



Rapport de recherche

## **FERTILISATION DES PLANTES FOURRAGÈRES PÉRENNES : PRODUCTION**

Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation du Québec

**FASCICULE 10 :**  
**Prairies de graminées et prairies de légumineuses**  
Version finale

Date : 7 octobre 2023

Responsable scientifique : Christine Landry, Ph. D.,

Ce rapport a été produit à l'attention du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation



À l'IRDA, on **collabore**, on se **questionne**, on **explore** et on **progressé** ensemble dans la même direction : celle d'une agriculture saine, dynamique et performante.

Nous sommes des **scientifiques**, mais aussi des **gens de terrain** qui **collaborent** avec l'ensemble du milieu agricole.

Notre mission consiste à innover en agroenvironnement pour créer ensemble la production agricole de demain. Consulter le [www.irda.qc.ca](http://www.irda.qc.ca) pour en connaître davantage sur l'Institut et ses activités.

## Question ou commentaire

Christine Landry, biol., agr., Ph. D.  
Chercheure  
Responsable scientifique et auteur principal  
T : 418 643-2380 p. 640  
[christine.landry@irda.qc.ca](mailto:christine.landry@irda.qc.ca)

## Auteurs du rapport

### Auteurs principaux

Christine Landry, agr., biologiste, Ph. D., IRDA  
Julie Forest-Drolet, agr., M. Sc., IRDA  
Claude-Alla Joseph, Ph. D., IRDA  
Mandela M. Jacques, M. Sc., IRDA

### Qualité fourragère

Jean-Philippe Laroche, agr., M. Sc., Lactanet

## Collaborateurs au contenu

### Fertilisation

Stéphanie Houde, agr., M. Sc., IRDA

### Base de données

Simon Guillemette, biologiste, IRDA  
Lélia Anderson, agr., M. Sc. B. Ing., IRDA  
Mandela M. Jacques, M. Sc., IRDA  
Sébastien Rougerie, M. Sc., IRDA

### Essais

Julie Mainguy, IRDA  
Mylène Marchand, IRDA  
Olivier Breton-Bourgault, IRDA

### Analyses statistiques

Mick Wu, Biostatisticien, Ph. D., IRDA

## Merci à notre partenaire financier

Ce projet a bénéficié d'une aide financière en vertu du Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (MELCC).

 PARTENARIAT  
CANADIEN pour  
l'AGRICULTURE

Canada Québec 

Ce rapport peut être cité comme suit :

Landry, C., J. Forest-D., C.-A. Joseph, M. M. Jacques, J. P. Laroche. 2023. Fertilisation des plantes fourragères pérennes : production. Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation du Québec (2020-2023).

Fascicule 10. Version préliminaire. IRDA. 109 pages.

© Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA)

## Mise en contexte

L'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) a reçu du MAPAQ le *Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation 2020-2023* (MIRVRF). Un premier volet du Mandat était de créer une base de données (BD) et d'y colliger les données validées des essais du *Programme de soutien à l'innovation horticole* (PSIH, 2004-2008, carotte seulement), du *Programme de soutien aux essais de fertilisation des cultures maraîchères* (PSEFCM, 2008-2012) et du *Programme de soutien aux essais de fertilisation* (PSEF, 2013-2018). Un second volet du mandat consistait à vérifier la possibilité de bonifier la base de données avec les travaux d'autres équipes de recherche québécoises ou de régions pédoclimatiques compatibles lorsque possible. Un vaste travail de recherche a permis l'envoi de dizaines de requêtes visant la récupération et la valorisation de travaux antérieurs. Les documents reçus à l'issue de cette démarche ont été validés et homogénéisés. Les données utiles ont été extraites et intégrées à la base de données, sur approbation des expéditeurs. Ultimement, ce sont les calculs aux fins de la révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation qui bénéficieront de cette démarche à grande échelle. Dans un troisième volet du MIRVRF, des essais supplémentaires au champ ont été réalisés dans cinq cultures (citrouille et rutabaga en sol minéral; oignon sec, oignon vert et radis en sol organique) afin d'améliorer la représentativité de certaines catégories de sol ciblées lors du premier mandat octroyé à l'IRDA (*Mandat Plan de révision des grilles de référence en fertilisation du Québec, 2017-2020*). Le dernier volet du MIRVRF consistait à déterminer les indicateurs et les intervalles des classes de fertilité de sol, ainsi que les valeurs scientifiques de référence en fertilisation (VSRF) qui leur sont associées, pour les cultures sélectionnées.

