourd'hui de savoir quelle quantité de cet élément est nécessaire pour répondre aux besoins de productivité agricole et quelle quantité est jugée « excessive » compte tenu des rejets indésirables dans l'environnement ?

### **Outils de mesure du phosphore**

---

Au cours des dernières années, toute une gamme d'outils de mesure du phosphore a été évaluée et réévaluée pour répondre à cette prérogative de mieux gérer le phosphore. Parmi les outils déjà bien connus, il y a les grilles de références en fertilisation. Elles sont conçues et calibrées pour chaque culture ayant une certaine importance économique au Québec. Ces grilles font le lien entre les apports de fertilisants et la réponse positive probable en terme de rendements des cultures. Elles font régulièrement l'objet de révisions et d'améliorations tangibles. Une publication révisée des grilles de références en fertilisation est d'ailleurs prévue incessamment. Selon une étude réalisée par la « National Soil and Fertilizer Research Committee » (Fitts *et al.*, 1956), aucune corrélation ne peut prédire à 100 % la réponse des cultures selon la richesse du sol. Le jugement professionnel dans l'utilisation de ces grilles est donc toujours de mise.

Le contenu en phosphore dans les amendements organiques est aussi un outil utile pour les conseillers agricoles. La demande pour les analyses réalisées en laboratoire a connu une croissance phénoménale depuis l'entrée en vigueur du Règlement sur la réduction de la pollution d'origine agricole (RRPOA), en 1997, et maintenant, dans la même foulée, le Règlement sur les exploitations agricoles (REA) qui rend obligatoire la production d'un plan agroenvironnemental de fertilisation (PAEF) à partir de résultats d'analyses récentes.

Les quantités de phosphore qu'une entreprise agricole a à gérer doivent être balisées et contre-vérifiées. La valeur des engrais de ferme est définie dans plusieurs guides régionaux ainsi que dans ceux du CRÉAQ (Comité de Références Économiques en Agriculture du Québec). Ces guides présentent des moyennes de résultats d'analyses de déjections animales

classées par production ou par type de gestion d'élevage (Rivest *et al.*, 1998). À partir des informations contenues dans ces guides, il est possible de valider certains paramètres de gestion tels que l'efficacité du brassage pour l'homogénéisation d'une fosse à lisier ou l'utilisation de phytase dans l'alimentation, etc. Une foule de renseignements et de résultats présentés dans ces documents permettent de vérifier si les déjections de l'élevage contenues au dossier correspondent à celles d'un élevage semblable répertorié avec des marges de variations acceptables. Plusieurs projets sont aujourd'hui en place pour caractériser la plupart des engrais organiques produits sur l'ensemble du territoire agricole du Québec.

L'approche « bilan minéral » voulant que les importations soient en équilibre avec les exportations retient depuis quelque temps une grande attention (Cantin, 1998). Certains systèmes de production s'avèrent plus judicieux que d'autres pour valoriser ses sous produits d'élevages. Le calcul du bilan minéral de l'ensemble d'une entreprise agricole permet d'en apprécier sommairement l'efficacité.

Les bilans minéraux agronomiques et les bilans minéraux à la surface du sol constituent ainsi d'autres outils plus précis, à la portée des conseillers en productions agricoles qui valorisent la saine gestion du phosphore. Ces outils sont certes perfectibles mais leur utilisation balise les choix qui se présentent aux agriculteurs. Pour établir des recommandations appropriées, tant au plan agronomique qu'au plan environnemental, il nous faut connaître la valeur des informations qui en découlent.

Le bilan alimentaire des troupeaux d'élevage (Bachand, 2001) s'ajoute à ces outils puisqu'il permet de déterminer les quantités de phosphore qui devraient se retrouver dans les déjections animales. Le bilan alimentaire fait ressortir la performance des taux de conversion alimentaire atteints par le troupeau pour chaque éleveur. Les différences d'efficacité entre les éleveurs sont parfois considérables. Les plus efficaces sont récompensés par des déjections animales moins riches en phosphore.

En ce qui concerne le phosphore contenu dans les engrais minéraux achetés par les entreprises agricoles, il est facile à quantifier. La législation sur les engrais minéraux garantit le minimum des concentrations d'éléments indiquées sur l'emballage des produits (ACIA). Le coût du phosphore est également une garantie suffisante pour ne pas retrouver plus de phosphore dans le produit que celui indiqué sur l'emballage.

Pour gérer le phosphore d'une entreprise agricole, il y a également les analyses de la richesse du sol. Valider une analyse de sol n'est pas une mince affaire. Contrairement aux outils présentés précédemment, il est difficile de contre-vérifier avec certitude les résultats des analyses de sol contenus au dossier. Une entreprise en surplus ayant un bilan en phosphore très excédentaire par rapport à la capacité réceptrice de ses terres pourra difficilement justifier que l'ensemble de ses sols puisse être pauvre. Une terre nouvellement défrichée ne peut pas non plus livrer des niveaux de phosphore très élevés. Les vérifications d'une analyse de phosphore ne sont que de cet ordre. Analyser un sol, c'est un peu comme ouvrir une boîte de Pandore. Vous pouvez avoir une bonne idée du niveau de richesse en phosphore de vos sols, mais une fois que le résultat vous est parvenu du chimiste du laboratoire, même s'il ne concorde pas vraiment avec vos attentes, il faut faire avec.

## Questions

---

Les professionnels en fertilisation de la Montérégie, secteur Est, reçoivent de temps à autre, des évaluations ou des résultats d'analyses de laboratoire qui sont douteux. Durant la saison de 1997, cette proportion de résultats douteux a augmenté considérablement dans la cohue de la fermeture des laboratoires publics en faveur des laboratoires privés. Cette situation a fait naître chez ces conseillers un esprit critique envers les résultats d'analyses et a conduit à développer certains outils de contrôle et de validation.

La gestion du phosphore dans le cadre du présent REA nous oblige à plus de précision. Dorénavant, nous devons évaluer et mesurer tout le phosphore présent sur l'entreprise agricole pour mieux le gérer. Le phosphore est devenu la pierre angulaire de plusieurs décisions quant à la gestion des entreprises agricoles.

Les analyses réalisées en laboratoire prennent donc une place prépondérante dans l'application légale du REA. À elles seules, les analyses du sol déterminent quelles quantités de phosphore peuvent être disposées sur les sols de l'entreprise. Selon « l'abaque » imposé par le règlement, pour chaque niveau de richesse du sol, vous êtes tenu de recommander une quantité maximale de phosphore par hectare de culture. Dans ce contexte, prélever des échantillons de sol pour en évaluer la teneur exacte en phosphore est devenu critique pour plusieurs entreprises agricoles, principalement pour celles situées dans les zones en surplus, d'où l'importance que prennent les évaluations dont disposent les agronomes.

En tant que professionnels vous devez de vous questionner. Peut-on valider les résultats d'une analyse de sol ? Les échantillons prélevés aux champs sont-ils vraiment représentatifs de la richesse du sol ? Quelle est la précision du service d'analyse dont nous disposons ? Cette précision est-elle suffisante à des fins agronomiques ? ... à des fins environnementales ? Y a-t-il des différences entre les résultats obtenus des laboratoires de recherche et ceux des laboratoires privés ?

Plusieurs questions ont été soulevées dans les milieux scientifiques pour comprendre l'ampleur des répercussions que peut causer la variation des résultats d'analyses de sol en phosphore. L'utilisation du niveau de phosphore comme seuil environnemental a soulevé certaines controverses politiques chez nos voisins du Sud parce qu'il impose, selon eux, des contraintes économiques déraisonnables aux producteurs agricoles (Daniels *et al.*, 2001). D'autres ont questionné son efficacité en tant que critère à gérer les décisions entourant la qualité de l'eau (Sims, 1993 ; Combs et Bundy, 1995). Cette approche qui ne cible que les niveaux de richesse du sol en phosphore ne considère pas les facteurs de transport du phosphore hors des champs qui apparaissent être tout aussi importants, sinon plus, dans le phénomène de pollution diffuse.

La prochaine partie de ce texte se veut un bref aperçu ainsi qu'une réflexion des inquiétudes déjà formulées en recherche sur la précision des résultats d'analyses de sol tels que nous les rencontrons et sur la pertinence de réglementer au kilogramme près la gestion du phosphore à la ferme. Ces préoccupations ciblent davantage les sols dont la richesse en phosphore avoisine les 150 kg/ha, ou un taux de saturation en phosphore d'environ 10 %, ce qui correspond aux seuils environnementaux prescrits.

