

ÉTUDE DES FACTEURS AFFECTANT L'ÉVOLUTION DES TENEURS EN P ET K DES SOLS AGRICOLES

M. GIROUX¹ ET T. S. TRAN¹

RÉSUMÉ

Les grilles de fertilisation pour les grandes cultures au Québec ont été récemment révisées à la baisse surtout pour les sols riches en P et K disponibles. Les producteurs agricoles s'interrogent sur l'effet à long terme de la réduction d'engrais sur la fertilité en P et K du sol. Le but de cet article est de rappeler les concepts de base des grilles de fertilisation et souligner les facteurs qui peuvent affecter le degré d'enrichissement ou d'épuisement en P et K disponible des sols suite à l'application d'engrais ou à l'arrêt de la fertilisation en ces éléments. Les types de sol, la fertilité du sol en surface et en profondeur, les formes de réserves en P et K du sol ainsi que les exportations par les cultures et l'utilisation des engrais de ferme ont été discutés. L'approche par la méthode du bilan et des considérations pratiques sont présentées pour mesurer et prévoir l'évolution de la fertilité des sols en P et K selon les fertilisations minérales et organiques ainsi que et les systèmes culturaux de la ferme.

Mots clés : Phosphore, potassium, fertilité, réserve P et K du sol, prélèvement P et K.

INTRODUCTION

Dans l'optique d'une agriculture durable, les recommandations des fertilisants pour les cultures visent à atteindre les objectifs fondamentaux suivants:

- le maintien d'une production rentable;
- une qualité excellente des récoltes;
- la conservation des ressources sol et eau;
- le maintien d'un niveau de fertilité convenable du sol;
- une diminution des coûts de fertilisation en misant sur les réserves des sols et la valorisation des engrais de ferme.

Les grilles de fertilisation au Québec ont été récemment réajustées relativement au niveau d'application du phosphore et du potassium notamment pour les herbages, le maïs et le soya (Conseil des Productions végétales du Québec, CPVQ 1994). Dans certains cas une diminution importante des recommandations de P et K a été approuvée par le comité chargé de la révision des grilles notamment pour les sols riches. On peut se demander quel sera l'effet de ces réductions d'engrais sur l'évolution des teneurs de ces éléments dans les sols à long terme. Il est donc important d'examiner les concepts qui sont à la base des grilles de fertilisation et prendre en considération certains critères liés aux caractéristiques des sols et des systèmes culturaux.

CONCEPT À LA BASE DES GRILLES DE FERTILISATION

Les quantités d'engrais P et K recommandées dans les grilles de fertilisation sont déterminées principalement à partir des courbes de réponses des cultures obtenues pour ces éléments (calibration des sols). La calibration des sols permet de formuler une recommandation d'engrais à partir d'une analyse de sol, en se basant sur l'accroissement du rendement qui va résulter de cette application. Les concepts à la base des grilles de fertilisation reposent donc sur le niveau de suffisance de l'engrais nécessaire pour obtenir un rendement économique optimal. Plusieurs recherches réalisées au Québec ont démontré la fiabilité de cette approche surtout lorsqu'elle est appliquée à des groupes homogènes de sol (Dionne et coll. 1977, MacKenzie 1979, Lamarre et Cescas 1979, Giroux et van Lierop 1982, Giroux et coll. 1984).

Dans la classe des sols pauvres qui contiennent moins de 60 kg P/ha et moins de 100 kg K/ha déterminés par la méthode Mehlich-3 (Grilles de référence en fertilisation, CPVQ 1994), les fertilisations phosphatée et potassique vont produire des augmentations élevées du rendement des cultures. La dose d'engrais nécessaire pour obtenir un rendement économique maximum dépasse généralement les prélèvements des récoltes dans ces sols. Il en résulte un redressement du niveau des teneurs en P et K disponibles suite à l'application de ces engrais dans les sols pauvres.

Pour les sols de teneurs moyennes en P et K, représentant entre 61 et 150 kg P/ha et entre 101 et 250 kg K/ha, l'accroissement du rendement par la fertilisation en ces éléments est plus modéré et le niveau des applications de P et K comble généralement les exportations des récoltes. Il en résulte alors un niveau d'entretien. Les applications d'engrais équilibrent les exportations des récoltes et les autres pertes en P et K dans ces cas.

Pour les sols riches, contenant de 151 à 250 kg P/ha et de 251 à 500 kg K/ha, l'accroissement du rendement des cultures par l'application de ces engrais est peu probable. En pratique, une fumure de démarrage à faible dose en début de végétation est recommandée. Ceci a pour but de permettre un départ de croissance vigoureux et favoriser le développement racinaire pour accéder rapidement aux éléments nutritifs abondants dans le sol. Le niveau des applications de P et K en sols riches est généralement inférieur aux exportations des récoltes. Les grilles actuelles tendent donc à faire diminuer progressivement et lentement les teneurs en P et K des sols riches jusqu'à leur

¹ Service des Sols, MAPAQ, 2700, rue Einstein Sainte-Foy, Québec G1P 3W8

niveau d'entretien. Cependant, l'analyse périodique des sols va permettre de suivre cette évolution et d'ajuster les doses d'engrais en conséquence. Il n'y a donc pas de risque d'épuisement des sols avec les grilles de fertilisation du CPVQ.