Les nouvelles classes de sol et leurs VSRF associées, ainsi que des pistes de réflexion lorsqu'une absence de donnée empêche l'obtention des VSRF par calcul, sont soumises par l'IRDA au Comité scientifique (CS). Celui-ci a pour mandat d'entériner les propositions de l'IRDA afin de produire les prochaines grilles de référence en fertilisation du Québec dans le cadre de rencontres IRDA-CS coordonnées par le MAPAQ. Lors de ces travaux, certaines modifications peuvent ainsi être apportées sur la base de l'expertise agronomique, par exemple pour les classes de sol dans lesquelles il n'y a pas assez de données pour établir une valeur par calcul. Ainsi, les grilles publiées par le MAPAQ peuvent présenter certaines différences en comparaison des résultats de l'IRDA. Au total, jusqu'à 37 grilles (azote, phosphore et potassium) pourront être produites sur la base de travaux de l'IRDA couvrant les cultures de la carotte, du pois, du haricot, du blé, de l'avoine, de l'orge, de la betterave, de l'oignon espagnol, du cornichon (azote seulement), des prairies de graminées et de légumineuses, de la citrouille et du rutabaga en sol minéral. À celles-ci pourront s'ajouter 7 grilles (azote, phosphore et potassium) traitant de l'oignon vert, du radis et de l'oignon jaune sec (potassium seulement) en sol organique. Ces grilles fourniront aux producteurs et aux agronomes québécois un nouvel outil permettant de mieux concilier la productivité et la conservation des ressources. Les documents présentant les grilles officielles sont disponibles sur le site web du MAPAQ.

Les intervenants qui souhaitent consulter les rapports scientifiques (fascicules) sur lesquels s'appuient les grilles MAPAQ sont invités à consulter la fiche de la chercheuse Christine Landry sur le site web de l'IRDA, où se retrouve l'ensemble des publications, à cette adresse : <https://irda.qc.ca/fr/publications/?r=1745&t=1411#documents>

## Note au lecteur

Ce document présente les résultats scientifiques d'essais de fertilisation. La grille officielle publiée par le MAPAQ fait l'objet d'une publication séparée. Celle-ci peut différer des valeurs scientifiques de référence en fertilisation obtenues par l'IRDA et présentées dans ce document en raison de la prise en compte de considérations agronomiques ou techniques autres lors des travaux conjoints entre l'IRDA et le Comité scientifique, sous la coordination du MAPAQ.