## **Sources de variation des résultats d'analyses de phosphore**

---

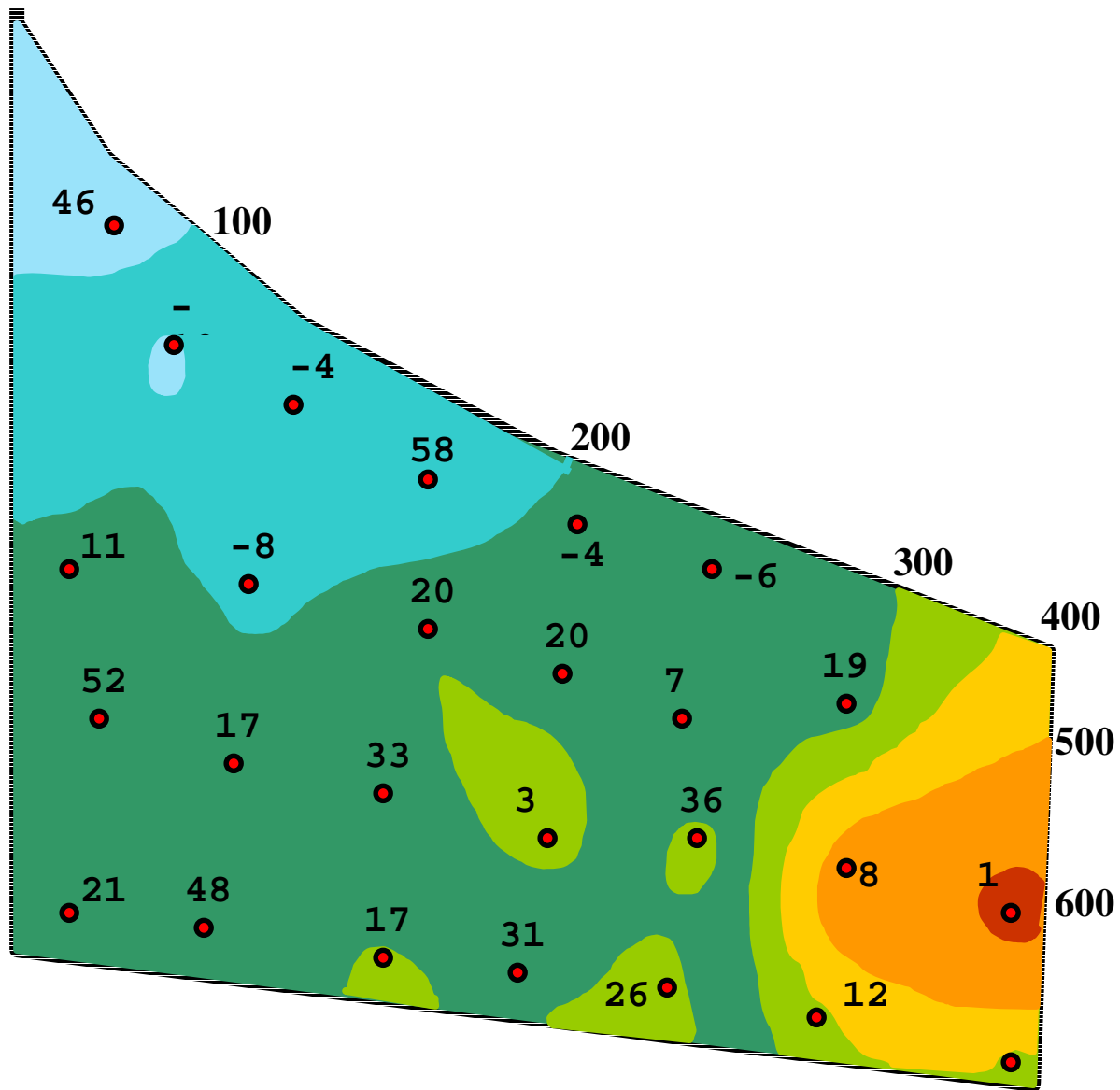
### **Champ**

La première et probablement la plus importante source de variation des résultats d'analyses de phosphore constitue le champ lui-même. Les multiples cartes de richesses de sol en phosphore produites par « GPS » (Global Positioning System) l'ont largement démontré (Daniels *et al.*, 2000a). Le sol est un milieu hétérogène (Figure 1). Les variations spatiales du phosphore dans un champ sont naturelles (Sauer *et al.*, 1998). Elles sont souvent reliées à la topographie et à la texture du sol. Ces variations sont également accentuées par les pratiques agricoles. Le bouleversement du sol fait par les travaux de nivellement, les différences

d'efficacité du drainage qui affectent les rendements, et par conséquent, les prélèvements année après année, les inégalités des épandages d'engrais organiques et de chaux sont autant de facteurs de variations qui nous obligent à bien échantillonner chaque champ. (Daniels *et al.*, 2001) ont trouvé un coefficient de variation spatiale (C.V.) moyen de 31,3 % suite à l'évaluation du taux de phosphore de 15 prairies recevant des engrais organiques (Tableau 1). Parmi ces prairies, huit d'entre elles avaient des niveaux inférieurs à 150 kg/ha avec des C.V. variant entre 27 % et 65 %. Pour traduire la moyenne de ces variations, disons qu'un sol à 150 kg/ha de phosphore peut osciller entre 103 et 195. (Nolin *et al.*, 1991) ont publié des résultats de recherches sur les sols de la plaine de Montréal démontrant de grandes variations spatiales avec un C.V. de 43 % pour le phosphore. Tremblay (2001) a rapporté des observations semblables pour des sols de la station fédérale de recherche de l'Acadie avec une fertilisation à base d'engrais minéraux seulement (Tableau 2). Ces variations sont plus importantes dans l'horizon 0 - 15 cm que 15 - 30 cm (Mahli *et al.*, 1991). Lockman et Molloy (1984) ont rapporté des variations pour tous les éléments des sols qu'ils ont analysés. Les éléments les plus mobiles étaient ceux qui enregistraient les plus grandes variations. Ainsi, compte tenu de ces variations spatiales du taux de phosphore dans un sol, l'évaluation d'un champ ne peut être plus précise que la qualité d'un échantillonnage représentatif de ce champ.

Figure 1 : Cartographie géoréférencée de la richesse du sol en phosphore et de son évolution saisonnière pour un champ de 2,4 hectares. Les niveaux de phosphore, en kg/ha, sont indiqués à l'extérieur du champ. Les chiffres à l'intérieur indiquent les pourcentages relatifs des changements de niveaux de phosphore entre novembre et mai pour chaque point ( $(P_{\text{automne}} - P_{\text{printemps}}) / P_{\text{printemps}} \times 100$ ).

Source : Daniels *et al.*, 2000





**Tableau 1 : Coefficients de variation spatiale mesurés sur des prairies recevant des engrais organiques.**

Prairies	ha	n	Phosphore		
			moyenne ( kg/ha )	écart-type ( kg/ha )	C.V. ( % )
RV1 – printemps <sup>(1)</sup>	2,4	26	133	64	48
RV1 - automne	2,4	26	148	63	43
RV2	7,3	28	72	30	42
RV3 <sup>(2)</sup>	3,2	19	7	4	65
RV4	5,7	28	300	34	11
OH1 - printemps	2,0	18	426	51	12
OH1 - automne	2,0	18	437	59	13
OH2 - printemps	2,0	20	222	51	23
OH2 - automne	2,0	20	259	67	26
OH3	4,1	100	163	44	27
OH4	4,2	100	126	33	27
OH5	2,5	102	284	64	23
OH6	3,5	105	126	51	41
OH7	3,2	100	102	38	37
OH8	1,1	96	345	107	31