En sols excessivement riches, contenant plus de 251 kg P/ha ou 501 kg K/ha, aucune application de P et K n'est recommandée, sinon une simple fumure de démarrage. Sur le plan agronomique, les possibilités d'accroissement des rendements par la fertilisation sont nulles et donc économiquement non rentables. Sur le plan environnemental, le risque de perte de phosphore et de potassium dans les sols exposés à l'érosion ou sensibles au lessivage s'accroît considérablement.

Une estimation de la distribution actuelle des sols au Québec selon les classes de fertilité en P et K basée sur l'étude "Inventaire des problèmes de la dégradation des sols du Québec" (Tabi et coll. 1990) démontre que dans les zones intensives de productions de maïs grain, les sols se trouvent surtout dans les classes de fertilité riche et très riche en P et K (Tableau 1a). Par contre, pour les prairies et les céréales, la plus grande proportion des sols se trouvent dans les classes pauvre et moyenne (Tableaux 1b et 1c). Le problème de la surfertilisation est identifié dans plus de 300,000 ha de sol au Québec en se basant sur une teneur supérieure à 500 kg/ha de P ou de K assimilable (Tabi et coll. 1990).

À long terme, la fertilisation selon les grilles actuelles favorise l'enrichissement en P et K en sols pauvres, l'entretien de leur niveau en sols moyens et une

Tableau 1a. : Distribution des sols selon les classes de fertilité pour le maïs-grain.

Classe de fertilité P	Niveau P	Superficies (ha)	%
Très pauvre	0-30	0	0
Pauvre	31-60	7,390	2,5
Moyen-1	61-90	20,880	7,1
Moyen-2	91-120	24,340	8,2
Bon	121-150	74,490	25,3
Riche	151-250	115,120	39,0
Excessivement riche	> 250	52,780	17,9
Total :		295,000	100

Classe de fertilité K	Niveau K	Superficies (ha)	%
Très pauvre	0-50	0	0
Pauvre	51-100	1,080	0,4
Moyen-1	101-150	34,800	11,8
Moyen-2	151-200	36,580	12,4
Bon	201-250	49,350	16,7
Riche	251-500	89,680	30,4
Excessivement riche	> 500	83,510	28,3
Total :		295,000	100

Source : Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec (Tabi et al. 1990).

diminution progressive des teneurs en ces éléments en sols riches et très riches. L'évolution des teneurs en P et K du sol suite à des applications des fertilisants dépend de plusieurs facteurs: les types de sol, la nature et l'intensité des systèmes culturaux et les quantités d'engrais minéraux ou des fertilisants organiques appliqués. Il est nécessaire de considérer tous ces facteurs afin de trouver un niveau optimal d'entretien de fertilité du sol qui est favorable pour la croissance des cultures envisagées et qui ne constitue pas un risque pour l'environnement.

Tableau 1b. : Distribution des sols selon les classes de fertilité pour les prairies.

Classe de fertilité P	Niveau P	Superficies (ha)	%
Très pauvre	0-30	83,600	8,4
Pauvre	31-60	350,600	35,1
Moyen-1	61-90	142,500	14,2
Moyen-2	91-120	183,900	18,4
Bon	121-150	91,800	9,2
Riche	151-250	132,800	13,3
Excessivement riche	> 250	14,800	1,5
Total :		1 000,000	100

Classe de fertilité K	Niveau K	Superficies (ha)	%
Très pauvre	0-50	138,300	13,8
Pauvre	51-100	343,500	34,4
Moyen-1	101-150	146,200	14,6
Moyen-2	151-200	50,400	5,0
Bon	201-250	89,600	9,0
Riche	251-500	216,400	21,6
Excessivement riche	> 500	15,600	1,6
Total :		1 000,000	100

Source : Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec (Tabi et al. 1990).

Tableau 1c. : Distribution des sols selon les classes de fertilité pour l'orge.

Classe de fertilité P	Niveau P	Superficies (ha)	%
Très pauvre	0-30	7,200	4,6
Pauvre	31-60	62,700	40,5
Moyen-1	61-90	24,800	16,0
Moyen-2	91-120	19,800	12,8
Bon	121-150	4,800	3,1
Riche	151-250	16,900	10,9
Excessivement riche	> 250	18,800	12,1
Total :		155,000	100

Classe de fertilité K	Niveau K	Superficies (ha)	%
Très pauvre	0-50	3,300	2,1
Pauvre	51-100	13,200	8,5
Moyen-1	101-150	32,600	21,0
Moyen-2	151-200	5,000	3,2
Bon	201-250	22,000	14,2
Riche	251-500	21,500	13,9
Excessivement riche	> 500	57,400	37,1
Total :		155,000	100

Source : Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec (Tabi et al. 1990).

FACTEURS AFFECTANT L'ÉVOLUTION DES TENEURS EN P ET K DES SOLS

1. Types de sol

Le degré d'enrichissement des teneurs en P et K disponibles du sol suite à des applications des fertilisants ou de diminution de ces teneurs causée par l'arrêt ou par la restriction de la fertilisation, dépendent beaucoup des caractéristiques physiques et chimiques du sol. Parmi ces caractéristiques, la capacité de fixation en P et K, le pH et la texture du sol sont généralement les facteurs importants à considérer.

