

Effets de la fertilisation N, P et K et leurs interactions sur le rendement d'une prairie à dominance de mil (*Phleum Pratense L.*), la teneur en éléments nutritifs de la récolte et l'évolution de la fertilité des sols

M. Giroux¹ et M. Lemieux¹

Résumé. M. Giroux, R. Morin et M. Lemieux. 2000. **Effet de la fertilisation N, P et K et leurs interactions sur le rendement d'une prairie à dominance de mil (*Phleum Pratense L.*), la teneur en éléments nutritifs de la récolte et l'évolution de la fertilité des sols.** *Agrosol*. 11 (1) : 40-47. Cette étude a pour but de mesurer l'effet de l'application d'engrais minéraux N, P et K ainsi que les interactions entre ces éléments sur le rendement, la composition de la récolte et l'évolution de la teneur en P et K des sols après 3 années de cultures (6 coupes) d'une prairie à dominance de mil (*phleum pratense L.*). Le dispositif de type factoriel (3 x 3 x 4) comportait 3 doses N (0, 50 et 100 kg N/ha), 3 doses P (0, 50 et 100 kg P₂O₅/ha) et 4 doses K (0, 67, 133 et 200 kg K₂O/ha). Il s'agit de doses annuelles fractionnées moitié avant la première et la deuxième coupe. La fumure N a produit un effet significatif sur le rendement, proportionnel à la dose appliquée. Par contre, les fumures P et K produisent un effet peu marqué sur le rendement dans le loam limoneux Le Bras renfermant respectivement 107 et 159 kg P et K/ha. Après 3 ans, dans les parcelles ne recevant pas de P ou de K, les teneurs dans les sols ont diminué de 30 kg P/ha et de 45 kg K/ha. Le changement dans la fertilité P et K des sols dépend des doses P et K utilisées. La teneur en K du sol varie aussi inversement avec la fumure N appliquée. Les doses N réduisent également la teneur en P et K du foin. Les effets antagonistes mesurés de la fumure N sur l'évolution de la fertilité des sols et sur la teneur en K du foin nous permettent d'affirmer que la fertilisation potassique devrait varier selon la fumure azotée pour les sols de fertilité moyenne où le maintien de la fertilité du sol en K est recherché. Les fumures N et K ont par contre des effets antagonistes importants sur les teneurs en Ca et Mg du foin et accroissent de façon appréciable le rapport K/Ca + Mg. L'utilisation de fumures N et K plus élevées oblige à surveiller davantage les déséquilibres Ca et Mg dans le sol et dans le foin.

Mots clés : prairies de graminées, fertilisation, azote, phosphore, potassium, fertilité des sols, composition minérale.

Abstract. M. Giroux, R. Morin et M. Lemieux. 2000. **Effect of N, P and K fertilization and their interaction on yield, nutrient content and soil fertility of a timothy hay meadow (*Phleum Pratense L.*).** *Agrosol*. 11 (1) : 40-47. The objective of this study was to measure the effect of N, P and K fertilization and their interactions on yield, nutrient content and soil fertility of a timothy hay meadow (*phleum pratense L.*) during a 3 years period. A factorial design (3 x 3 x 4) with 3 N rates (0, 50 and 100 kg N/ha), 3 P rates (0, 50 and 100 kg P₂O₅/ha) and 4 K rates (0, 67, 133 and 200 kg K₂O/ha) was used. The fertilizers were split half before the first and second cut. The N fertilization increased significantly the yield. The P and K fertilization had a small effect on yield in the Le Bras silty loam with 107 kg P/ha and 150 kg K/ha. After 3 years, plots with no P and K fertilization decreased 30 kg P/ha and 45 kg K/ha respectively in soil. The evolution of P and K fertility level changed with P and K fertilization. The exchangeable K varied also with N fertilization. The N rates decreased the P and K content of hay. These antagonism effects suggested that the K fertilization should be adjusted with the N fertilization to maintain soil K at a medium level. The N and K fertilization significantly decreased Ca and Mg hay content and increased the K/Ca + Mg ratio. A higher N and K fertilization supposed more care for Ca and Mg level in soil and hay.

Key words : Hay field, fertilization, nitrogen, phosphorus, potassium, soil fertility, nutrient content.

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

Introduction

Plusieurs facteurs doivent être pris en compte pour fournir une fertilisation adéquate en N, P et K dans les plantes fourragères. L'accroissement du rendement, la composition chimique de la récolte et l'évolution de la fertilité des sols sont trois facteurs importants à considérer. Le niveau d'intensité de la culture lié au nombre de coupes annuelles, l'objectif de rendement et le besoin en foin de l'entreprise agricole vont également affecter le niveau des applications d'engrais N, P et K (Giroux et Tran 1994).

Sur le plan de la fumure azotée des prairies de graminées, plusieurs études ont démontré que l'application d'azote accroît le rendement jusqu'à 200 kg N/ha et plus, de façon linéaire (Guertin et al. 1979, Saint-Pierre et Pelletier 1977, Ziadi 1999, Parent et al. 1997, George et al. 1973, MacLeod et MacLeod 1974). Cependant, Guertin et al. (1979) ont démontré que des doses supérieures à 225 kg N/ha peuvent provoquer un dépassement du seuil de toxicité en $N-NO_3$ établi à 0,15 % de la matière sèche (Ryan et al. 1972). Ils ont également observé que des doses faibles ou modérées d'engrais azotés (112 kg N/ha et moins) ont peu d'effet sur la teneur en azote total de la fléole et peuvent même réduire sa teneur. L'effet de dilution de l'azote dans une plus grande biomasse et l'effet de la fumure N sur la proportion tige-feuille font en sorte que les fumures azotées réduites n'ont pas beaucoup d'effet sur la teneur en protéine totale de la fléole (Guertin et al. 1979).