<sup>(1)</sup> Prairies évaluées au printemps et à l'automne

<sup>(2)</sup> La seule prairie ne recevant pas d'engrais organique

Source : Daniels *et al.*, 2001

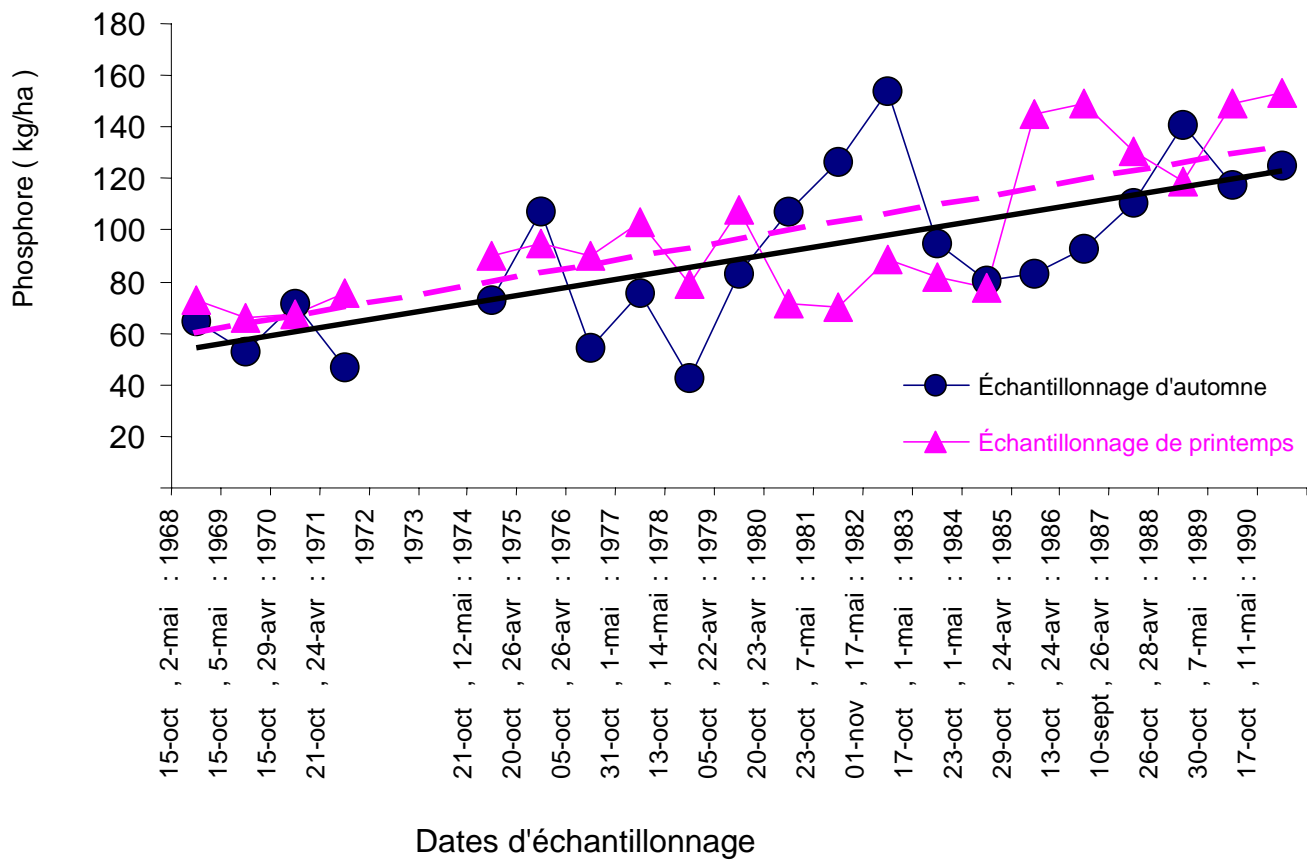
**Tableau 2 : Variation des niveaux de fertilité de parcelles d'environ 400 m<sup>2</sup> de la station de recherche de l'Acadie sous différents régimes de fertilisation.**

champs	années	trait. P	n	moyennes (kg/ha)	écart-type (kg/ha)	C.V. (%)
Billons	1995	40	4	97	29,9	30,7
		80	4	130	37,8	29,1
	1998	40	4	69	18,9	27,5
		80	4	115	42,5	36,9
Conventionnel	1995	40	4	115	35,9	31,2
		80	4	118	33,4	28,2
	1998	40	4	64	10,5	16,2
		80	4	77	30,5	39,5
moyennes					29,9	

Source : Tremblay, 2001

### Date d'échantillonnage

Plusieurs chercheurs ont tenté de clarifier la pertinence de respecter les saisons au moment de l'échantillonnage des sols. Campbell et Zentner (1993) ont observé de grandes variations dans les niveaux de phosphore entre les saisons. Leurs recherches présentent des variations qui s'inversent aléatoirement entre l'automne et le printemps au cours des 24 années de suivi en culture de blé (Figure 2). Lockman and Molloy (1984) ont aussi observé que le cycle des changements suivant les années et les saisons n'était pas toujours cohérent. Nyborg *et al.* (1992) sont ceux qui apportent un peu d'éclaircissement sur cette controverse. Leurs résultats suggèrent que les variations aléatoires observées par Campbell et Zentner (1993) entre les saisons seraient en partie la résultante des variations importantes des analyses du sol en phosphore entre l'automne hâtif et l'automne tardif. Les mêmes observations étaient signalées par Malhi *et al.* (1991) (Tableau 3).



**Figure 2 : Évolution des niveaux de phosphore sur un même site durant 24 ans**

Source : Campbell et Zentner, 1993

**Tableau 3 : Variation des niveaux de phosphore selon la saison et la profondeur d'échantillonnage sur quatre sites du nord de l'Alberta.**

site #	profondeur d'échantillonnage	Phosphore ( kg/ha )		
		automne hâtif	automne tardif	printemps
50	0-15	6,7	26,8	43,1
	15-30	1,1	2,2	5,6
51	0-15	70,6	99,7	121
	15-30	1,2	7,8	7,8
52	0-15	12,3	28	31,4
	15-30	1,2	4,5	7,8
53	0-15	6,7	3,4	16,6
	15-30	1,2	3,4	6,7
moyenne	0-15	24,1	39,5	53,2
	15-30	1,2	4,5	7,0

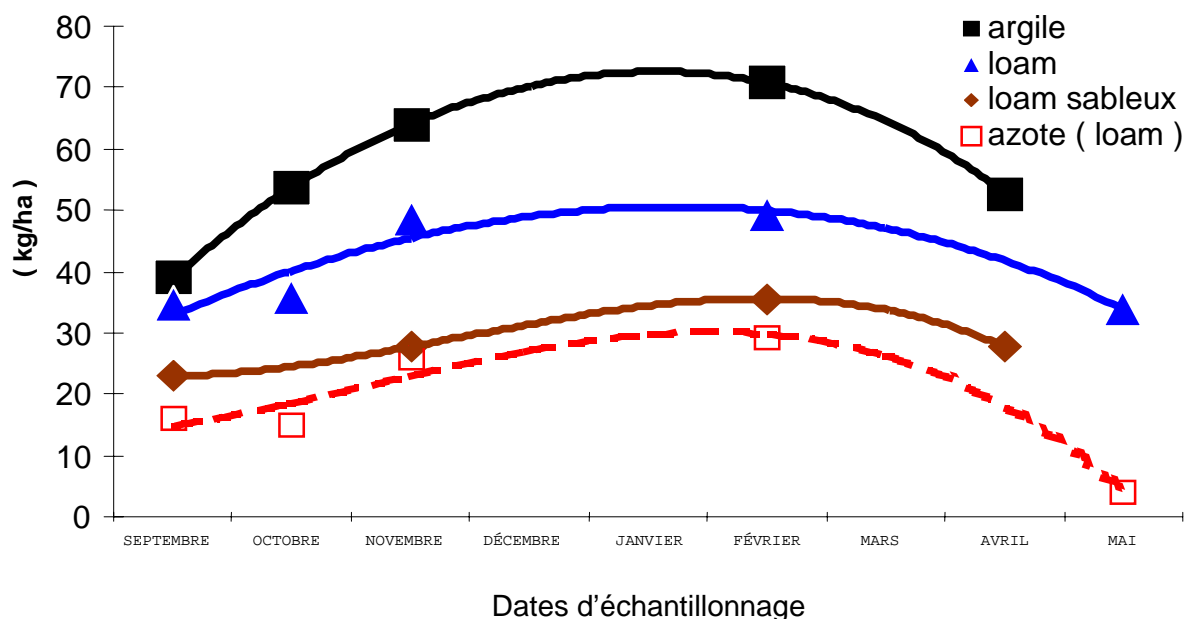
Source : Malhi *et al.*, 1991

De façon générale, l'amplitude des variations des niveaux de phosphore pour un sol donné, au cours d'une même année, est moindre mais synchronisée à celles de l'azote minéral, soit un C.V. de 23 % comparativement à 44 % pour l'azote (Tableau 4). Les mêmes observations sont rapportées pour les trois textures de sol dans cette étude. Nyborg *et al.* (1992) suggèrent que l'accroissement du P au cours de l'automne résulterait de la minéralisation de la biomasse microbienne et de la matière organique, tout comme pour l'azote (Figure 3), et que sur sol gelé, les augmentations proviendraient du phosphore relâché des cellules des microorganismes éclatées par le gel. La baisse des niveaux de P enregistrée tôt au printemps résulterait de l'immobilisation du phosphore par la nouvelle biomasse microbienne qui s'installe à nouveau ainsi que de la réduction de la solubilité du phosphore inorganique du sol. L'activité des microorganismes présents dans le sol est en relation directe avec les conditions climatiques. Un changement dans l'activité microbienne affectant le processus de « minéralisation – immobilisation » conduit à des changements dans les résultats d'analyse du sol (Ryan *et al.*, 1993).