Plusieurs travaux réalisés au Québec ont démontré que la capacité de fixation du phosphore par le sol affecte la nutrition des plantes (Giroux et Tran 1985, Tran et Giroux 1987). Les sols sont répartis en trois classes de fixation de P selon la teneur en aluminium libre des sols (Giroux et Tran 1985). Les engrais phosphatés appliqués dans les sols ayant des capacités de fixation en P élevées peuvent être rétrogradés en phosphates d'aluminium et de fer moins mobiles et moins disponibles à la plante. Les données recueillies à Québec montrent qu'il faut appliquer en moyenne entre 2 à 4 kg P/ha pour accroître l'analyse du sol de 1 kg P-Mehlich-3/ha. Peck et coll. (1971) ont trouvé des rapports semblables pour les sols en Illinois, soit 4 kg P/ha d'engrais phosphaté pour faire augmenter une unité d'analyse de sol en P-Bray-1 (équivalent à 1 kg P-Mehlich-3/ha). Peterson et Krueger en Wisconsin (1980) ont constaté, après huit ans d'expérience au champs, des accroissements de 1 kg/ha de P-Bray-1 suite à l'application de 2,3 kg P/ha d'engrais phosphaté. Barber (1979) a décrit l'évolution du P disponible d'un loam argileux en Indiana cultivé en rotation maïs-soya-blé-fourrage. Après 25 ans de culture, la teneur initiale de 40 kg P-Bray-1/ha était descendu à 18 kg P/ha dans les témoins sans fertilisation phosphatée; tandis que dans les parcelles ayant reçu l'engrais P aux doses de 22 et 54 kg P/ha/année, leur teneur en P a été augmentée à 54 et 160 kg P/ha. Par ailleurs, dans le cas d'un sol sablonneux et très pauvre en P disponible, Rehm et coll. (1984) ont trouvé des rapports beaucoup plus élevés qui varient de 5,6 à 9,3 kg P/ha pour chaque augmentation de 1 kg P-Bray-1/ha. Certains groupes de sols sont donc très difficiles à enrichir en phosphore disponible. Il ne faut donc pas viser un redressement à court terme du niveau de P disponible des sols pauvres mais plutôt suivre les grilles de recommandations d'engrais phosphaté basées sur le besoin des cultures et appliquer la fumure phosphatée selon les modes de placement en bande les plus efficaces.

Dans certains situations au Québec où le sol a été surfertilisé avec les engrais minéraux ou du lisier, les teneurs en P disponibles atteignent des niveaux excessivement riches, dépassant 500 kg P/ha. Une partie de l'engrais phosphaté résiduel dans le sol sera disponible à la plante durant les années subséquentes

(Sadler et Stewart 1975, McCollum 1991). Une autre partie de cet engrais résiduel est aussi transformée en des composés phosphatés (Al, Fe, Ca) moins solubles (Sadler et Stewart 1975, Olsen et coll. 1983, Adepoju et coll. 1986). Le pH et la nature du sol joue un rôle important dans la formation de ces composés.

L'absence de fertilisation phosphatée va créer une diminution progressive de la teneur de P disponible dans le sol. Une expérience en serre a permis de suivre l'évolution de la teneur en phosphore des sols suite à des cultures d'orge, de maïs et de dactyle sans apport d'engrais phosphaté (Tableau 2, Tran et Giroux, données non publiées). Cet essai démontre une diminution lente du niveau de fertilité en P des sols suite à l'arrêt de la fertilisation phosphatée. La vitesse d'épuisement du P disponible dépend du type de sol (pH et capacité de fixation en P), les exportations par les cultures et le niveau initial du P disponible du sol. Dans une expérience à long terme en champ pendant 30 ans en Caroline du Nord, McCollum (1991) a suivi l'épuisement du P disponible d'un sol loam sableux fin dans un système de rotation maïs-soya. Les exportations annuelles par les cultures sont en moyenne de 16 kg P/ha dans cette étude. Dans les parcelles ayant des teneurs initiales en P disponible équivalentes à 350 à 430 kg P-Mehlich-3/ha, le taux de diminution en P-Mehlich 3 suite à l'arrêt de fertilisation phosphatée est de 23 kg P/ha par année. Dans les traitements dont la teneur initiale en P-Mehlich-3 plus faible, soit de 78 et 200 kg P/ha, le taux de diminution de P disponible du sol est respectivement de 3,2 et 11,7 kg P/ha par année. Après 14 ans d'arrêt de fertilisation phosphatée, la teneur équivalente en P-Mehlich-3 du sol est baissée à 80 kg P/ha et les symptômes visuels de déficience en phosphore apparaissaient sur le maïs. Olsen et coll. (1983) ont trouvé aussi qu'en absence de fertilisation phosphatée dans les sols calcaires riches en P disponible, les déficiences en phosphore se manifestent seulement après cinq ou huit cultures successives sans engrais phosphaté.

Tableau 2. : Évolution de la teneur en phosphore des sols (P-Mehlich 3) suite à des cultures successives sans apport d'engrais phosphaté.

Série de sol*	P initial	P après orge	P après maïs	P après dactyle (3 coupes)	Diminution en P
	kg P/ha	kg P/ha	kg P/ha	kg P/ha	kg P/ha
Rideau	132	116	105	85	47
Sainte-Rosalie	157	148	123	121	36
Pontiac	116	103	94	90	26
Saint-Urbain	213	188	175	164	49
Lanoraie	513	475	470	448	65
Achigan	401	376	361	358	43

* Essai réalisé en serre par Tran et Giroux (données non publiées).