# Table des matières

1	Présentation générale des essais et des analyses .....	9
1.1	Provenance des données.....	9
1.2	Localisation des sites .....	9
1.3	Propriétés physico-chimiques des sols .....	10
1.4	Dispositifs expérimentaux et traitements .....	11
1.4.1	Dispositifs.....	11
1.4.2	Traitements.....	12
1.5	Rendements.....	16
1.6	Composition botanique .....	17
1.7	Calculs et analyses statistiques .....	18
1.7.1	Calculs des degrés-jours .....	18
1.7.2	Classification des prairies et détermination des classes de fertilité de sols .....	19
1.7.3	Détermination des doses optimales de fertilisants .....	19
1.7.4	Diagnostic nutritionnel, quantités d'éléments nutritifs exportés et qualité des prairies .....	22
2	Fertilisation azotée .....	23
2.1	Portrait et représentativité des données.....	23
2.2	Détermination des groupes de prairies .....	24
2.3	Détermination des doses agronomiques optimales.....	25
2.3.1	Recherche d'indicateurs de potentiel de rendement et de fertilité du sol .....	25
2.3.2	Effet de la dose d'azote sur le rendement .....	26
2.3.3	Diagnostic nutritionnel et exportations en azote .....	31
2.3.4	Nitrate résiduel après la dernière coupe .....	33
2.3.5	Les risques d'intoxication au nitrate dans les fourrages .....	34
2.4	Fertilisation azotée proposée et comparaison avec les recommandations au Canada et à l'étranger .....	35
3	Fertilisation phosphatée .....	43
3.1	Portrait et représentativité des données.....	43
3.2	Détermination des doses agronomiques optimales.....	44
3.2.1	Recherche d'indicateurs de fertilité du sol .....	44
3.2.2	Effet de la dose de phosphore sur le rendement .....	45
3.2.3	Diagnostic nutritionnel et exportations en phosphore .....	47
3.2.4	Fertilisation phosphatée proposée et comparaison avec les recommandations au Canada et à l'étranger .....	49
4	Fertilisation potassique .....	55
4.1	Portrait et représentativité des données.....	55
4.2	Détermination des doses agronomiques optimales.....	56
4.2.1	Recherche d'indicateurs de fertilité du sol .....	56
4.2.2	Effet de la dose de potassium sur le rendement .....	56
4.2.3	Interaction N et K chez les graminées.....	58
4.2.4	Cas particulier : fourrage destiné à l'alimentation des vaches en période de transition .....	62
4.2.5	Effets de la dose sur la survie à l'hiver.....	63
4.2.6	Diagnostic nutritionnel et exportations.....	64
4.2.7	Fertilisation potassique proposée et comparaison avec les recommandations au Canada et à l'étranger .....	67

5	Fertilisation soufrée.....	73
5.1	Portrait et représentativité des données d'analyse de sol .....	73
5.2	Statistiques descriptives des analyses de la biomasse .....	74
5.3	Effet de la dose de soufre sur la nutrition et les rendements .....	74
5.3.1	Effet de la dose de soufre sur la teneur en S des tissus.....	74
5.3.2	Effet de la dose de soufre sur la teneur en protéines brutes .....	75
5.3.3	Effet de la dose de soufre sur le rendement en matière sèche .....	76
5.4	Diagnostic nutritionnel et exportations en soufre.....	77
5.5	Fertilisation soufrée proposée en cas de carence chez les légumineuses .....	79
6	Autres éléments nutritifs importants (Ca, Mg, B, Mo).....	80
6.1	Bore (B) .....	80
6.2	Calcium (Ca) et magnésium (Mg) .....	80
6.3	Exportations.....	81
7	Impact de la fertilisation des prairies sur la valeur nutritive des fourrages .....	83
7.1	Introduction.....	83
7.2	Azote (N).....	84
7.2.1	Effet sur la teneur en protéine brute .....	84
7.2.2	Effet sur le risque d'accumulation de nitrates .....	87
7.2.3	Effet sur la teneur en fibres aNDFom et sa digestibilité ruminale .....	88
7.2.4	Effet sur la teneur en glucides non fibreux (GNF).....	88
7.2.5	Effet sur la valeur énergétique.....	89
7.3	Phosphore (P) .....	90
7.3.1	Effet sur la teneur en P .....	90
7.3.2	Autres paramètres mesurés .....	90
7.4	Potassium (K) .....	90
7.4.1	Effet sur la teneur en K et la différence alimentaire cations anions (DACA).....	90
7.4.2	Effet sur la qualité des fibres aNDFom.....	91
7.4.3	Effet sur la teneur en glucides non fibreux (GNF).....	92
7.4.4	Effet sur la teneur en gras brut (extrait à l'éther) .....	92
7.4.5	Effet sur la teneur en cendres.....	93
7.4.6	Effet sur la valeur énergétique.....	93
7.4.7	Effet sur les minéraux autres que le potassium.....	93
7.5	Soufre (S) .....	94
7.5.1	Effet sur la teneur en protéine brute et en soufre.....	94
7.6	Conclusion et recommandations.....	97
7.7	Autres éléments fertilisants non évalués dans les essais .....	98
7.7.1	Fertilisation en bore (B) de la luzerne pour optimiser le rendement et la qualité.....	98
7.7.2	Fertilisation en chlore (Cl) pour diminuer la différence alimentaire cation anion (DACA) des fourrages destinés aux vaches en transition .....	98
8	Conclusion .....	99
9	Remerciements.....	100
10	Prairies en production – valeurs scientifiques de référence en fertilisation .....	101
11	Références .....	104