En ce qui concerne les interactions entre les fumures N, P et K, peu d'études ont été réalisées au Québec. Cependant, comme l'azote agit beaucoup sur la production des prairies de graminées, les interactions avec les fumures N, P et K sont susceptibles de se manifester, sur le rendement et la composition de la récolte. De même, les exportations en P et K sont fortement affectées par la fumure N (Parent et al. 1997). Les teneurs en P et K des sols sont donc

susceptibles d'évoluer différemment selon la fumure N appliquée. Fricker (1977) et Schechtner (1977) ont pu démontrer ces phénomènes pour le potassium dans des prairies en Europe et ils suggèrent que les doses K appliquées soient en relation avec les doses de N utilisées.

En ce qui concerne le phosphore, les travaux sur la capacité de fixation du P des sols et son incidence sur la nutrition des cultures et la disponibilité du phosphore du sol (Giroux et Tran 1996, Simard et al. 1994) ont permis d'élaborer des grilles de fertilisation des plantes fourragères qui tiennent compte de cette capacité de fixation (CPVQ inc. 1996). La saturation en P des sols s'est également révélé un indice fiable pour prédire la réponse des cultures aux apports d'engrais P (Giroux 1996, Parent et al. 1999). Cependant, les travaux sur la fertilisation des prairies de graminées au Québec indiquent généralement peu d'effet de la fumure P dans les sols de fertilité en P moyenne (Parent et al. 1997). L'incidence des niveaux d'application de P sur les prairies en relation avec l'évolution de la fertilité des sols a été étudié par Parent et al. (1997) pour les prairies. Après 3 ans, ils ont noté une diminution de la teneur en P dans les sols sans apport de P. Des données avec le lisier de porcs sur le maïs-grain sont disponibles et elles démontrent que cette évolution se fait en fonction du bilan entrée-sortie du P des champs (Tran et al. 1996).

En ce qui concerne la fumure K, deux situations problématiques sont susceptibles de survenir pour les plantes fourragères. D'une part, l'excès d'apport de potassium peut provoquer un déséquilibre cationique et anionique dans les fourrages (Leduc et Robert 1997, Thomas et Miner 1996). Un tel déséquilibre lié à l'excès d'apport de K peut affecter la disponibilité du calcium et du magnésium et provoquer la fièvre du lait ou une tétanie d'herbage. Cette situation est susceptible de survenir, particulièrement en sols très riches en K ou suite à une fertilisation en potassium élevée dans des sols faiblement pourvus

en Ca et Mg. Une étude réalisée au Québec par Leduc et Robert (1997) a démontré que 13 champs de plantes fourragères sur 20 montraient un rapport K/Ca + Mg trop élevé. L'arrêt ou une importante diminution de la fertilisation K, jusqu'à ce que les teneurs en K et les rapports nutritifs des fourrages redeviennent convenables, devrait alors être réalisé.

À l'opposé, l'autre situation susceptible de poser des problèmes concerne l'épuisement des sols. Plusieurs séries de sols contiennent des teneurs moyennes ou faibles en K échangeable en surface avec très peu dans les couches inférieures de sol. Ce sont le plus souvent des loams ou des sables situés dans les régions des Appalaches ou des Laurentides. Un bilan déficitaire du K peut provoquer une baisse rapide de la teneur en K des fourrages et des sols. Les exportations de K se situent à 20-25 kg K/tonne de foin, soit 100 à 200 kg K/ha et plus par an. Un épuisement de la teneur en K de ces sols peut survenir. Drouineau (1979) rapporte plusieurs essais où l'apport insuffisant de K dans les prairies provoque, après 3 ou 4 ans, un épuisement prononcé du K échangeable. Schechtner (1977) et Perrenoud (1978) ont trouvé qu'un apport insuffisant de potasse est susceptible d'avoir une action défavorable sur la qualité du fourrage : faible teneur en hydrates de carbone facilement solubles, forte teneur en nitrates et susceptibilité plus élevée aux maladies, particulièrement dans le cas de fortes fumures N. Ces données renforcent le besoin d'appuyer les recommandations en P et K des prairies de graminées sur un concept de fertilisation qui tient compte du maintien de la fertilité des sols de niveau moyen.

Le but de ce travail est de mesurer l'effet d'une fertilisation N, P et K et les interactions entre ces éléments sur le rendement d'une prairie de graminées dans un sol de fertilité moyenne en P et K. Il a aussi pour but de mesurer la composition minérale de la récolte en N, P, K, Ca et Mg, d'établir le bilan entrée-sortie de P et K et de quantifier les

changements des teneurs en P et K dans les sols sur 3 ans. Il se propose aussi de vérifier si on doit ajuster les doses de P et K des prairies avec celles de N et quantifier les doses de P et K nécessaires au maintien de la fertilité des sols et à une composition équilibrée des fourrages.