Par ailleurs, dans un sol chernozem en Saskatchewan cultivé en rotation jachère-blé-blé, Zentner et coll. (1993) ont rapporté que la teneur en P disponible initiale (19 kg P-Olsen/ha) n'a pas changé après 24 ans de culture. Dans cette étude, l'exportation en P

par les grains de blé était seulement 3,5 kg P/ha par année et pouvait être comblée par la minéralisation de P du sol.

En ce qui concerne le potassium, le changement de la teneur en K disponible des sols cultivés dépend beaucoup de l'exportation assez importante des cultures et de la capacité de fixation ou de libération du potassium du sol. La capacité de fixation en potassium des sols du Québec peut varier de 1,1 à 86% de l'engrais potassique ajouté (Giroux et Tran 1991). La quantité d'engrais K nécessaire pour faire augmenter d'une unité de K échangeable peut donc varier de 1,01 à 7,1 kg K/ha. Les sols qui fixent beaucoup de K ont souvent des pH élevés et une saturation en potassium (K/CEC) inférieure à 1,5%. L'énergie de rétention du potassium varie selon le rapport K/CEC. Dans les sols dont ce rapport est inférieur à 1,5%, le potassium équilibre difficilement la solution du sol et au-delà de 4%, le problème du lessivage en K peut se produire. Dans le cas d'un sol sablonneux ayant une CEC de 10 meq/100 g, une saturation en 1,5% de K correspond à 120 kg K/ha, tandis que dans un sol argileux possédant une CEC de 25 meq/100 g, cette saturation correspond plutôt à 300 kg K/ha. On peut donc maintenir un niveau de K plus élevé dans un sol argileux que dans un sol sablonneux. Deux sols ayant la même teneur en K échangeable, le sol sablonneux fournit, à court terme pendant une saison de croissance, plus facilement de K à la solution du sol que le sol argileux et il risque de s'épuiser davantage. Cependant à long terme, le sol argileux ayant une plus grande réserve en K peut fournir graduellement plus de K que le sol sablonneux à la plante telle la luzerne et maintenir plus longtemps sa fertilité. La diminution de la teneur en K dépend aussi du niveau initial de K échangeable (Peterson et Krueger 1980). Ces derniers auteurs ont constaté que la diminution annuelle du K échangeable d'un loam argileux, suite à l'arrêt de fertilisation en K, était en moyenne de 48, 81 et 125 kg K/ha/année respectivement dans les parcelles dont la teneur en K initiale de 84, 168 et 252 kg K/ha.

2. Fertilité du sous-sol

L'évolution des niveaux de fertilité en P et K des sols sont aussi liés à la fertilité du sous-sol. Plusieurs sols ont des teneurs en potassium élevées en profondeur alors que d'autres en contiennent peu (Tableau 3). Ceci va affecter beaucoup l'évolution des teneurs en potassium dans le cas d'une réduction des applications d'engrais. Les sols argileux de la plaine du Saint-Laurent sont plus riches en potassium en profondeur que ceux des autres régions, notamment ceux dérivés des tills glaciaires. Plusieurs cultures sont capables de puiser des éléments nutritifs dans le sous-sol. La luzerne, par exemple, peut prélever ces éléments à plus d'un mètre de profondeur; par contre, pour la plupart des cultures le système racinaire se retrouve abondamment surtout en surface et ne dépasse pas

40 à 60 cm. Les sols qui possèdent une fertilité plus grande dans le sous-sol s'épuiseront moins rapidement.

Pour le phosphore, la fertilité du sous-sol (40-60 cm) est généralement faible au Québec (Tableau 4). L'analyse de la teneur en phosphore de la couche arable pourrait suffire pour une bonne caractérisation de la fertilité du sol en P. Cependant, certains sols, riches en phosphates calciques, montrent des teneurs élevées en P total ou assimilable dans le sous-sol; c'est le cas par exemple de plusieurs séries de sol dans Charlevoix (Carrier, 1981). L'étude de la fertilité de ces sols peut être approfondie grâce à la méthode des résines échangeuses d'ions. (Tran et Simard, 1992).

Tableau 3. : Teneur en potassium échangeable selon la profondeur dans quelques séries de sols au Québec.

Série	Potassium échangeable (kg K / ha)			
	0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm	0-60 cm
Saint-Urbain	560	450	610	1620
Saint-Laurent	310	165	190	665
Aston	335	315	225	875
Sainte-Rosalie	660	585	470	1715
Magog	140	55	45	240
Ripon	250	80	70	400
Greensboro	120	50	40	210
Bedford	220	95	100	415

Tableau 4. : Teneur en phosphore assimilable selon la profondeur dans quelques séries de sols au Québec.