**Tableau 4 : Évolution des niveaux de phosphore et d'azote de septembre à mai pour trois textures de sol.**

	ARGILE		LOAM SABLEUX		LOAM			
	P	N	P	N	P	N		
20-sept	13,2	22,3	8-sept	7,1	10,8	10-sept	11,5	16,2
27-oct	18,8	34				29-oct	12	15,1
22-nov	22,7	46	5-nov	8,9	17,2	16-nov	16,9	25,9
14-févr	25,3	59,3	14-févr	11,9	32,5	14-févr	17,1	29,4
23-avr	18,4	21,8	27-avr	8,9	10,8	18-mai	11,3	4,2
S.D.	4,6	16,1		2,0	10,2		3,0	9,9
MY.	19,7	36,7		9,2	17,8		13,8	18,2
C.V.	23%	44%		22%	57%		22%	55%

Source : Nyborg *et al.*, 1992



**Figure 3 : Évolution des niveaux de phosphore de septembre à mai pour trois textures de sol ainsi que l'évolution de l'azote minérale pour le loam.**

Source : Nyborg *et al.*, 1992

L'amplitude des variations mesurées selon les saisons augmente également en fonction du taux de fertilisation appliqué (Wayne *et al.*, 1987). Plus cette fertilisation en phosphore est élevée, plus les variations mesurées sont grandes (Sorn-Srivichai *et al.*, 1988). Ryan *et al.* (1993) ont pour leur part démontré qu'une fertilisation uniquement azotée pouvait provoquer une augmentation des fluctuations dans les niveaux de phosphore du sol entre les saisons d'une même année. D'autres facteurs comme les conditions climatiques changeantes (la température et la pluie), le type de sol et particulièrement les réserves de matière organique minéralisables sont aussi importants.

Compte tenu des variations importantes de phosphore dans le sol observées entre les saisons, une conclusion s'impose : il faut être conséquent dans sa méthode d'échantillonnage et respecter les mêmes périodes à la même saison pour bâtir un historique fiable dans l'évolution des richesses du sol en phosphore (Daniels *et al.*, 2000a). L'Université de l'Arkansas recommande d'échantillonner les champs au moins à tous les trois ans durant la même période de l'année sans toutefois préciser la saison (à l'automne ou au printemps). Pour l'ensemble des éléments analysés que l'on retrouve dans une analyse de sol, il n'apparaît pas y avoir une période commune qui soit préférable à une autre pour échantillonner (Lockman et Molloy, 1984).

### **Travaux du sol, les cultures et amendements précédant l'échantillonnage**

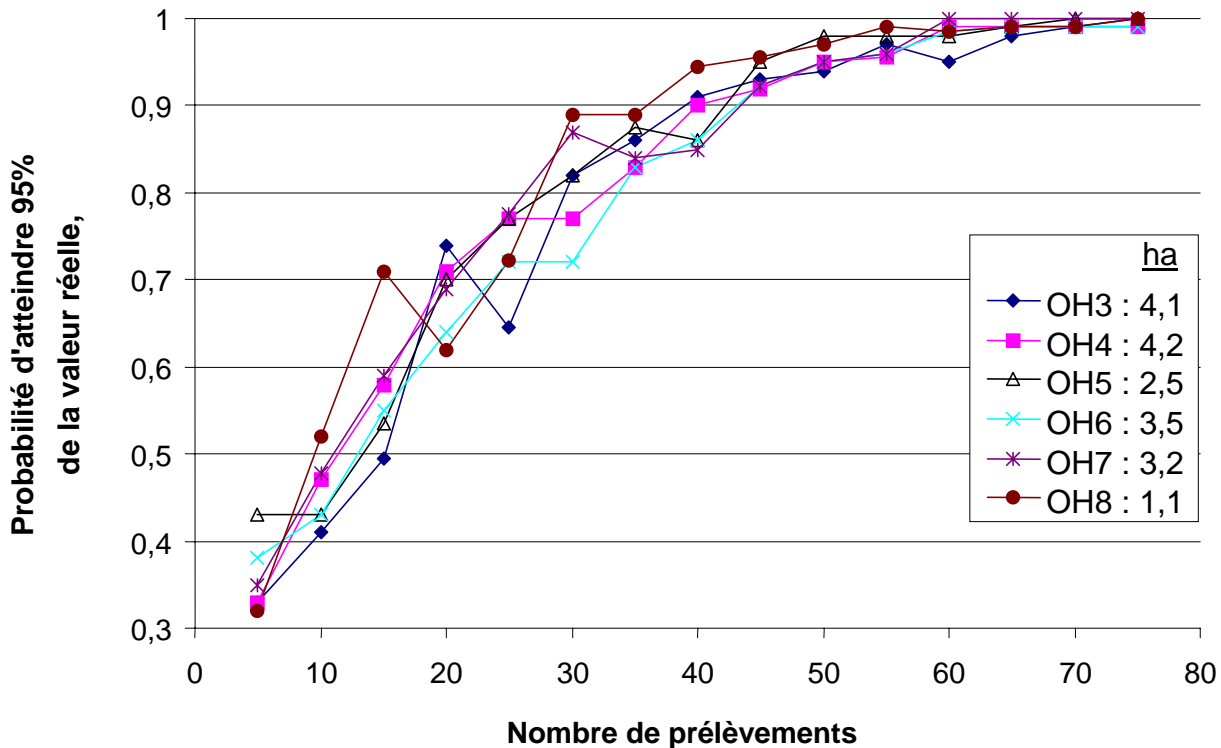
Les engrais organiques riches en phosphore incorporés au sol font grimper les analyses du sol en phosphore. Suite à un amendement en phosphore sous forme minérale ou organique, on observe une forte augmentation de cet élément immédiatement après l'application, suivie d'une baisse par la suite. Cette baisse serait toutefois moins rapide lorsque seuls des apports équivalents de phosphore organique sont faits (Simard, 1998).

Les analyses réalisées à l'automne, après les cultures qui ont de forts prélèvements en phosphore comme les prairies, le maïs ensilage et le soya sans fertilisation (Tremblay, 2001), livrent des résultats un peu plus bas. Sorn-Srivichai *et al.* (1988) ont présenté des résultats qui indiquent que les niveaux de phosphore du sol sont liés à la croissance et aux prélèvements faits par les cultures.

Enfin, si vous travaillez le sol de façon superficielle, les éléments s'accumulent dans les premiers 10 à 15 cm de la surface. Si vous effectuez un labour profond après plusieurs années sans avoir travaillé le sol, il faut s'attendre à une baisse des résultats due à une dilution du phosphore dans le profil du sol labouré.

### **Procédure d'échantillonnage**

Selon Daniels *et al.* (2000b), la procédure d'échantillonnage peut influencer la précision des résultats plus que n'importe quelle autre étape. Pour obtenir un échantillon représentatif et augmenter la précision de la mesure, il faut prendre un nombre suffisant de prélèvements dans le but de constituer un échantillon. Les guides d'échantillonnage disponibles au Québec proposent de 10 à 15 prélèvements pris de façon régulière en zigzag sur l'ensemble du champ. L'Université de l'Arkansas propose quant à elle d'ajuster le nombre de prélèvements à la superficie du champ. De 15 à 20 prélèvements pour des champs plus petits que 8 ha (20 acres) et de 20 à 25 prélèvements pour des superficies supérieures à 8 ha. Lorsque le sol est plus variable, on doit en augmenter le nombre, parfois au-delà de 30. Daniels *et al.* (2001) indiquent clairement que si les besoins de précision sont élevés sur un champ très variable, il faut prendre un nombre important de prélèvements pour constituer un échantillon de sol représentatif (Figure 4). Cette relation entre l'augmentation de la précision et le nombre de prélèvements n'est toutefois pas linéaire (Waine *et al.*, 1987).