Matériel et méthodes

Une prairie de deux ans à dominance de graminées (fléole) a été fertilisée avec diverses combinaisons de fumure N, P et K pendant 3 ans (1994-96). Le champ était situé à Saint-Lambert-de-Lévis sur le sol de la série Le Bras, un loam limoneux. L'analyse chimique de ce sol a été réalisée avec la méthode Mehlich-3 pour déterminer la teneur en P, K, Ca, Mg et Al (Tableau 1). La teneur en M.O. et N total, la CEC, le pH à l'eau et la saturation en P et en K ont également été mesurés au début de l'expérience. La détermination des éléments nutritifs des sols a également été reprise parcelle par parcelle à la fin de l'expérience pour mesurer les changements survenus. Les traitements de fertilisation comportaient 3 doses d'azote (0, 50 et 100 kg N/ha), 3 doses de phosphore (0, 50 et 100 kg P₂O₅/ha) et 4 doses de potassium (0, 67, 133 et 200 kg K₂O/ha). Ces doses annuelles, appliquées à la volée, ont été fractionnées moitié avant la première coupe et moitié avant la deuxième coupe. Une régie annuelle de deux coupes a été pratiquée. Les formes d'engrais utilisées sont respectivement le nitrate d'ammonium (34-0-0), le superphosphate triple (0-46-0) et le chlorure de potassium (0-0-60) pour la fumure N, P et K.

Le dispositif expérimental était de type factoriel (3 doses N x 3 doses P x 4 doses K) avec 36 traitements répétés 3 fois pour un total de 108 parcelles. Chaque parcelle avait une dimension de 2 x 5 m. À la récolte, une bande de 0,6 m x 5 m est prélevée pour évaluer le rendement et un échantillon d'environ 500 g est prélevé et séché pour mesurer l'humidité et la teneur en N, P et K de la récolte. Le rendement cumulé pour les 3 années de l'expérience a également été effectué ainsi que les prélèvements totaux en P et en K. L'analyse de variance a été réalisée avec le logiciel SAS adapté au dispositif factoriel.

Résultat

Azote

La fumure azotée a produit un effet significatif à chacune des coupes. Cet effet est linéaire pour chacune des trois saisons (Tableaux 2 et 3). La dose d'azote produisant le rendement maximal se situe à plus de 100 kg N/ha. Le rendement relatif

$$\left(\frac{\text{rendement sans N}}{\text{rendement dose 100 kg N/ha}} \times 100 \right)$$

a varié de 77,1 % en 1994 à 71,4 % en 1995 et 67,2 % en 1996. Comme la proportion de légumineuses était plus grande en 1994 (environ 35 %) qu'en 1995 (environ 20 %) et en 1996 (environ 5 %), cela explique en partie le changement de la réponse à l'azote avec le temps. Pour la durée de l'essai (3 ans), le rendement relatif de N est de 72,2 %. La fumure azotée a donc

augmenté le rendement de 27,8 % pour la durée de 3 ans. L'examen des fonctions de production nous démontre que chaque kg N/ha appliqué accroît le rendement en foin de 8,8 à 23,5 kg selon les coupes. Pour la moyenne des trois ans, la productivité de l'azote a été de 15,5 kg de foin par kg N appliqué. La productivité limite, pour un prix du kg N de 1,10 \$ et du foin à 100 \$/tonne est de 11 kg de foin par kg N. La productivité moyenne de l'azote est donc supérieure à la productivité limite, ce qui confirme la rentabilité de la fumure N au moins jusqu'à 100 kg N/ha.

Phosphore

La fumure phosphatée a produit un effet significatif en 1995 et 1996 sur le rendement en foin (Tableau 2). En 1994, l'effet est non significatif. La dose produisant le rendement maximal a été de 50 kg P₂O₅/ha en 1995 et de 100 kg P₂O₅/ha en 1996 (Tableau 3). Pour la durée de l'essai, la dose cumulative optimale a été de 150 kg P₂O₅/ha sur 3 ans. Le rendement relatif (pourcentage du rendement maximum sans P) a varié entre 94,1 % en 1994 à 92,8 % en 1995 à 87,3 % en 1996. L'accroissement du rendement avec la fumure P pour la durée de l'essai a été de 6,6 %, représentant 964 kg/ha, soit un peu moins d'une tonne de foin sur 3 ans. La productivité moyenne du phosphore sur 3 ans a donc été de 6,4 kg de foin par kg P₂O₅ appliqué. Si on considère le prix de la tonne de foin à 100 \$/tonne et le prix du kg P₂O₅ à 0,90 \$/kg, la productivité limite du phosphore est de 9 kg de foin par kg P₂O₅ appliqué. Les coûts de fertilisation en P excèdent donc la valeur de l'accroissement du rendement en foin. Il semble qu'en sols de teneur moyenne en P, la rentabilité de la

Tableau 1. Analyse chimique du sol au début de l'expérience (printemps 1994)

Profondeur	M.O. (%)	N total (%)	P (kg/ha)	K (kg/ha)	Ca (kg/ha)	Mg (kg/ha)	Al (mg/kg)	Sat P (%)	K-HNO ₃ (kg/ha)	pH
0-20	4,2	0,17	107	159	2 012	88	1 237	3,9	674	6,2
20-40	---	---	31	82	1 031	81	1 357	1,0	---	---
40-60	---	---	37	75	869	247	1 206	1,4	---	---

fertilisation P à court terme ne soit pas démontrable sur prairies. Il faudra cependant examiner l'évolution de la fertilité des sols pour établir la fumure d'entretien de cette culture. Par ailleurs, les interactions entre la fumure N, P et K ne sont pas significatives sur les rendements.