## Liste des tableaux

Tableau 1. Dates de récolte pour chaque coupe en fonction de la composition de la prairie, la région et la coupe .....	12
Tableau 2. Stade de développement visé pour chaque coupe en fonction de la composition de la prairie.....	12
Tableau 3. Description des traitements des essais de fertilisation azotée dans les essais du PSEF .....	13
Tableau 4. Description des traitements des essais de fertilisation azotée supplémentaires pour les prairies de graminées .....	13
Tableau 5. Description des traitements des essais de fertilisation phosphatée du PSEF et supplémentaires pour les prairies de graminées, mixtes et de légumineuses .....	14
Tableau 6. Description des traitements des essais de fertilisation potassique du PSEF et supplémentaires pour les prairies de graminées, mixtes et de légumineuses .....	15
Tableau 7. Description des traitements des essais de fertilisation soufrée du PSEF pour tous les types de prairies. ....	15
Tableau 8. Statistiques descriptives sur l'ensemble des données validées de rendements des prairies dans les essais N, P et K.....	17
Tableau 9. Répartition des blocs des essais N des prairies pour différentes classes de propriétés de sol.....	23
Tableau 10. Valeur critique du pourcentage de légumineuses selon le test de Cate-Nelson pour les essais N de prairies.....	24
Tableau 11. Valeurs critiques des indicateurs de sol significatifs selon les tests de Cate-Nelson pour les essais N de prairies.....	26
Tableau 12. Résultats du modèle exponentiel asymptotique sur la réponse des prairies de graminées et de légumineuses aux doses croissantes de N.....	27
Tableau 13. Doses optimales de N à 90, 92, 95 et 99 % du ROM <sub>max</sub> .....	29
Tableau 14. Rendements et rapports de rendement (ROM) modélisés suivant les doses optimales de N moyennes à 90, 92, 95 et 99 % du ROM <sub>max</sub> .....	29
Tableau 15. Réponse des prairies de graminées et de légumineuses aux doses croissantes de N .....	31
Tableau 16. Concentrations et exportations en N des prairies de graminées et de légumineuses selon le diagnostic nutritionnel .....	32
Tableau 17. Fertilisation azotée des prairies en production – Valeurs scientifiques de référence en fertilisation ..	39
Tableau 18. Fertilisation azotée des prairies en production – VSRF basées sur les résultats du modèle à 90 % du ROM <sub>max</sub> .....	41
Tableau 19. Comparaison des recommandations en N pour les prairies en production au Canada et aux États-Unis .....	41
Tableau 20. Répartition des blocs des essais P des prairies en production selon différentes classes de propriétés de sol après la validation des données.....	44
Tableau 21. Valeurs critiques des indicateurs potentiels de sols significatifs selon les tests de Cate-Nelson pour les essais P de prairies.....	45
Tableau 22. Résultats des régressions sur la réponse des prairies de graminées et de légumineuses aux doses croissantes de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> .....	46
Tableau 23. Concentrations et exportations en P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> des prairies de graminées et de légumineuses selon le diagnostic nutritionnel .....	48
Tableau 24. Fertilisation phosphatée des prairies en production – Valeurs scientifiques de référence en fertilisation.....	52