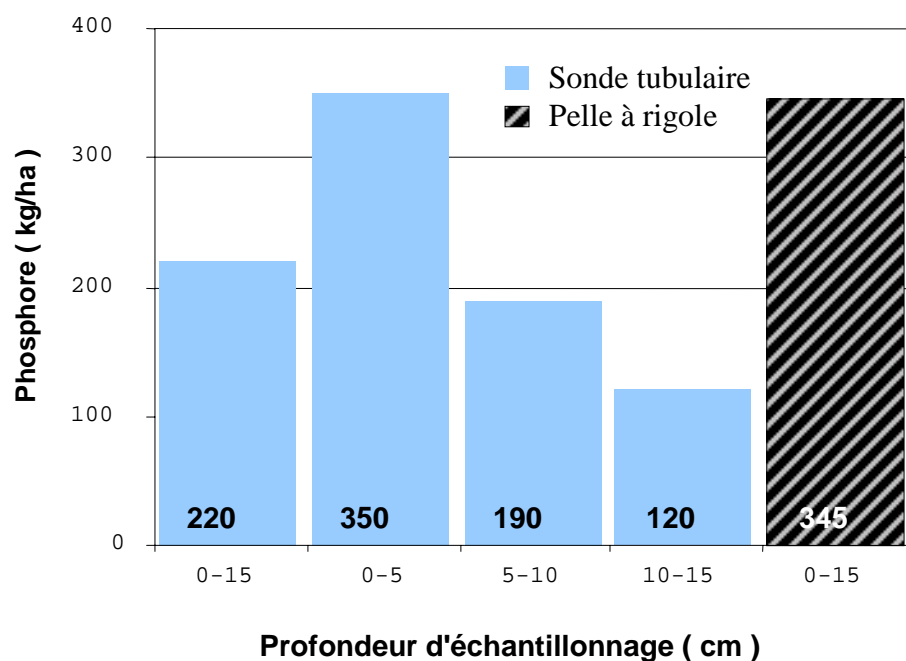


**Figure 4 : Nombre de prélèvements requis sur des prairies ayant une grande variabilité spatiale pour composer un échantillon représentatif selon la précision voulue.**

Source : Daniels *et al.*, 2001

Pour plus de précision encore, il faut éviter de prélever les échantillons aux endroits comme les zones près des routes, près des bords de fossé ou mal égouttés. Il faut aussi s'abstenir de mélanger des sols de textures différentes, car le résultat de l'analyse variera en fonction de la proportion de sol qui provient de l'une ou de l'autre des textures. Enfin, il faut éviter de varier la profondeur de l'échantillonnage car les teneurs en phosphore baissent rapidement dans le profil du sol d'une prairie (Sorn-Srivichai *et al.*, 1988, (Malhi *et al.*, 1991), et surtout, dans l'horizon sous le labour (Tabi *et al.*, 1990), (Rivest et Leduc, 1998). Il est également recommandé de prélever les échantillons avec une sonde à sol plutôt qu'avec une pelle à rigole. Selon une étude réalisée par Daniels *et al.*, (2000b), des erreurs importantes peuvent résulter de l'utilisation d'une pelle sur des prairies permanentes qui favorisent la concentration des éléments fertilisants dans les horizons de surface. Les résultats démontrent que l'utilisation d'une pelle a produit des valeurs semblables à ceux de la couche 0 - 5 cm soit la zone la plus riche en phosphore (Figure 5).





**Figure 5 : Résultats d'analyses du phosphore selon la profondeur d'échantillonnage et différents outils d'échantillonnage.**

Source : Daniels *et al.*, 2000b

### Préparation de l'échantillon

Un laboratoire demande environ 300 grammes de sol pour effectuer l'analyse de l'ensemble des éléments nécessaires à une recommandation de fertilisation. Un échantillon composé de 15 prélèvements vous donnera de 1 500 à 2 000 grammes de sol humide que vous devez homogénéiser pour qu'il soit représentatif de vos prélèvements, qui eux se doivent d'être représentatifs du champ. Procéder à l'homogénéisation d'un sable est chose facile, mais pour les sols à haute teneur en argile, c'est un peu plus contraignant. Depuis 1993, tous les échantillons de sols argileux analysés dans le cadre de projets spécifiques pour l'expertise des conseillers de la Montérégie, secteur Est, sont préalablement séchés, broyés et tamisés avant que ne soient prélevés les 300 grammes qui sont expédiés au laboratoire.

## Choix d'un laboratoire d'analyses

Depuis 1987, tous les laboratoires du Québec offrant leurs services aux producteurs agricoles pour des analyses de sol de routine (sauf exception) utilisent l'extractif Mehlich-3 (Tran et Giroux, 1989). Cet extractif a remplacé le réactif Bray 2 pour extraire le phosphore assimilable (P) et l'acétate d'ammonium pour les bases échangeables (K, Ca, Mg et Na). Il remplace également le réactif DTPA-TEA ou HCl 0,1 N pour les oligo-éléments. Mehlich-3 constitue donc un extractif unique, beaucoup moins dispendieux pour l'ensemble des éléments à analyser.

Une étude interne du MAPAQ, réalisée en collaboration avec le CÉROM auprès des six laboratoires les plus utilisés par les conseillers de la Montérégie, secteur Est, a révélé des variations considérables dans les résultats livrés par chacun d'eux. Dans le cas du phosphore, les coefficients de variation atteignaient 20,7 % (Tableau 5). Ces variations sont en grande partie attribuables aux différentes méthodes de dosage du phosphore dans les sols.

**Tableau 5 Moyennes des coefficients de variation pour des résultats d'analyses provenant de différents laboratoires utilisant l'extractif Mehlich 3.**

nombre échantillons		C.V. (%)		
		P	Al	100P/AL
22	6 laboratoires différents <sup>(1)</sup>	20,7	11,7	23,7
22	3 laboratoires différents dosage par ICAP <sup>(2)</sup>	8,3	6	8,6
22	3 laboratoires différents, dosage par colorimétrie	27,3	13,1	31,2
22	Un laboratoire <sup>(3)</sup> , analysés 3 fois en un an	5,8	6,3	7,7
10	Un laboratoire, 3 années consécutives <sup>(4)</sup>	16,4	4,5	17,4

<sup>(1)</sup> Les laboratoires les plus utilisés par les clubs de la Montérégie, secteur Est en 1999.

<sup>(2)</sup> ICAP : spectromètre d'émissions au plasma

<sup>(3)</sup> Laboratoire de recherche de l'IRDA

<sup>(4)</sup> Un laboratoire privé suite à la fermeture des laboratoires publics en 1996

Après avoir mis le phosphore en solution avec le réactif Mehlich-3, il peut être dosé par deux méthodes différentes. Certains laboratoires dosent le phosphore avec un spectromètre d'émission au plasma (ICAP) tandis que d'autres le dosent par colorimétrie. Les deux méthodes d'analyse donnent des résultats similaires selon un facteur de 1,09 toujours plus élevé pour

l'ICAP (Khiari *et al.*, 2000). En effet, le dosage du phosphore par plasma inclut dans sa lecture une partie du phosphore organique contrairement à la méthode par colorimétrie. Plus la portion du phosphore organique de votre sol sera importante par rapport au niveau de richesse analysé, plus vos résultats s'éloigneront du facteur 1,09 cité précédemment. Pour des sols pauvres en phosphore et riches en matière organique, ce facteur de correction peut atteindre 1,30 (Audesse, 2000).

Demeurer fidèle à un même laboratoire d'analyses augmente de beaucoup vos chances de retrouver une cohérence dans l'évolution de vos résultats d'analyses. Si vous changez de laboratoire, assurez-vous que les méthodes d'extraction et de dosage utilisées soient les mêmes. Lorsque l'on compare trois laboratoires de cette étude qui utilisent les mêmes méthodes d'analyse, soit l'extractif Mehlich-3 et un dosage par ICAP, le C.V. observé pour le phosphore est réduit à 8,3 % (Tableau 5). Les trois laboratoires qui dosent le phosphore par colorimétrie ont obtenu des résultats très variables qui se traduisent par un C.V. de 27,3 %. Le rapport du Centre d'expertise en analyses environnementales du MENV sur l'évaluation de la performance analytique des laboratoires d'analyses de sols rapporte le même constat (Noreau, 2002). Selon ce rapport, seulement 4 des 11 laboratoires, dont la participation est volontaire, ont satisfait aux exigences du contrôle pour le phosphore dosé par colorimétrie.

Le calibrage et la dérive des appareils d'une année à l'autre sont aussi des sources de variation. Au cours de la même étude, 10 échantillons ont été analysés durant trois années consécutives et des C.V. de 16,4 % ont été observés pour le phosphore.

#### Accréditation des laboratoires d'analyses de sols

Compte tenu de l'importance que revêt dorénavant chaque résultat d'analyse de sol en phosphore, il y a au Québec une volonté d'accréditation des laboratoires. Le Centre d'expertise en analyses environnementales du MENV sollicite la participation volontaire de tous les laboratoires œuvrant au Québec pour évaluer leur performance analytique (Noreau, 2002). Le rapport de mars dernier conclut que la majorité des laboratoires participant à cette évaluation (11 sur 24 sollicités; tous les laboratoires qui offrent leurs services aux producteurs agricoles participent à ces évaluations) ont obtenu une performance analytique acceptable compte tenu qu'il s'agissait d'une première évaluation. Force est de constater qu'il y a des améliorations à

apporter pour que l'ensemble des laboratoires répondent aux exigences de précision qu'impose le REA.