Potassium

La fumure potassique a fourni un effet significatif sur le rendement dans 3 coupes sur 6 (Tableau 2). L'effet sur le total des 6 coupes est également significatif. Selon les saisons, le rendement relatif pour K se situe entre 90,4 et 94,2, soit 92,3 en moyenne (Tableau 3). L'accroissement du

rendement annuel en foin pour la fumure K a varié entre 275 et 599 kg/ha, soit de 2,07 à 4,5 kg de foin pour chaque kg de K₂O appliqué. Pour l'ensemble des 3 ans, la productivité du potassium a été de 2,9 kg de foin par kg K₂O appliqué. En considérant le prix du kg K₂O à 0,50 \$/kg et le prix du foin à 100 \$/tonne, on obtient une productivité limite de 5 kg de foin/kg K₂O. La rentabilité de la fumure K pour chacune des coupes ne peut donc être démontrée à court terme en sols de fertilité moyenne. Le maintien de la fertilité à plus long terme devra être examiné pour établir la fumure K d'entretien des prairies de graminées dans les sols de fertilité moyenne en K.

Évolution de la teneur en P et K des sols

Pour le phosphore, l'absence de fumure P pendant 3 ans a réduit la teneur en P des sols de 30 kg P/ha. D'une teneur initiale en P-Mehlich-3 de 107 kg P/ha, la teneur est passée à 77 kg P/ha. La dose de fertilisation annuelle de 50 kg P₂O₅/ha a maintenu la fertilité assez près du niveau initial. Par contre, la dose de 100 kg P₂O₅/ha appliquée annuellement a augmenté la teneur en P du sol de 32 kg P/ha sur 3 ans (Tableau 4). Ces résultats se comparent à ceux de Parent et al. (1997) quant à la dose nécessaire au maintien de la fertilité en P des prairies.

Tableau 2. Analyse de variance de l'effet des traitements N, P et K et de leurs interactions sur les rendements de la prairie selon les coupes et les saisons.

Traitement	Coupe 1	Coupe 2	Coupe 1 + 2	Coupe 3	Coupe 4	Coupe 3 + 4	Coupe 5	Coupe 6	Coupe 5 + 6	Total (coupe 1 à 6)
K	NS	4,15**	NS	NS	6,9**	4,5**	NS	2,9*	NS	3,8**
P	NS	NS	NS	4,7**	NS	3,6*	5,8**	3,1*	10,5**	7,4**
N	11,9**	34,1**	32,2**	32,7**	88,0**	71,8**	56,9**	9,0**	86,8**	129,5**
N x K	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
N x P	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
P x K	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
N x P x K	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
C.V. (%)	16,9	18,9	13,9	16,7	11,4	11,8	18,5	5,1	12,6	8,6

* Significatif à p=0,05 **Significatif à p=0,01

Tableau 3. Réponse de la prairie aux apports d'engrais N, P et K

Doses N annuelles	1994	1995	1996	Total
0	4 121 c	4 971 c	2 972 c	12 064 c
50	4 584 b	5 906 b	3 729 b	14 219 b
100	5 344 a	6 960 a	4 420 a	16 724 a
Rendement relatif N (%)	77,1	71,3	67,2	72,1
Doses P ₂ O ₅ annuelles				
0	4 495 a	5 736 b	3 461 c	13 692 b
50	4 777 a	6 181 a	3 698 b	14 656 a
100	4 777 a	5 920 ab	3 963 a	14 660 a
Rendement relatif P (%)	94,1	92,8	87,3	93,4
Doses K ₂ O annuelles				
0	4 462 b	5 667 c	3 568 b	13 697 b
67	4 419 b	5 744 bc	3 659 ab	13 822 b
133	4 737 ab	6 266 a	3 842 a	14 845 a
200	4 714 ab	6 106 ab	3 759 ab	14 578 ab
Rendement relatif K (%)	94,2	90,4	92,9	92,3

Figure 1. Evolution de la teneur en K des sols après 3 années de culture d'une prairie de graminées en fonction des doses de N et K appliquées.

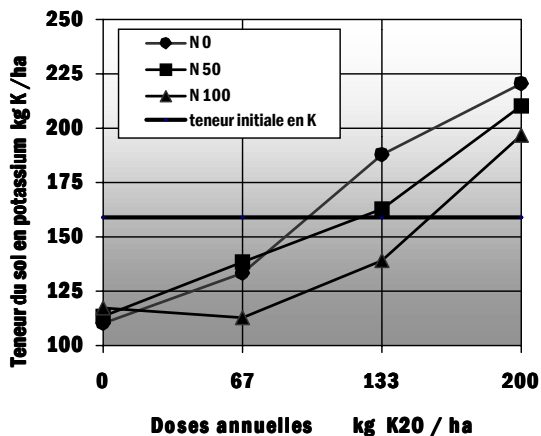


Figure 2. Relation entre la teneur moyenne en azote du foin et les doses N appliquées (moyenne des 6 coupes).

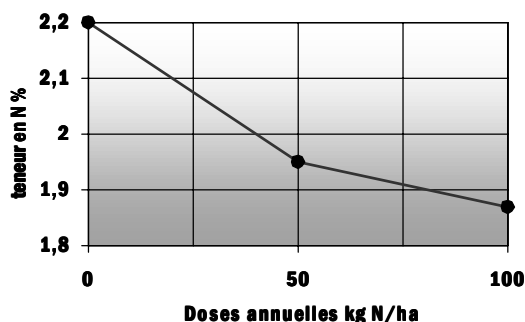
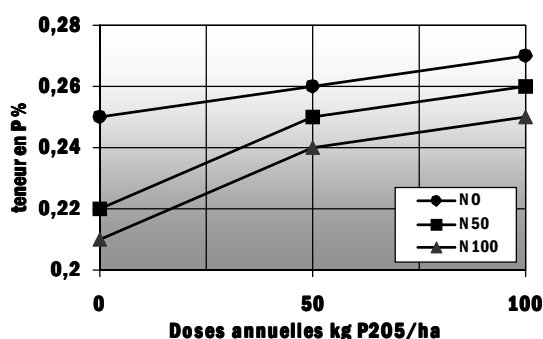


Figure 3. Relation entre la teneur en P du foin et les doses d'azote et de phosphore appliquées (moyenne des 6 coupes).