Série	Phosphore assimilable (kg / ha)			
	0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm	0-60 cm
Saint-Urbain	60	13	9	82
Saint-Laurent	164	29	16	209
Aston	347	239	67	653
Sainte-Rosalie	114	59	28	201
Magog	96	51	10	157
Ripon	296	39	20	355
Greensboro	182	43	26	251
Bedford	278	21	12	311

3. Forme de réserve du sol

Un autre facteur affectant l'évolution des teneurs en potassium des sols concerne les formes de réserve du sol. L'analyse de sol en K (Mehlich-3) fourni à l'agriculteur est une évaluation des teneurs en K échangeable, la forme la plus facilement disponible à la plante. Cette forme est en équilibre avec des formes non échangeables ou de réserve du sol. On utilise une solution d'acide nitrique (HNO_3 1M) pour mesurer la réserve en K des sols. Ces formes de réserve peuvent atteindre près de 6000 kg K/ha dans les sols argileux (Tableau 5). Par contre dans les sables, les formes de réserve en K ne représentent que 600 à 800 kg K/ha. La teneur en argile des sols est un bon indice de leur réserve en potassium (Simard et De Kimpe 1990). Ces auteurs ont démontré l'importance de ces formes de réserve dans le maintien de la fertilité des

sols et dans la nutrition des plantes lors d'un essai en serre sur la luzerne visant à épuiser les sols (Tableau 6). La nature des argiles et la présence de certains minéraux (orthose, mica) peut également affecter les formes de réserve en K du sol.

Pour le phosphore, la forme de P assimilable est en équilibre avec des fractions de phosphore minérales et organiques en réserve. Ces formes minérales se trouvent principalement liées aux différents éléments tels le fer, l'aluminium, le calcium et le magnésium du sol. Il est possible de fractionner ces différentes formes du phosphore selon leur degré de solubilité. De façon générale, on peut dire que les sols dérivés des tills glaciaires à réaction acide ont des formes dominantes en phosphates d'Al et de Fe; tandis que dans les sols argileux à réaction neutre ou calcaire les formes de phosphates calciques prédominent (Tran et Giroux 1987). La réserve en P organique de plusieurs centaines de kg P/ha dans les sols est aussi assez importante. Cependant il est difficile de connaître la contribution de ces formes organiques dans la nutrition des plantes.

Tableau 5. : Teneurs en potassium échangeable et de réserve dans neuf séries de sols du Québec.

Série	Texture	K	
		échangeable kg / ha	K-HNO ₃ (réserve) kg / ha
Saint-Samuel	SL	180	800
Beaurivage	LSg	244	614
Saint-Damase	LS	325	850
Le Bras	LLi	87	674
Woodbridge	L	689	1402
Chaloupe	L	216	1066
Sainte-Rosalie	LA	323	2550
Saint-Urbain	A	520	3371
Saint-Laurent	LLiA	238	5741

Tran et coll. (1987), Giroux et Tran (données non publiées).

Tableau 6. : Dynamique des teneurs en K-HNO₃ (réserve) des sols regroupés selon la texture après 10 coupes successives de luzerne en serre.

Sols	Stade		
	Début	Coupe 5	Fin (coupe 10)
	----- mg K kg ⁻¹ -----		
Sableux	219	166	153
Loameux	472	338	320
Argileux	1891	1773	1620

Source : Simard et DeKimpe (1990).

4. Nature et degré d'intensification des systèmes culturaux

Le niveau optimal d'entretien des teneurs en P et K des sols correspond généralement à la classe moyenne de la grille de fertilisation; il devrait varier selon la nature des cultures. Le niveau d'entretien du sol peut être maintenu plus bas dans les prairies que dans les champs de maïs. En effet, les plantes fourragères sont plus aptes à utiliser le potassium et le phos-

phore du sol que le maïs qui n'exploire pas toute la surface du sol et qui est moins efficace à soutirer ces éléments du sol.

La fertilisation d'entretien en potassium devrait varier aussi selon le degré d'intensification des cultures. En effet, les prélèvements en potassium et en phosphore sont proportionnels aux rendements obtenus (Tableau 7).

Tableau 7. : Quantité de potassium exportée par une récolte de foin de légumineuses et de graminées selon le rendement obtenu.

Rendement (80% M.S.)	Prélèvement (kg K/ha)	
	Prairie luzerne	Prairie mi
3 t/ha	68	57
6 t/ha	135	114
9 t/ha	203	171

Dans le cas des systèmes culturaux extensifs pour les herbages, les rendements et les exportations en potassium ne sont pas élevées et la fertilisation d'entretien devrait être plutôt faible. Par contre, pour des objectifs des rendements élevés, il est souhaitable de combler les exportations des récoltes par une fertilisation potassique appropriée dans le cas des sols ayant une fertilité moyenne en potassium pour éviter un épuisement en K du sol. Les grilles de fertilisation en K des herbages doivent donc être réajustés selon le degré de l'intensification des systèmes culturaux de la ferme.

Dans le cas des céréales à pailles et du maïs, l'exportation du potassium par les grains sont minimes par rapport à celle des tiges et des pailles (Tableau 8). Une partie du potassium prélevée va être restituée au sol avec le retour des résidus des récoltes. Il faut tenir compte de l'enlèvement ou de l'enfouissement des tiges ou des pailles (environ 11 kg K/ tonne de paille) dans la fertilisation potassique.

Tableau 8. : Prélèvement en P et K (kg/ha) par le maïs-grain (6,5 t/ha grain à 15% d'humidité).

	Tige	Grain	Total
P	7	25	32
K	82	26	108

Pour le phosphore, le retour de P au sol par les résidus de culture du maïs est faibles (7 kg P/ha), tandis que l'exportation par les grains sont plus élevées (environ 25 kg P/ha). En règle générale, pour plusieurs cultures, l'exportation du phosphore par les récoltes est assez faible, de l'ordre de 20 à 30 kg P/ha, comparativement à 100 à 200 kg K/ha pour le potassium. Le risque d'épuisement des sols est généralement plus élevé pour le potassium comparativement à celui du phosphore.