### **Analyses de routine**

Les méthodologies utilisées dans les laboratoires d'analyses de sols ont été développées pour des besoins de productivité agricole. Ces besoins sont d'obtenir une bonne évaluation moyenne du niveau de richesse de l'ensemble d'un champ à partir d'une analyse de routine rapide et peu coûteuse. Dans la plupart des laboratoires privés, les niveaux de richesse du sol en phosphore sont déterminés sur une base volumétrique, ce qui réduit de beaucoup le temps de préparation des échantillons en laboratoire et conséquemment, les coûts. Quelques études remettent en cause cette façon imprécise d'analyser le sol et concluent qu'elle peut conduire à d'importantes erreurs d'évaluation (Glenn *et al.*, 1983). Glenn *et al.* (1983) concluent que la méthode gravimétrique est essentielle pour obtenir une estimation précise des propriétés chimiques des sols ainsi que pour des recommandations adéquates de fertilisants. On prend pour acquis que la quantité de sol prélevée avec la cuillère standard de 3 cm<sup>3</sup> (pour le Québec) pèse environ 3 grammes. Khiari *et al.* (1999) ont observé des variations pouvant atteindre jusqu'à 39 % selon la nature des sols. Plus un sol a une teneur en sable élevée, plus il sera lourd pour un même volume mesuré. Plus de sol pour un même volume d'extractif conduit à plus de phosphore en solution. Il y a donc une surévaluation des richesses de phosphore, surtout pour les sables. Pour l'ensemble des sols de la Montérégie qui se situent entre 20 et 35 % d'argile, c'est une surévaluation de 15 % de la richesse des sols en phosphore qui en découle (Figure 6). Glenn *et al.* (1983) concluaient leur recherche en mentionnant que pour une évaluation précise des propriétés fertilisantes des sols, la méthode par la cuillère était inappropriée. Cette réalité vaut également pour tous les autres éléments analysés. Les laboratoires de recherche livrent aux chercheurs leurs résultats sur une base gravimétrique. Il ne faut donc pas remettre en cause les seuils de phosphore définis par la recherche scientifique. Pour la production agricole, cette évaluation faite à la cuillère a moins de conséquences puisque la réponse à la fertilisation ne demande pas une plus grande précision.

Un diagnostic agroenvironnemental basé sur P<sub>M3</sub> volumétrique pourra donc conduire à un diagnostic différent de celui basé sur P<sub>M3</sub> gravimétrique. Khiari *et al.* (1999) ont démontré que l'utilisation de la saturation du sol en phosphore permettait de contourner en partie cette erreur. La saturation est présentée selon le rapport  $100 P_{M3}/Al_{M3}$  ce qui a pour effet d'annuler la

surévaluation des deux éléments qui pourrait être causée par la méthode avec la cuillère (Khiari *et al.*, 1999). Toutes les erreurs ne sont toutefois pas éliminées grâce à l'utilisation du pourcentage de saturation. Lors de l'évaluation des différents laboratoires les plus couramment utilisés en Montérégie, nous avons pu constater que l'utilisation du rapport P sur Al n'atténuait pas les variations obtenues entre les laboratoires. Certains laboratoires avaient tendance à la fois à surévaluer le phosphore et à sous-évaluer l'aluminium, ce qui a eu pour effet de contourner la correction apportée par l'utilisation du taux de saturation entre les différents laboratoires consultés (Tableau 5). Les C.V. des taux de saturation étaient égaux si non plus élevés que ceux du phosphore seul.

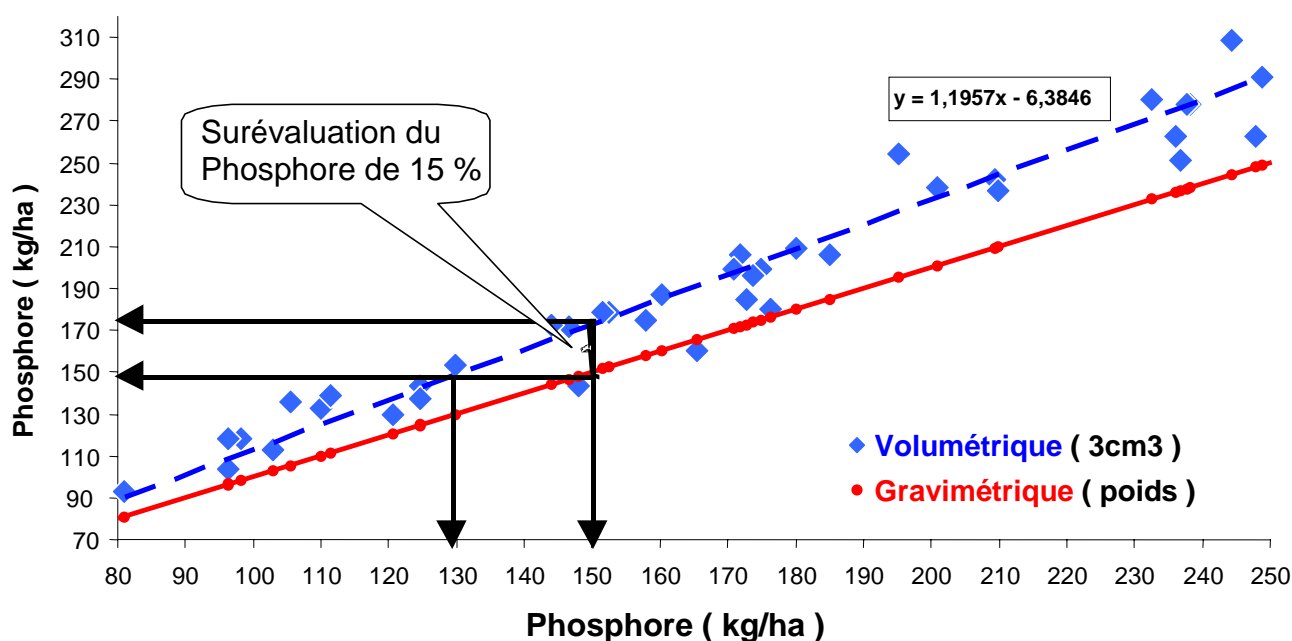


Figure 6 : Résultats des niveaux de phosphore évalués sur des sols de la Montérégie selon deux méthodes de préparation d'échantillons en laboratoire.

Source : Audesse, 2001

L'instrumentation des laboratoires permet maintenant d'obtenir la même efficacité en économie de temps selon les deux méthodes de travail (Audesse, 2002).

D'autres facteurs comme le contenu en matière organique, la mouture du sol et le séchage lors de la préparation des échantillons peuvent aussi induire des erreurs dans les résultats (Glenn *et al.*, 1983). La méthode de mouture entre les différents laboratoires n'est pas

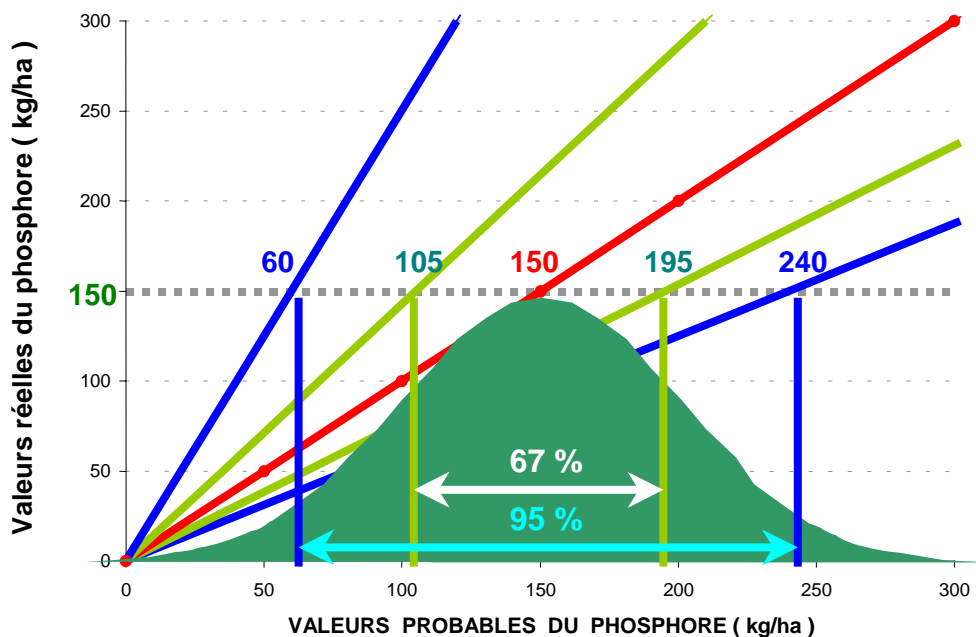
standardisée et il peut en résulter des différences substantielles entre les résultats de différents laboratoires.