Un facteur d'enrichissement du niveau de fertilité en P des sols a été calculé pour chacune des doses de P selon les changements survenus à la teneur en P des sols et le bilan entrée-sortie du P des parcelles. Le facteur d'enrichissement est négatif pour les parcelles témoins sans P (-0,97), presque nul (-0,07) pour la dose annuelle de 50

kg P₂O₅/ha et positif (+0,35) pour la dose annuelle de 100 kg P₂O₅/ha (Tableau 4). Ces résultats démontrent que le bilan des entrées et des sorties du P des champs a beaucoup d'effet sur l'évolution de la fertilité du sol.

Pour le potassium, l'absence de fertilisation K pendant 3 ans a réduit la teneur en K des sols de 45 kg K/ha, soit d'une teneur initiale de 159 à 114 kg K/ha. La dose 133 kg K₂O/ha, appliquée annuellement, a maintenu la teneur en K des sols à son niveau initial (Tableau 5). La dose annuelle de 200 kg K₂O/ha a produit un enrichissement de 50 kg K/ha. Le facteur d'enrichissement mesuré dans les sols en absence de fumure K a été de -0,17 ; ce facteur s'accroît progressivement avec les doses de K pour atteindre +0,36 avec une dose annuelle de 200 kg K₂O/ha.

Les prélèvements en K sont importants. Ils varient entre 268 kg K/ha et 360 kg K/ha sur 3 ans selon des doses K appliquées (Tableau 5). Une dose annuelle moyenne de 133 kg K₂O/ha est nécessaire pour maintenir la fertilité en K des sols. L'étude des interactions entre la fumure N et K montre que la fumure N affecte l'évolution de la teneur en K des sols (Tableau 6). Ceci s'explique par le fait que l'azote agit beaucoup sur le rendement et par conséquent sur les exportations de K modifiant ainsi l'évolution de sa teneur dans les sols. La figure 1 montre l'effet de l'interaction entre la fumure N et K sur l'évolution de la teneur en K des sols. En absence de fumure N, la dose annuelle de K nécessaire pour maintenir la teneur en K du sol est de 100 kg K₂O/ha. Elle s'accroît à 125 kg K₂O avec la dose de 50 kg N/ha puis 157 kg K₂O avec la dose 100 kg N/ha. L'interaction entre les fumures N et l'évolution du niveau de P du sol n'est pas significative dans cette étude après 3 ans. Il n'est pas exclu qu'à plus long terme cet effet se manifeste.

Ces résultats démontrent que la dose de K doit varier avec la dose N dans la fertilisation des prairies de graminées de fertilité moyenne en K. Plus la dose N est élevée, plus la dose K doit l'être pour

maintenir la teneur en K des sols et celle des fourrages. Même si en sols moyens les fumures K ne produisent pas un effet économiquement rentable sur l'accroissement du rendement, une dose annuelle moyenne de 133 kg K₂O/ha est nécessaire pour maintenir la teneur en K des sols. Pour la classe de fertilité qui nous concerne (151 à 200), tout à fait convenable pour l'entretien de la fertilité des sols pour les prairies de graminées des sols pour les prairies de graminées des sols pour les prairies de graminées des sols pour les prairies de graminées des sols. La dose recommandée est loin d'assurer le maintien de la fertilité en K des sols de niveau moyen. Dans ce contexte, des doses de K supérieures à celles du CPVQ (1996) en sols moyens en K sont justifiables et même nécessaires pour la durabilité, la productivité des sols et le maintien de leur fertilité. Pour le phosphore, les apports recommandés en sols moyens se rapprochent de la dose nécessaire au maintien de la fertilité des sols. Il n'y a pas lieu de les modifier.

Teneur en N, P et K du foin

La fumure azotée a produit un effet significatif sur la teneur en N du foin pour 5 des 6 coupes effectuées (Tableau 6 et figure 2). Cet effet est cependant négatif de sorte que les doses N appliquées tendent à réduire la concentration N des fourrages. Cet effet a déjà été observé par Guertin et al. (1979) qui mentionnent que les doses modérées d'azote produisent une diminution de la teneur en N du foin de graminées par un effet de dilution de l'azote prélevé dans une plus grande biomasse. Ces auteurs mentionnent aussi que les fumures N accroissent le rapport tige-feuille, ce qui contribue à réduire la teneur en N du foin. La proportion de graminées vs légumineuses dans le foin est également réduite à moyen terme par les doses N (Parent et al. 1997). Comme les graminées ont des teneurs en N moindres que les légumineuses, la fumure N contribue ainsi à réduire la teneur en N du foin dans les prairies mixtes.

Les interactions entre les fumures N, P et K se sont révélées non significatives sur

Tableau 4. Évolution de l'état du phosphore du sol au début et à la fin de l'essai (3 ans) selon les apports de P effectués.