Tableau 25. Comparaison des recommandations en $P_2O_5$ pour les prairies en production au Canada et aux États-Unis.....	53
Tableau 26. Répartition des blocs des essais K des prairies en production selon différentes classes de propriétés de sol après la validation des données.....	55
Tableau 27. Valeurs critiques des indicateurs potentiels de sols significatifs selon les tests de Cate-Nelson pour les essais K de prairies.....	56
Tableau 28. Résultats des régressions sur la réponse des prairies de graminées et de légumineuses aux doses croissantes de $K_2O$ .....	58
Tableau 29. Valeur critique du ratio N:K selon le test de Cate-Nelson pour les essais K des prairies de graminées.....	59
Tableau 30. Résultats des régressions sur la réponse des prairies de graminées ayant un ratio N:K $\geq 0,852$ aux doses croissantes de $K_2O$ .....	62
Tableau 31. Résultats des régressions linéaires sur la teneur en K (% MS) de la biomasse aux doses croissantes de $K_2O$ dans les prairies de graminées.....	63
Tableau 32. Analyses descriptives pour les prairies de légumineuses du taux de survie à l'hiver et de la teneur en K des biomasses récoltées selon différentes classes de teneurs en $K_{M3}$ du sol.....	64
Tableau 33. Concentrations et exportations en $K_2O$ des prairies de graminées et de légumineuses selon le diagnostic nutritionnel.....	66
Tableau 34. Fertilisation potassique des prairies en production – Valeurs scientifiques de référence en fertilisation.....	69
Tableau 35. Comparaison des recommandations en $K_2O$ pour la production des prairies en production au Canada et aux États-Unis.....	70
Tableau 36. Répartition des blocs pour l'analyse de S des prairies en production selon différentes classes de propriétés de sol après la validation des données.....	73
Tableau 37. Statistiques descriptives de la teneur en S et du rapport N:S dans la biomasse pour les différents types de prairies en production en fonction des traitements appliqués.....	74
Tableau 38. Résultats de la modélisation de la teneur en S dans la biomasse en fonction des types de prairies et de la dose de S appliquée.....	75
Tableau 39. Résultats de la modélisation de la teneur en protéine brute dans la biomasse en fonction des types de prairies et de la dose de S appliquée.....	76
Tableau 40. Impact de l'apport de S sur le rendement en fonction des types de prairies.....	77
Tableau 41. Impact de l'apport de S selon le statut de carence en S des plants sur le rendement des prairies de légumineuses.....	77
Tableau 42. Concentrations et exportations en S des prairies de légumineuses selon le diagnostic nutritionnel.....	78
Tableau 43. Concentrations et exportations en Ca et Mg des prairies de graminées et de légumineuses selon le diagnostic nutritionnel.....	82
Tableau 44. Liste des paramètres évalués lors de l'analyse de l'impact de la fertilisation sur la valeur nutritive des fourrages.....	84
Tableau 45. Indice de nutrition azotée (INA; %) pour la saison des mélanges à base de graminées lorsque les VSRF sont suivies.....	87