5. Fertilisation avec les engrais de ferme

Les engrais de ferme constituent au Québec une source abondante et économique d'éléments nutritifs. Des travaux de longue durée réalisés à la ferme ex-

périmentale du Service des Sols à Saint-Lambert (Lévis) par N'dayegamiye (1990) ont permis de mesurer l'effet d'apport prolongé de fumier solide sur l'évolution des teneurs en éléments nutritifs des sols. L'accroissement de la teneur en éléments nutritifs des sols est en relation avec la dose de fumier apportée (Tableau 9). Dans une autre étude à long terme avec le lisier de porc, Côté (1992) a trouvé que l'application de cet engrais de ferme sur le maïs avec une dose agronomique pendant 10 ans n'a pas amené un enrichissement excessif en P et K dans la couche arabe du sol.

Tableau 9. : Effet cumulatif d'apport prolongé de fumier sur les propriétés chimiques du sol Le Bras cultivé en maïs ensilage.

Traitement t/ha	N-total %	P	K	Ca	Mg	Cu	Zn
		mg kg ⁻¹					
0 (témoin)	0,14	30	62	1183	43	2,13	1,26
20	0,15	54	85	1250	55	2,26	2,02
40	0,17	65	97	1516	65	2,26	2,52
60	0,19	88	112	1566	78	2,40	3,60
80	0,21	103	160	1666	98	2,53	6,80
100	0,23	125	160	1883	126	3,06	7,60

*Doses de fumier solide de bovin apportées tous les 2 ans depuis 1978.
Source: N'dayegamiye (1990).

Dans la pratique agricole, on établit souvent les recommandations d'engrais de ferme sur la base de leur teneur en azote disponible. Dans ce cas, il peut arriver que les recommandations en P et K dépassent celles des grilles, créant ainsi un facteur d'enrichissement qui à moyen terme va hausser le niveau nutritif des sols. La grande disponibilité des engrais de ferme a permis d'accroître les réserves en P et K des sols pauvres dans plusieurs régions agricoles à des niveaux moyens ou riches, ce qui aurait été économiquement plus coûteux à réaliser avec les engrais minéraux. Cette stratégie de redressement de la fertilité des sols, peut cependant conduire à des excès. Lorsque la fertilité des sols est riche pour P et K, il faut cesser l'accumulation de ces éléments dans les sols en restreignant les applications d'engrais de ferme. Si on considère la très grande quantité d'engrais de ferme (35 millions de m³) produits au Québec par rapport aux superficies disponibles pour l'épandage, on réalise que certaines régions produisent un surplus d'engrais organiques alors que d'autres en manquent. L'accès à une source d'engrais peu coûteuse peut modifier la stratégie de redressement des sols pauvres et le niveau d'entretien des éléments nutritifs mais il faut revoir nos approches en sols riches. Le redressement des niveaux de fertilité pratiqué en agriculture devrait donc tenir compte des aspects économiques et environnementaux.

Approche par la méthode du bilan

Dans un contexte de fertilisation intégrée, l'objectif principal est de trouver un équilibre entre les besoins nutritifs optimaux des cultures et la fertilisation qui assure un niveau de production adéquat tout en maintenant les réserves nutritives et la capacité de production

des sols pour les années futures. Une fertilisation équilibrée prend également en considération les aspects économiques et environnementaux, en plus des aspects agronomiques.

La notion du bilan nutritif sur une ferme aide à déterminer si les éléments nutritifs prélevés et exportés des champs (sorties) sont compensés par les éléments retournés aux champs (entrées) par les engrais organiques et minéraux et par les résidus de culture. Les agronomes disposent suffisamment de données pour établir l'état du bilan nutritif dans un champ ou sur une ferme. En effet, les prélèvements en éléments nutritifs des récoltes, la composition des fumiers et des résidus de récolte peuvent être déterminés pour quantifier les entrées et les sorties des champs. En sols riches en P et K, les bilans peuvent être négatifs sans compromettre la viabilité des entreprises. Une analyse régulière des sols permettra de connaître le taux de diminution des réserves et d'ajuster les niveaux d'application appropriée des fertilisants. Jobin et Forand (1993) ont expérimenté cette approche sur des fermes du Québec. Ils mentionnent que l'approche par bilan est un outil très utile pour comprendre le fonctionnement d'une ferme et rassurer le producteur sur le maintien de la capacité de production des sols.

Nous avons établi le bilan nutritif pour P et K pour différentes situations de régie de culture et de fertilisation (Tableaux 10a, 10b, 10c et 10d). Ces résultats confirment que les grilles de fertilisation actuelles redressent la fertilité des sols pauvres, maintiennent celle des sols moyens et tendent à faire diminuer celle des sols riches. Une prise en considération de l'intensité des systèmes de culture doit être faite notamment pour les prairies afin d'ajuster la fertilisation en K selon l'objectif de rendement annuel. Ces bilans indiquent également que les engrais de ferme appliqués à fortes doses contribuent à enrichir encore les sols très bien pourvus en P et K. Les apports de fumier et lisier en sols riches en P devraient être faits en considérant les exportations des récoltes en P pour tenter d'établir un bilan équilibré qui ne provoque pas d'accumulation nette dans les sols.

Tableau 10a. : Bilan du phosphore dans une culture de maïs-grain cultivée en sol riche (225 kg P/ha) selon deux modes de fertilisation phosphatée.