## **Variations cumulatives**

---

Il faut comprendre que plusieurs des variations citées précédemment sont susceptibles de s'annuler entre elles. Par contre, d'autres comme les variations spatiales ou temporelles d'un champ ainsi que celles provenant des laboratoires, lesquelles représentent 29,9 %, 22 % et 20,7 % respectivement, peuvent être cumulatives. L'addition systématique de ces variations n'est pas mathématique. Les valeurs extrêmes possibles résultant d'une succession de plusieurs surévaluations ou sous-évaluations au cours du processus d'échantillonnage et de dosage ont peu de probabilité de voir le jour.

Les variations peuvent tout de même être considérables. Pour démontrer une seule de ces variations, prenons par exemple une valeur réelle et représentative d'un champ à 150 kg/ha de phosphore avec un C.V. de 30 %. Les valeurs pouvant être rencontrées selon une courbe normale de distribution pour un premier écart-type de 45 kg/ha (30 % fois 150) regrouperaient 67 % des valeurs et elles seraient comprises entre 105 et 195 kg/ha. Pour deux écarts-types, regroupant 95 % des valeurs, elles peuvent atteindre des extrêmes allant de 60 à 240 kg/ha (Figure 7).



**Figure 7 : Variations probables pour une valeur de 150 kg/ha de phosphore ayant un C.V. de 30 % et appréciation par la courbe normale de la probabilité d'obtenir les valeurs extrêmes de sous-évaluations ou de surévaluations.**

Il n'est pas litigieux de se prononcer sur des résultats d'analyses de sol dont les classes de richesses se situent aux niveaux pauvres ou excessivement riches en phosphore mais tel n'est pas le cas pour des résultats dont la marge d'erreur fait osciller les valeurs autour du seuil environnemental proposé.

### **Suivre l'évolution des niveaux de phosphore du sol**

Rappelons que la richesse du sol en phosphore est l'information à la base d'importantes décisions pour l'entreprise agricole. Le REA permet, dans une certaine mesure, l'utilisation des données privées à la ferme, reconnaissant ainsi l'efficacité de chacune à gérer le phosphore. Pour permettre d'apporter des correctifs souhaités au règlement lors de sa révision prévue en 2005, suivre l'évolution des richesses en phosphore est devenu un incontournable pour bon nombre d'entreprises. Il est de mise d'évaluer le rythme d'enrichissement ou d'appauvrissement que suivront les terres suite aux changements de régimé du phosphore qu'imposent le règlement. Pour un même bilan en phosphore entre les importations et les exportations, tous les sols ne réagiront pas de la même façon. Giroux et Tran (1994) rapportent que pour augmenter les niveaux de phosphore (P) de un kilogramme sur une analyse de sol, certains sols nécessitent

un bilan positif de 4,58 kg/ha de phosphore ( $P_2O_5$ ) alors que pour d'autres, ces quantités sont de l'ordre de 21,3 kg/ha de  $P_2O_5$ .

Compte tenu qu'une foule de facteurs, dont ceux cités précédemment, peuvent faire varier considérablement les résultats de la richesse en phosphore d'un même sol, comment peut-on suivre l'évolution de la richesse à partir de résultats d'analyses de routine ayant de trois à cinq ans d'intervalle ?

Les résultats de Campbell et Zentner (1993) démontrent clairement qu'il est hasardeux de considérer une analyse de routine à tous les trois ou cinq ans pour valider l'évolution de la richesse d'un sol. Cette façon de faire peut facilement conduire à un mauvais diagnostic. À partir de leurs résultats (Figure 2), on pourrait conclure que le sol s'appauvrit si nous n'avions que les analyses d'automne des années 1975, 1979 et 1984 alors qu'en réalité, il a une tendance marquée à s'enrichir sur la période des 24 années. Dans le même ordre d'idée, un diagnostic tout aussi erroné pourrait conclure à un enrichissement très excessif si nous ne disposions que des analyses d'automne des années 1976, 1979 et 1982.

Pour contrer ce risque d'erreur, vous pouvez augmenter la fréquence des analyses et évaluer la tendance que prendront les résultats après plusieurs années. Cette démarche peut toutefois s'avérer très coûteuse.

Pour avoir plus de précision, il faut également faire attention aux résultats sporadiques d'analyses de phosphore obtenus par un autre extractif que Mehlich-3. Bien que vous puissiez retrouver les valeurs de correspondance entre différentes méthodes d'analyses et Mehlich-3 (Tran et Giroux, 1989), ces valeurs ne devraient pas servir d'assise pour une décision importante en regard de l'évolution de la richesse du sol. Pour définir l'évolution de la richesse du sol en phosphore, vous avez avantage à aligner des résultats provenant tous de la même méthode d'analyse et de dosage du phosphore.

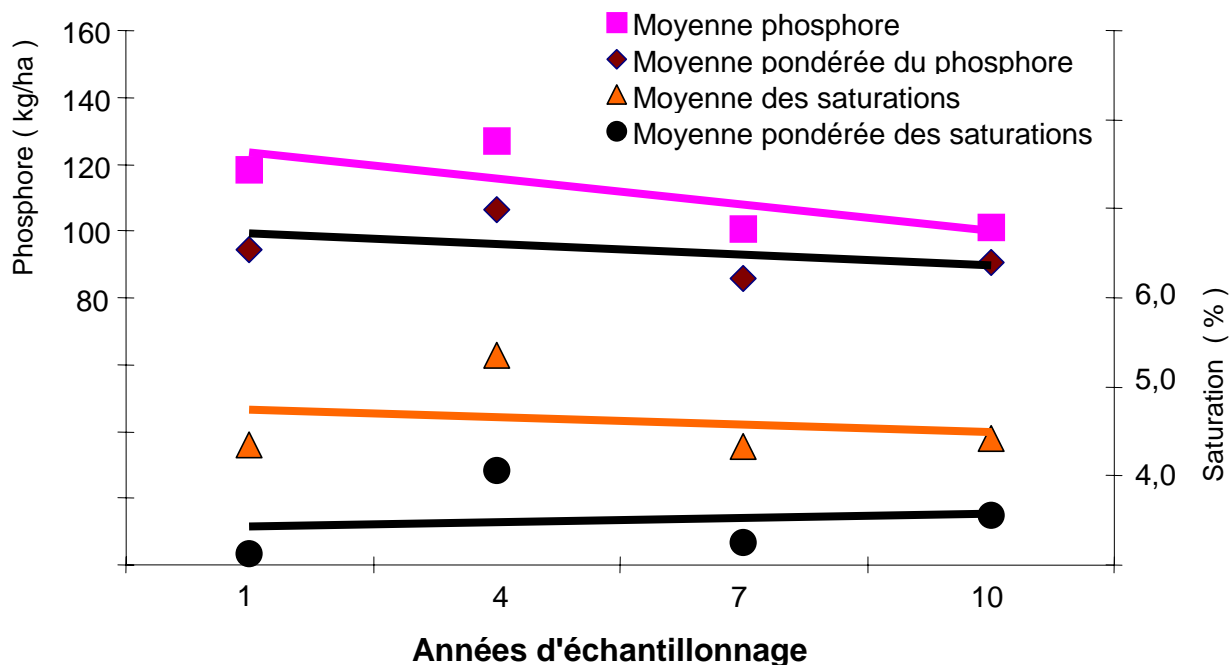
Une méthode efficace pour suivre l'évolution du phosphore du sol serait de calculer la moyenne pondérée des niveaux de phosphore de toutes les terres échantillonnées lors d'une campagne d'échantillonnage et de la comparer à une autre moyenne obtenue quelques années plus tard et ainsi de suite. C'est-à-dire, calculer les moyennes des niveaux de phosphore pour chaque année d'échantillonnage en accordant à chaque résultat une représentativité égale à la



superficie du champ évalué. Ce calcul pondéré prend son importance pour les entreprises dont les terres ont des superficies très différentes. Suivre l'évolution à partir de moyennes de plusieurs résultats d'analyses permet d'atténuer les évaluations extrêmes qui ne seraient pas représentatives d'un champ.

Les moyennes des saturations pondérées apportent plus de précision puisqu'il contrôle une partie des erreurs potentielles. À la figure 8, les courbes issues de différentes méthodes de calculs donnent des appréciations contradictoires de l'évolution des sols pour l'ensemble des terres de la ferme. Les moyennes pondérées des saturations indiquent une stabilité des niveaux de phosphore au cours des années, tandis que les simples moyennes des niveaux de phosphore indiquent une tendance à la baisse. Ce cas illustre bien la pertinence de bien connaître la limite de nos outils de travail puisqu'ils peuvent conduire à des diagnostics différents.

Ces moyennes, réalisées à des intervalles de trois à cinq ans ou selon la fréquence des échantillonnages, permettent de produire des évaluations à partir desquelles il est possible de mieux percevoir l'évolution de la richesse des sols pour une entreprise donnée.