## Liste des figures

Figure 1. Répartition géographique des sites. ....	10
Figure 2. Distribution des blocs des essais dans le triangle des textures. ....	11
Figure 3. Valeur critique de légumineuses (%) dans la composition botanique des essais N de prairies selon le test de Cate-Nelson (1971). ....	24
Figure 4. Carte des zones de réponse à l'azote des cultures fourragères, degrés-jours en base 0 °C. ....	25
Figure 5. Rendements estimés par le modèle en fonction des doses croissantes d'azote, selon les zones de degrés-jours (colonnes) et le pourcentage de légumineuses (lignes). ....	28
Figure 6. Exportations en azote des prairies de graminées (A) et de légumineuses (B) en fonction des rendements totaux de la saison stabilisés à 6-8% d'humidité, selon le diagnostic nutritionnel. ....	33
Figure 7. Indices nitrate des traitements d'azote des prairies de graminées (à gauche) et de légumineuses (à droite) aux profondeurs 0-30 et 30-60 cm, après la dernière récolte. ....	34
Figure 8. Exportations de phosphore des prairies de graminées (A) et de légumineuses (B) en fonction des rendements de la saison stabilisés à 6-8% d'humidité, selon le diagnostic nutritionnel. ....	49
Figure 9. Valeur critique du ratio N:K des essais K de prairies de graminées selon le test de Cate-Nelson (1971). ....	59
Figure 10. ROM de la saison en fonction du ratio N:K de la biomasse de récolte et des groupes de doses dans les essais N des prairies de graminées. ....	60
Figure 11. ROM de la saison en fonction du ratio N:K de la biomasse de récolte et de la dose de K <sub>2</sub> O dans les essais K des prairies de graminées. ....	61
Figure 12. Variation de la survie à l'hiver en fonction de la dose de K appliquée dans les prairies avec 60 % et plus de légumineuses. ....	64
Figure 13. Exportations en potassium des prairies de graminées (A) et de légumineuses (B) en fonction des rendements de la saison stabilisés à 6-8% d'humidité, selon le diagnostic nutritionnel. ....	66
Figure 14. Effet relatif au traitement témoin de la dose d'azote (kg N/ha) sur la teneur en protéine brute (% MS) de différents mélanges fourragers. ....	86
Figure 15. Effet d'une application de soufre (25 kg S/ha) sur la moyenne pondérée par coupe de la teneur en soufre (% MS) de différents mélanges fourragers. ....	95
Figure 16. Effet d'une application de soufre (25 kg S/ha) sur la moyenne pondérée par coupe de la teneur en protéine brute (% MS) de différents mélanges fourragers. ....	96

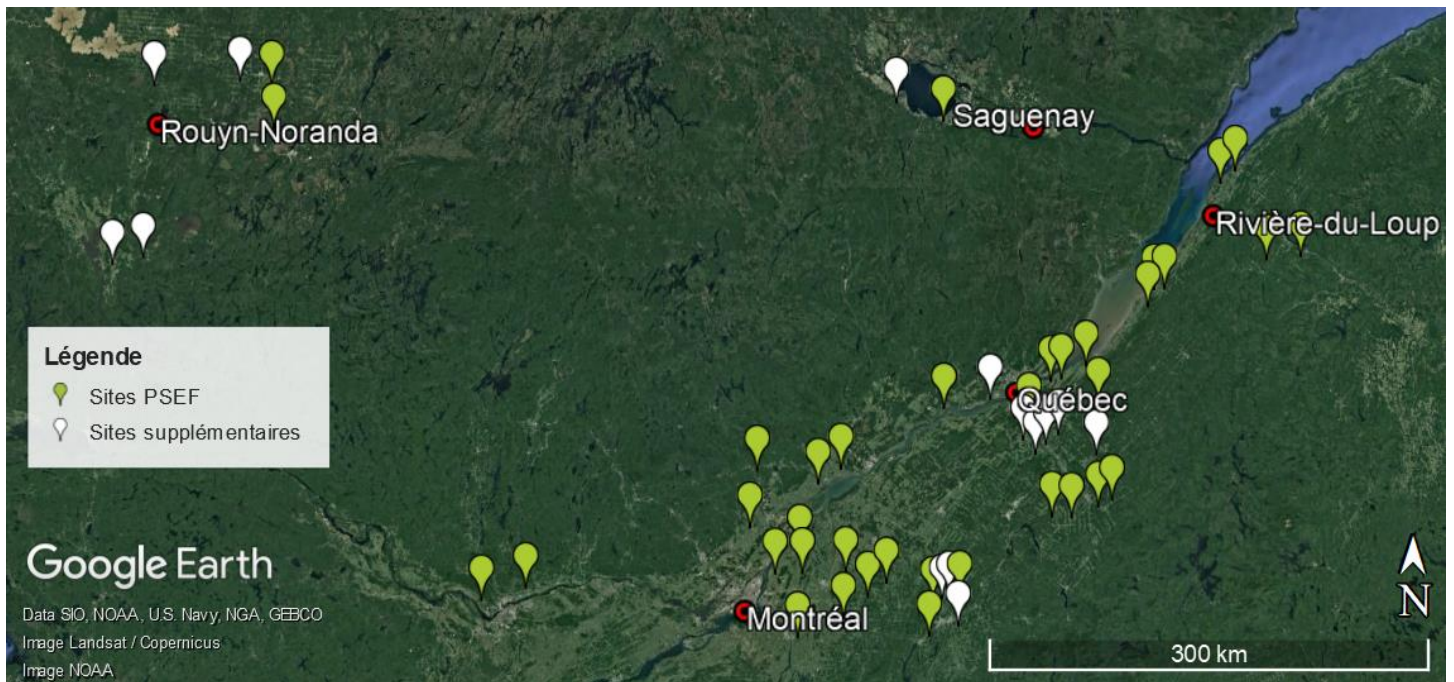
# 1 PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES ESSAIS ET DES ANALYSES