ENTRÉES (kg P/ha)		SORTIES (kg P/ha)	
Engrais minéraux :	13	Prélèvement tige :	7
		Prélèvement épi :	25
Total :	13	Total :	32
		Exportation :	25
Bilan : -12 kg P/ha			
ENTRÉES (kg P/ha)		SORTIES (kg P/ha)	
Engrais minéraux :	13	Prélèvement tige :	9
Lisier (60m ³ x 0,8 kg P/m ³) :	48	Prélèvement épi :	30
Total :	61	Total :	39
		Exportation :	30
Bilan : + 31 kg P/ha			

Tableau 10b. : Bilan du potassium dans une culture de maïs-grain cultivée en sol riche (325 kg K/ha) selon deux modes de fertilisation potassique.

ENTRÉES (kg K/ha)		SORTIES (kg K/ha)	
Engrais minéraux :	20	Prélèvement tige :	92
		Prélèvement épi :	32
Total :	20	Total :	124
		Exportation :	32
Bilan : -12 kg K/ha			
ENTRÉES (kg K/ha)		SORTIES (kg K/ha)	
Lisier de porc (60 m ³ x 2 kg K/m ³) :	120	Prélèvement tige :	100
		Prélèvement épi :	35
Total :	120	Total :	135
		Exportation :	35
Bilan : + 85 kg K/ha			

Tableau 10c. : Bilan du phosphore dans une prairie de légumineuses cultivée en sol pauvre (25 kg P/ha) selon le rendement annuel obtenu.

Rendement 4 t/ha			
ENTRÉES (kg P/ha)		SORTIES (kg P/ha)	
Fumier solide (20 m ³ x 1 kg P/m ³) :	20	Récolte (4000 kg/ha x 0,3 % P : 2 coupes	12
Engrais minéraux : 2 ^e coupe	15		
Total :	35	Total :	12
Bilan : + 23 kg P/ha			
Rendement 8 t/ha			
ENTRÉES (kg P/ha)		SORTIES (kg P/ha)	
Fumier solide (20 m ³ x 1 kg P/m ³) :	20	Récolte (8000 kg/ha x 0,3 % P : 3 coupes	24
Engrais minéraux : 2 ^e coupe	10		
Engrais minéraux : 3 ^e coupe	10		
Total :	40	Total :	24
Bilan : + 16 kg P/ha			

L'agriculteur devrait donc se questionner sur son plan de fertilisation et vérifier s'il valorise bien les engrais de sa ferme et ceux achetés à l'extérieur en considérant la nutrition des plantes et l'évolution des réserves du sol. L'approche du bilan, combinée à un suivi régulier des analyses de sol, est la façon la plus efficace pour répondre à ces attentes.

CONCLUSION

Les grilles de fertilisation actuelles du CPVQ visent le maintien d'une production rentable de qualité tout en conservant les ressources sol et eau. Elles assurent également le maintien d'un niveau de fertilité acceptable (niveau d'entretien) dans les sols pour P et K. L'utilisation de ces grilles va à long terme redresser la fertilité des sols pauvres, maintenir celle des sols moyens et faire diminuer lentement celle des sols riches jusqu'à leur niveau d'entretien. L'équilibre, qui va s'établir entre la fertilisation et le niveau des élé-

Tableau 10d. : Bilan du potassium dans une prairie de légumineuses cultivée en sol moyen (130 kg K/ha) selon le rendement annuel obtenu.

Rendement 4 t/ha			
ENTRÉES (kg K/ha)		SORTIES (kg K/ha)	
Fumier solide (20 m ³ x 2,5 kg K/m ³) :	50	Récolte (4000 kg/ha x 2,3 % K : 2 coupes	92
Engrais minéraux : 2 ^e coupe	45		
Total :	95	Total :	92
Bilan : + 3 kg K/ha			
Rendement 8 t/ha			
ENTRÉES (kg K/ha)		SORTIES (kg K/ha)	
Fumier solide (20 m ³ x 2,5 kg K/m ³) :	50	Récolte (8000 kg/ha x 2,3 % K : 3 coupes	184
Engrais minéraux : 2 ^e coupe	40		
Engrais minéraux : 3 ^e coupe	35		
Total :	125	Total :	184
Bilan : - 59 kg K/ha			

ments dans le sol, dépendra de plusieurs facteurs dont la nature et le degré d'intensification des systèmes culturaux, l'utilisation des engrais de ferme, la fertilité du sol en surface et en profondeur ainsi que des formes de réserve lentement disponibles du sol.