**Figure 8 :** Courbes de la tendance de l'évolution des niveaux de phosphore d'une ferme de 18 champs totalisant 134 hectares échantillonnés à tous les trois ans.

Une autre méthode proposée serait de géoréférencer certains échantillons témoins. En respectant les saisons ainsi que les méthodes analytiques et en maintenant une préoccupation constante sur l'ensemble des sources de variation citées précédemment, plusieurs variations seront ainsi mieux maîtrisées et pourront produire des résultats plus fiables.

Ces deux approches méthodiques et plus structurées permettront éventuellement d'ajuster les abaques aux signatures d'enrichissement du sol qui caractérisent les types de sol des différentes régions agricoles du Québec.

## Conclusion

---

Il y a plusieurs facteurs pouvant induire des variations importantes dans les résultats d'analyses du phosphore du sol. Une fois ces facteurs bien compris et maîtrisés, il devient plus facile de s'approprier les résultats pour livrer un diagnostic éclairé.

Lorsque la viabilité d'une entreprise agricole est confrontée à l'application d'une norme réglementaire, il est inévitable de voir apparaître d'énormes tensions. Les préoccupations des producteurs pour un diagnostic juste et équitable se joignent à celles des agronomes et de certains chercheurs. La gestion du phosphore doit être plus précise certes, mais pour livrer la marchandise, il faut savoir bien maîtriser nos outils de travail. Les analyses de sol sont perfectibles. Elles font partie de notre coffre d'outils et comme tous les outils mis à notre disposition, elles ont une précision limitée avec laquelle le législateur et les agronomes doivent conjuguer.

## Bibliographie

---

ACIA, Agence d'inspection des aliments. Site internet : [http : //www.inspection.gc.ca](http://www.inspection.gc.ca)

Audesse, P. 2000. Comparaison entre le dosage du phosphore par colorimétrie (Technicon) et le dosage du phosphore par ICAP. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA). Présentation au Comité de Chimie et Fertilité du CRAAQ.

Audesse, P. 2001. Responsable du laboratoire de recherche de l'IRDA. Communication personnelle. Résultats non publiés.

Audesse, P. 2002. Responsable du laboratoire de recherche de l'IRDA. Communication personnelle.

Bachand, C. 2001. Évaluation des charges azote et phosphore par le bilan alimentaire. Cahier des conférences (CD). Colloque en agroenvironnement 21-22 novembre 2001. Centre de Références en Agriculture et en Agroenvironnement du Québec (CRAAQ).

Cantin, J. 1999. Un guide d'interprétation des bilans minéraux. Ministère de l'Agriculture, Direction Régionale de la Montérégie, secteur Est. Centre de service de St-Bruno.

Campbell, C.A., Zentner, R.P. 1993. Overwinter changes in Olsen phosphorus in a 14 year crop rotation study in southwestern Saskatchewan. *Canadian Journal of Soil Science*, 73 :1 123-128.

Combs, S.M., and L.G. Bundy. 1995. Waste-amended soils : Methods of analysis and considerations in interpretation of analytical results. P. 16-26. In K. Steele (ed.) *Animal waste and the land-water interface*. Lewis Publ., Boca Raton, FL.

Daniels, M.B., S.L. Chapman, J. Gunsaulis, K. Teague, and K. Combs, 2000a. Temporal variability of soil phosphorus in pastures amended with animal manure. *Arkansas soil fertility studies 2000*. University of Arkansas. Research Series 480.

Daniels, M.B., J.M. Langston, S.L. Chapman, K. Combs, K. VanDevender, and J. Jennings. 2000b. *Soil Testing for Manure Management*. University of Arkansas Cooperative Extension Service. Publication FSA 1035.

Daniels, M.B., P. Delaune, P.A. Moore, Jr., A. Mauromoustakos, S.L. Chapman, and J.M. Langston. 2001. Soil phosphorus variability in pastures : implications for sampling and environmental management strategies. *J. Environ. Qual.* 30 : 2157-2165.

Fitts, J.W. et al. 1956. Soil tests compared with field, greenhouse, and laboratory results : A comparative study. *North Carolina Agric. Exp. Stn. Tech. Bull*, 121.

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.

Glen, R.C. 1983. Reliability of volumetric sampling as compared to weighed samples in quantitative soil test interpretations. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 14 : 199-207.

- Khiari, L., A. Pellerin, J. Fortin, and L.E. Parent. 1999. A Soil Phosphorus saturation Index Decreasing scooped weight effect in Mehlich3 Procedure. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 30(15 & 16), 2157-2K8
- Khiari, L., L.E. Parent, A. Pellerin, A.R.A. Alimi, C. Tremblay, R.R. Simard, and J. Fortin. 2000. An agri-environmental phosphorus saturation index for acid coarse-textured soils. *J. Environ. Qual.* 29:1561-1567. [errata: 29(6):2052].
- Lockman, R.B., and M.G. Molloy. 1984. Seasonal variations in soil test results. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 15 (7) : 741-757.
- Malhi, S.S., Nyborg, Kryzanowski, L., Gill, K.S., and Arshad, M.A. 1991. Changes in extractable phosphorus between fall and spring in some Alberta soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 22 (13 & 14), 149-1446
- Nolin, M.C. Cailler, M.J. Wang, C. 1991. Variabilité des sols et stratégie d'échantillonnage dans les études pédologiques détaillées de la plaine de Montréal. *Can. J. soil Sci.* 71 : 439-451
- Nyborg, M., Malhi, S.S., Robertson, J.A. and Zhang, M. 1992. Changes in extractable phosphorus in Alberta soils during the autumn-winter-spring interlude. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 23 : 337-343
- Noreau, J. 2002. Évaluation de la performance analytique – Projet AGS - 01. Rapport de mars 2002. Le centre d'expertise en analyses environnementales du Ministère de l'Environnement.
- Rivest, R. et P. Leduc. 1998. Évaluation du risque de pollution diffuse associée au phosphore des sols classés excessivement riches. Bureau de renseignements agricoles de St-Hyacinthe, MAPAQ et Société d'Agriculture du comté de St-Hyacinthe. Rapport final 67 p.
- Rivest, R., Choquette, S. et Leduc, P. 1998. Guide régional sur la composition des fumiers et lisiers utilisés sur les fermes de la Montérégie-Est (région 10). MAPAQ, Centre de service de St-Hyacinthe.
- Ryan, J., H. Hasan, M. Baasiri and H.S. Tabbara. 1985. Availability and transformation of applied phosphorus with time in calcareous Lebanese soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49 (5) : 1215-1220.
- Sabbe, W.E. and D.B. MARX. 1987. Soil sampling : spatial and temporal variability. P. 1-14. In J.R. Brown (ed). *Soil testing : sampling, correlation, calibration, and interpretation.* Soil Sci. Soc. Am. Sepc. Publ. No 21 ; Madison, Wisc.
- Sauer, T.J., P.A. Moore, Jr., K.P. Coffey, and E.M. Rutledge. 1998. Characterizing the surface properties of soils at varying landscape positions in the Ozark Highlands. *Soil Sci.* 163 :1-9
- Sharpley, A., Meisinger, J.J., Breeuwsma, A., Sims, J.T., Daniel, T.C. and Schepers, J.S. 1998. Impacts of animal manure management on ground and surface water quality. *Animal waste utilization.* Edited by Hatfield, J.L. and Stewart, B.A. ISBN 1-57504-068-9.
- Sims, J.T. 1993. Environnement soil testing for phosphorus. *J. Prod. Agric.* 6 :501-507.

Simard, R.R. 1998. Le phosphore organique et minéral : Comportement dans les sols et son efficacité à nourrir les cultures. Cahier de conférences du colloque « Bien nourrir le sol, c'est mieux gérer le phosphore ». Salon de l'Agriculteur en collaboration avec l'Association des Fabricants d'Engrais du Québec à Saint-Hyacinthe.

Sorn-Srivichai, P., Syers, J.K., Tillman, R.W. 1988. I - An evaluation of water extraction as a soil testing procedure for phosphorus. II - Factors affecting the amounts of water-extractable phosphorus in field soils. *Fertiliser Research*, 15 : 3, 225-236.

Tabi, M., L. Tardif, D. Carrier, G. Laflamme et M. Rompré. 1990. Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec. Rapport synthèse, 71 p. Entente auxiliaire Canada-Québec sur le développement agroalimentaire.

Tran, T.S. et Giroux, M. 1989. Évaluation de la méthode Mehlich-3 pour déterminer les éléments nutritifs (P, K, Ca, Mg, Na) des sols du Québec. *Agrosol* 2 (1) : 27-33.

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

Waine, E., Sabbe and Marx, D.B. 1987. Soil sampling spatial and temporal variability. *Soil Science Society of America. Special edition no.21.*