## 1.1 Provenance des données

Dans le cadre du MIRVRF (Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation), la détermination des classes de fertilité de sols et des valeurs scientifiques de référence en fertilisation (VSRF) des prairies de graminées, mixtes et de légumineuses ont été déterminées à partir des données d'essais de fertilisation réalisés entre les années 2013 et 2019 dans le *Programme de soutien aux essais de fertilisation* (PSEF). Ces données ont été bonifiées par l'ajout de données supplémentaires provenant de deux équipes de recherche d'Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC) et dont les essais ont eu lieu au cours des années 1994, 1999, 2010 et 2016-2018 au Québec. Pour l'ensemble du jeu de données, les essais de fertilisation devaient satisfaire aux critères suivants : la randomisation et la répétition des traitements, l'inclusion d'un témoin sans apport de l'élément testé (ex.  $0\ N + PK$  pour un essai d'azote), l'apport aux doses recommandées des éléments complémentaires (ex.  $0\ N + PK$  pour un essai d'azote) et l'utilisation exclusive d'engrais minéraux. De plus, les prairies devaient être en production depuis 1 à 4 ans et n'avoir reçu aucune application de chaux, d'engrais organiques ou de matières résiduelles fertilisantes après le 1<sup>er</sup> août de l'année précédant l'implantation de l'essai. Les sites de prairies de graminées devaient présenter un recouvrement de 60 % et plus de graminées, tandis que ceux de légumineuses devaient présenter un recouvrement de 60 % et plus de luzerne. Les prairies dites de graminées ont été majoritairement composées de fléole des prés et en faible proportion de brome, dactyle, féтуque, pâturin et de ray-grass vivace. Quant aux prairies de légumineuses, la grande majorité était à prédominance de luzerne, pure ou en mélange, et en moindres mesures du trèfle rouge, du trèfle alsike, du trèfle blanc hollandais et du trèfle blanc ladino. Les sections qui suivent traitent des données validées suivant le processus d'analyse exploratoire et à partir desquelles sont calculées les VSRF.