Dose annuelle (kg P ₂ O ₅ /ha)	Apport cumulatif 3 ans (kg P/ha)	Teneur initiale Printemps 1994 (kg P/ha)	Teneur finale Automne 1996 (kg P/ha)	Δ P sol* 3 ans (kg P/ha)	Prélèvement P (kg/ha)	Facteur d'enrichissement**
0	0	107	77 c	-30	30,9	-0,97
50	66	107	105 b	-2	36,9	-0,07
100	131	107	139 a	+32	38,7	+0,35

* Δ P sol : variation de la teneur en P Mehlich-3 des sols entre la fin et le début de l'expérience (3 ans)

** facteur d'enrichissement : $\frac{\Delta P (\text{sol})}{(P \text{ apporté} - P \text{ prélevé})}$

Tableau 5. Évolution de l'état du potassium du sol au début et à la fin de l'essai (3 ans) selon les apports de K effectués.

Dose annuelle (kg K ₂ O/ha)	Apport cumulatif 3 ans (kg K/ha)	Teneur initiale Printemps 1994 (kg K/ha)	Teneur finale Automne 1996 (kg K/ha)	Δ K sol* 3 ans (kg K/ha)	Prélèvement K (kg/ha)	Facteur d'enrichissement**
0	0	159	114 d	-45	268	-0,17
67	167	159	138 c	-21	292	-0,16
133	333	159	160 b	+2	346	+0,08
200	500	159	209 a	+50	360	+0,36

* Δ P sol : variation de la teneur en P Mehlich-3 des sols entre la fin et le début de l'expérience (3 ans)

** facteur d'enrichissement : $\frac{\Delta K (\text{sol})}{(K \text{ apporté} - K \text{ prélevé})}$

la teneur en N du foin. L'apport de P et K a donc peu d'effet sur la teneur en N du foin. Par contre, les teneurs en P et K sont affectées par la fumure azotée pour plusieurs coupes (Tableau 6). La teneur en P du foin varie donc positivement avec la fumure P et négativement avec la fumure N (Figure 3). De même, la teneur en K du foin s'accroît avec les doses K et diminue avec les doses N (Figure 4). Concrètement, cela signifie que pour maintenir une teneur en K suffisante de 2,0 % dans les fourrages, il

faudrait ajuster la dose de K selon le niveau des apports d'azote. Tout comme c'était le cas avec l'évolution de la teneur en K des sols, la fumure azotée affecte la teneur en K du foin, de sorte que le niveau des apports de K doit être fait en fonction du niveau des apports de N. Les prairies de graminées peuvent recevoir des niveaux d'azote annuels jusqu'à 225 kg N/ha (Guertin et al. 1979). Ces doses N variables nécessitent des ajustements au niveau des apports de K pour maintenir la fertilité des sols moyens et

la teneur en K du foin à un niveau acceptable. D'après les données de cette étude, les doses K requises pour la maintien de la fertilité du sol ont varié entre 100 et 157 kg K₂O/ha pour des niveaux de fumure N variant entre 0 et 100 kg N/ha.

Teneur en Ca et Mg du foin

La teneur en calcium du foin est fortement diminuée par la fumure azotée (Figure 5). Elle diminue

Figure 4. Relation entre la teneur en K du foin et les doses d'azote de potassium appliquées (moyenne des 6 coupes).

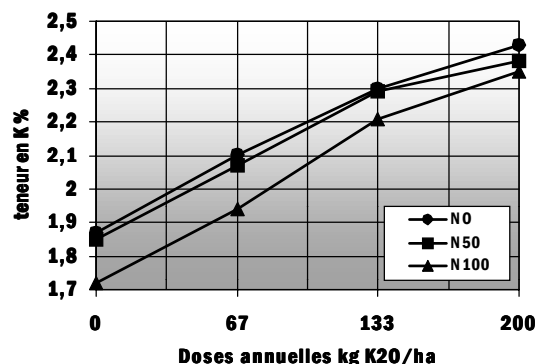


Figure 5. Relation entre la teneur en Ca du foin et les doses d'azote et de potassium appliquées (moyenne des 6 coupes).

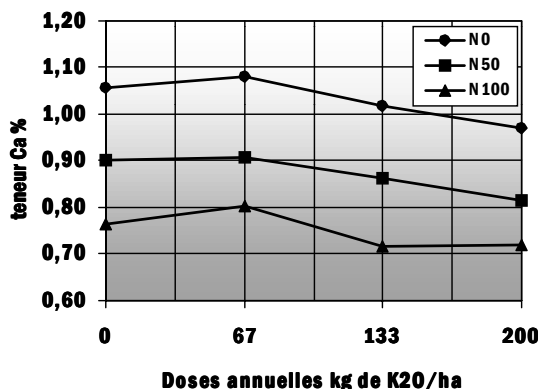


Figure 6. Relation entre la teneur en Mg du foin et les doses d'azote et de potassium appliquées (moyenne des 6 coupes).

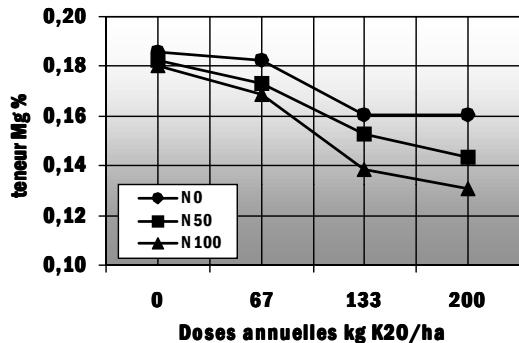
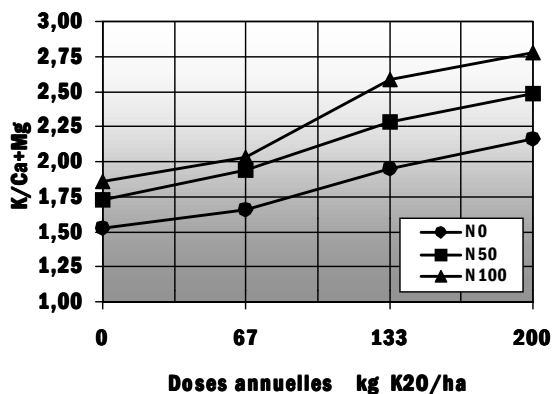