Il est possible d'établir un bilan des éléments nutritifs prélevés et exportés des champs (sorties) et ceux retournés aux champs (entrées). L'approche du bilan, combinée à un suivi régulier des analyses de sol, constitue la façon la plus efficace pour juger des équilibres nutritifs du sol et de l'évolution de la fertilité des sols. L'application de cette méthode a permis de démontrer que les résidus de culture et les engrais de ferme peuvent avoir un effet marqué sur les équilibres nutritifs du sol. Le niveau d'intensification des systèmes culturaux pour les prairies affecte également la fumure d'entretien. Pour le potassium, la dose appliquée dans les prairies devrait varier selon le rendement annuel et selon le nombre de coupes afin de compenser les prélèvements de cet élément par les récoltes dans les sols pauvres et moyens. En sols riches, la majeure partie des prélèvements en P et K par les cultures est assurée par le sol. Il faut cependant suivre l'évolution de leur teneur dans les sols par une analyse périodique afin d'être en mesure d'ajuster la fertilisation lorsque le niveau d'entretien est atteint.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adepoju, A. Y., P. F. Pratt et S. V. Mattigod, 1986. Relationship between probable dominant phosphate compound in soil and phosphorus availability to plants. *Plant Soil* 92:47-54.
- Carrier, D. 1981. Étude pédologique de la région de Charlevoix. Dir. gén. recherche agricole, MAPAQ. 92 p
- Conseil des productions végétales du Québec (CPVQ) 1994. Grilles de référence en fertilisation. Agdex 540. 91 p.
- Côté, D. 1992. Optimisation de la valeur fertilisante dans le système cultural. Pages 215-247, Colloque sur la gestion des fumiers, Drummondville, Conseil des productions végétales du Québec.
- Barber, S. A., 1979. Soil phosphorus after 25 years of cropping with five rates of phosphorus application. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 10(11):1459-1468.
- Dionne, J. L., G. Barnett, E. Chamberland, J. Guilbeault, A. F. MacKenzie, R. Ouellette et M. Cescas, 1977. Calibration des méthodes d'analyses de sols, réponse du maïs aux engrais NPK, bilan P et K. Rapport de l'atelier calibration des méthodes d'analyses de sol. Conseil des productions végétales du Québec.
- Giroux, M., A. Dubé et G. M. Barnett, 1984. Effet de la fertilisation phosphatée sur la pomme de terre en relation avec l'analyse du sol et la source de phosphore utilisée. *Can. J. Soil Sci.* 64:369-381.
- Giroux, M. et W. van Lierop, 1982. Effet de la fertilisation potassique sur le rendement de la pomme de terre en relation avec l'analyse de sol. *Can. J. Soil Sci.* 62:259-266.
- 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 du sol. *Can. J. Soil Sci.* 65:47-60.
- Giroux, M. et T. S. Tran, 1991. Évaluation de la disponibilité du potassium du sol et des engrais en relation avec les propriétés des sols. *Agrosol* 4(1):30-38.
- Jobin, P et G. Forand, 1993. Le bilan nutritif, une approche écologique de la gestion des éléments nutritifs à la ferme. Essais et observations à la ferme. Rapport technique 1993. Centre de développement d'agrobiologie. Saint-Élizabeth-de-Warwick. 52 p.
- Lamarre, M. et M. Cescas, 1979. Établissement de fonction de production NPK pour le tabac à cigarette au Québec. *Can. J. Plant Sci.* 59:453-462.
- MacKenzie, A. F., 1979. Soil fertility studies at Macdonald College, 1978. CRSAQ reports. Dept. Renewable Resources Macdonald College, Ste-Anne-de-Bellevue, Qué.
- McCollum, R. E., 1991. Buildup and decline in soil phosphorus : 30-year trends on a typic Umprabult. *Agron. J.* 83:77-85.
- N'dayegamiye, A. 1990. Effets à long terme d'apports de fumier solide de bovins sur l'évolution des caractéristiques chimiques du sol et de la production du maïs-ensilage. *Can. J. Plant Sci.* 70:767-775.
- Olsen, S. R., F. S. Watanabe et R. A. Bowman, 1983. Evaluation of fertilizer phosphate residues by plant uptake and extractable phosphorus. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47:952-958.
- Rehm, G. W., R. C. Sorensen et R. A. Wiese, 1984. Soil test values for phosphorus, potassium and zinc as affected by rate applied to corn. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48:814-818.
- Sadler, J. M. et J. W. B. Stewart, 1975. Changes with time in form and availability of residual fertilizer phosphorus in a catenary sequence of chernozemic soils. *Can. J. Soil Sci.* 55:149-159.
- Simard, R. R., J. Zizka et C. R. De Kimpe, 1990. Le prélèvement du K par la luzerne (*Medicago sativa* L.) et sa dynamique dans 30 sols du Québec. *Can. J. Soil Sci.* 70:379-393.
- Simard, R. R. et C. R. De Kimpe, 1990. La dynamique des échanges potassiques dans les systèmes de fertilisation intégrée. *Agrosol* 3(1):20-27.
- Tabi, M., L. Tardif, D. Carrier, G. Laffamme et M. Rompré, 1990. Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec. Rapports régionaux 1 à 12. Entente auxiliaire Canada-Québec.
- Tran, T. S. et M. Giroux, 1987. Disponibilité du phosphore dans les sols neutres et calcaires du Québec en relation avec leurs caractéristiques chimiques et physiques. *Can. J. Soil Sci.* 67:1-16.
- Tran, T.S. et R.R. Simard. 1992. Comparaison entre les méthodes de résine échangeuses d'ions et les méthodes chimiques usuelles pour déterminer la disponibilité du phosphore des sols. *Agrosol* 5(1) : 44-49.
- Tran, T.S., M. Tabi et C.R. Dekimpe. 1987. Relation du potassium extrait par EUF et quelques méthodes chimiques avec les propriétés du sol et le rendement des plantes. *Can. J. Soil Sci.* 67:17-31.
- Zentner, R. P., C. A. Campbell et F. Selles, 1993. Buildup in soil available P and yield response of spring wheat to seed-placed P in a 24 year study in the Brown Soil zone. *Can. J. Soil Sci.* 73:173-181.