Figure 7. Relation entre le rapport K/Ca+Mg du foin et les doses d'azote et de potassium appliquées



progressivement de 1,05 à 0,75 % Ca pour un accroissement de la dose annuelle d'azote de 0 à 100 kg N/ha. Ces niveaux de calcium sont suffisants pour une croissance et une production optimales du foin. Les fortes doses de K ont également un effet à la baisse sur la teneur en Ca du foin. L'effet antagoniste des fumures N et K sur la teneur en Ca du foin est donc très marqué. Si des applications élevées d'engrais N et K sont faites sur prairies, il peut être nécessaire de suivre la teneur en Ca du foin pour prévenir les problèmes d'hypocalcémie chez les animaux.

Les fumures N et K produisent également un effet antagoniste sur les teneurs en Mg du foin (Figure 6). Le sol Le Bras renfermait au début de l'essai 88 kg Mg/ha (Tableau 1). Ce sol possède cependant une teneur élevée en Mg de 247 kg Mg/ha dans la couche 40-60 cm. Il semble toutefois que ce magnésium ne soit pas disponible puisque les teneurs

en Mg du foin sont faibles, variant de 0,13 à 0,19 % Mg. L'ajustement des fumures N et K à la hausse pour les prairies de graminées obligera à surveiller davantage la teneur en Mg des sols et du foin de manière à prévenir la tétanie d'herbage dans les sols de faible fertilité en Mg. Au besoin, des doses de Mg proportionnelles avec la fumure N et K peuvent être appliquées.

exemple, une dose de 100 kg N/ha et 200 kg K₂O/ha a fourni un rapport K/Ca + Mg de 2,75, ce qui est considéré comme élevé. La surfertilisation en K peut accroître ce rapport jusqu'à des niveaux de déséquilibre nutritif.

Conclusion

Le rapport nutritif K/Ca + Mg du foin s'accroît avec les doses de N et K appliquées (Figure 7). Il varie en moyenne entre 1,5 et 2,75 selon les fumures N et K. L'équilibre nutritif des trois éléments devra être surveillé davantage si on utilise des doses élevées d'azote et de potassium sur prairies. Par

Cet essai a démontré un effet important de la fumure azotée sur le rendement d'une prairie à dominance de graminées dans un loam limoneux Le Bras de fertilité moyenne en P et en K. L'effet est directement proportionnel à la fumure N appliquée et économiquement rentable. Pour les fumures P et K appliquées,

Tableau 6. Analyse de variance de l'effet des traitements N, P et K et de leurs interactions sur la teneur en N, P et K du foin et l'évolution des niveaux P et K du sol selon les coupes.

Azote							
Traitements	Coupe 1	Coupe 2	Coupe 3	Coupe 4	Coupe 5	Coupe 6	
	F	F	F	F	F	F	
K	NS	NS	NS	NS	NS	NS	
P	NS	NS	NS	NS	NS	NS	
N	NS	51,8**	6,4**	181,8**	3,4*	328,9**	
N x K	NS	NS	NS	NS	NS	NS	
N x P	NS	NS	NS	NS	NS	NS	
P x K	NS	NS	NS	NS	NS	NS	
N x P x K	NS	NS	NS	NS	NS	NS	
C.V. (%)	9,7	10,8	8,8	7,0	10,8	6,4	
Phosphore							
Traitements	Coupe 1	Coupe 2	Coupe 3	Coupe 4	Coupe 5	Coupe 6	P-sol
K	NS	NS	2,9*	2,7*	3,2*	NS	NS
P	7,0**	13,0**	70,1**	33,4*	14,1**	22,1**	102,6**
N	NS	11,5**	7,1**	67,8**	22,1**	104,1**	NS
N x K	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
N x P	NS	2,5*	2,6*	NS	NS	NS	NS
P x K	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
N x P x K	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
C.V. (%)	9,1	7,8	8,2	8,3	7,8	8,9	22,2
Potassium							
Traitements	Coupe 1	Coupe 2	Coupe 3	Coupe 4	Coupe 5	Coupe 6	K-sol
K	19,9**	37,3**	66,9**	112,2**	38,8**	107,5**	90,0**
P	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
N	NS	NS	2,9*	2,7*	22,8**	96,5**	8,2**
N x K	NS	NS	NS	NS	NS	NS	2,5*
N x P	NS	2,5*	NS	NS	NS	NS	4,0**
P x K	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
N x P x K	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
C.V. (%)	8,8	10,4	7,7	7,5	7,9	8,2	15,2

* Significatif à p=0,05 **Significatif à p=0,01

l'effet sur le rendement est plutôt faible et économiquement non rentable pour la durée de l'essai de 3 ans. Par contre, si aucune application d'engrais P ou K n'est faite, le niveau de fertilité des sols diminue de façon appréciable. En trois ans, en absence de fertilisation P et K, les teneurs dans les sols ont diminué respectivement de 30 kg P/ha et 45 kg K/ha. Les doses moyennes de P et K nécessaires au maintien de la fertilité des sols sont annuellement de 50 kg P₂O₅/ha et 133 kg K₂O/ha. Les facteurs d'enrichissement en P et K des sols calculés à partir de l'évolution de la fertilité des sols et des bilans entrées-sorties des parcelles confirment ces résultats. De plus, la fumure N appliquée affecte beaucoup les prélèvements en K du foin, de sorte que l'évolution des teneurs en K des sols est inversement proportionnelle à la fumure N appliquée. Les doses de K des prairies de graminées en sols moyens devraient être revues de manière à assurer un maintien de la fertilité des sols et ajustées en fonction du niveau de fumure N.

D'autre part, les fumures N, P et K et leurs interactions affectent la teneur en N, P et K du foin. Dans le cas de l'azote, les fumures N tendent à réduire la teneur en N du foin. Un effet de dilution de l'azote dans une grande biomasse est en partie à l'origine de cet effet. La teneur en P du foin s'accroît proportionnellement avec les doses de P mais décroît avec les doses N. De même, les doses K accroissent la teneur en K du foin mais les doses N la font diminuer.

La fertilisation N, P et K des prairies de graminées ne doit pas seulement considérer l'aspect économique sur la production à court terme mais aussi le maintien de la fertilité des sols et une composition équilibrée des fourrages à moyen et long terme. Dans les sols de fertilité moyenne en P et K, le niveau des applications P et K doit considérer les bilans entrées-sorties de ces éléments. Les doses de K nécessaires au maintien de la fertilité des sols ont varié entre 100 et 157 kg K₂O/ha selon le niveau de la fumure N. La dose de N apportée devrait

être prise en considération pour établir le niveau de l'application de K. Les doses N et K appliquées contribuent à réduire la teneur en Ca et Mg du foin et à accroître son rapport K/Ca + Mg. Des fumures plus élevées de N et K sur prairies nécessitent un suivi plus attentif des niveaux de Ca et Mg dans le sol et dans le foin.

Références bibliographiques

- CPVQ. 1996. Grilles de référence en fertilisation. 2^e édition. 128 p.
- Drouineau. 1979. Effets du potassium dans les essais de longue durée. Dossier K₂O, No 13. S.C.P.A. Mulhouse, France.
- Fricker, C. 1977. Fertilisation potassique des prairies en Irlande. Dossier K₂O, No 9. S.C.P.A. Mulhouse. France.
- George, J.R., C.L. Rhykerd, C.H. Noller, J.E. Dillon et J.C. Burns. 1973. Effect of N fertilization on dry matter yield, total N, N recovery and nitrate N concentration of three-cool season forage species. *Agron. J.* 65 : 211-216.
- Giroux, M. et T.S. Tran. 1994. Étude des facteurs affectant l'évolution de la fertilité des sols agricoles. *Agrosol* 7 (2) : 23-30.
- Giroux, M. et T.S. Tran. 1996. Critères agronomiques et environnementaux liés à la disponibilité, la solubilité et la saturation en phosphore des sols agricoles du Québec. *Agrosol* 9 (2) : 51-57.
- Guertin, S.P., St-Pierre, J.C. et P. Gervais. 1979. Influence de la fertilisation azotée sur le rendement, la valeur nutritive et la teneur en diverses fractions azotées de trois cultivars de la fléole des prés. *Can. J. Plant Sci.* 59 : 839-846.
- Leduc, R. et L. Robert. Alimentation : Spécial K. Le producteur de lait québécois. Avril 1997. P. 38-40.
- MacLeod, L.B. et J.A. MacLeod. 1974. Effects of N and K fertilization on the protein, nitrate and non-protein reduced N fractions of timothy and brome grass. *Can. J. Plant Sci.* 54 : 331-341.
- Parent, G., R. Simard, J. Lafond et C. Lafrenière. 1997. Évaluation des besoins en azote (N), phosphore (P) et en potassium (K) dans la production des plantes fourragères en Abitibi-Témiscamingue. Entente auxiliaire Canada-Québec. Rapport final AE-081. 67 p.
- Parent, L.E., A. Pellerin, L. Khiari, H. Moore et J. Gallichand. 1999. Développement d'un indicateur de saturation du sol en P et son application dans un petit bassin versant agricole. Compte-rendu de la Journée d'information sur la problématique du phosphore. U. Laval/IRDA. Mars 1999.
- Perrenoud, S. 1978. Le potassium et la santé des plantes. Dossier K₂O S.C.P.A. Mulhouse. France. 36 p.
- Ryan, M., W.F. Wedin et W.B. Bryan. 1972. Nitrate-N levels of perennial grasses as affected by time and level of nitrogen application. *Agron. J.* 64 : 165-168
- Schechtner, G. 1977. Étude de la fumure potassique des prairies. Dossier K₂O, No 9. S.C.P.A. Mulhouse. France.
- Simard, R.R., D. Cluis, G. Gangbazo et A.R. Pesant. 1994. Phosphorus sorption and desorption indices in soil. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 25 : 1483-1494.
- St-Pierre, J.C. et G. Pelletier. 1977. Effet de l'application d'azote et du stade de croissance à la récolte sur la performance de la fléole des prés (*Pheum pratense*). *Can. J. Plant Sci.* 57 : 955-962.
- Thomas, E.D. et W.H. Miner. 1996. Fertilizing forages. Compte-rendu de la conférence présentée à Dairy Day at Miner Institute. November 1996.
- Tran, T.S., D. Côté et A. N'Dayegamiye. 1996. Effets des apports prolongés de fumier sur l'évolution des teneurs du sol en éléments nutritifs majeurs et mineurs. *Agrosol* 9 (1) 21-30.