## 1.2 Localisation des sites

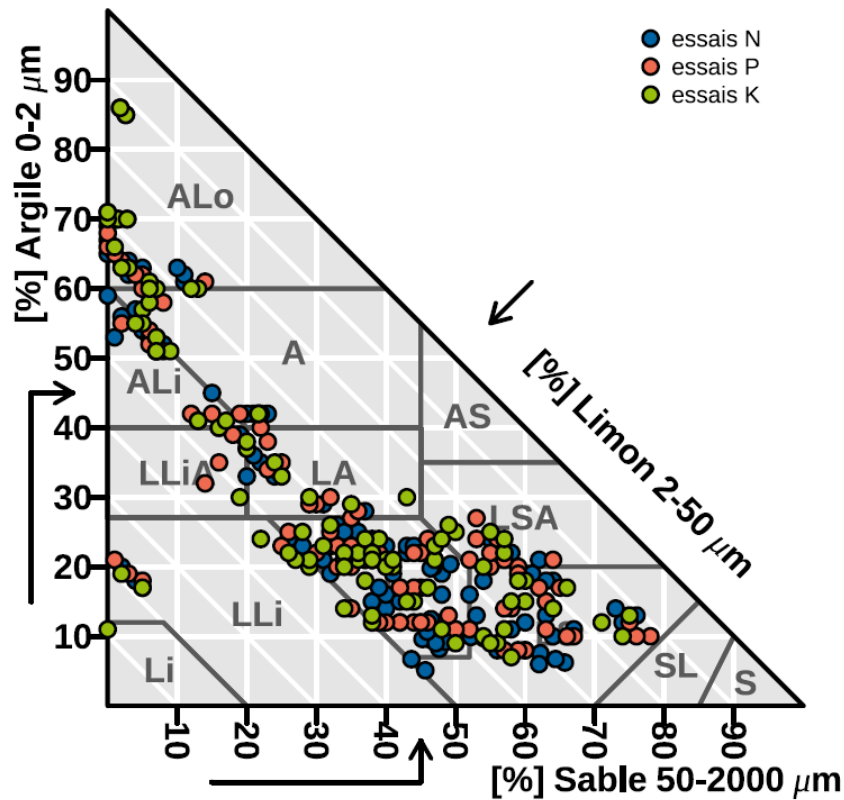
Les essais de prairies ont couvert un large éventail de régions administratives (Figure 1). Dans le cadre du PSEF, les essais ont été réalisés dans les régions du Bas-Saint-Laurent et de la Montérégie, de la Chaudière-Appalaches, de l'Estrie, de Lanaudière, de la Mauricie, de l'Outaouais et de l'Abitibi-Témiscamingue, du Saguenay-Lac-Saint-Jean et de la Capitale-Nationale. En ce qui concerne les données supplémentaires, les essais ont été réalisés en Chaudière-Appalaches, en Abitibi-Témiscamingue, au Saguenay-Lac-Saint-Jean, en Estrie et dans la Capitale-Nationale. Cette répartition correspond globalement à la répartition des superficies ensemencées en foin et cultivées au Québec dans les différentes régions selon l'Institut de la statistique du Québec pour 2020 à 2022.



**Figure 1.** Répartition géographique des sites. L'emplacement des repères est approximatif et vise seulement à représenter la répartition géographique des sites sur le territoire du Québec. PSEF : Programme de soutien aux essais de fertilisation.

### 1.3 Propriétés physico-chimiques des sols

Dans les essais du PSEF, les analyses physico-chimiques du sol (0-20 cm excepté pour la teneur en  $N-NO_3$ , 0-30 cm) ont été effectuées par bloc afin de déterminer des indicateurs de fertilité. Plusieurs paramètres physico-chimiques ont été mesurés, soit le  $pH_{eau}$ , la teneur en matière organique (méthode par perte au feu,  $MO_{PAF}$ ), la teneur en éléments nutritifs extractibles au Mehlich-3, la masse volumique apparente, la granulométrie, la distribution des agrégats stables à l'eau et la teneur en  $N-NO_3$  (0-30 cm) au semis. De plus, pour chaque site, une analyse des profils de sol a été réalisée par l'équipe des pédologues de l'IRDA, laquelle a servi à identifier les séries de sols et leurs particularités pédologiques, à valider le groupe de textures et à prendre en considération l'état de santé du sol lors de l'analyse exploratoire. Dans l'ensemble des essais (PSEF et sites supplémentaires), les essais ont été menés sur sols de textures variées avec 44 % des sols ayant une texture fine (G1), 37 % de texture moyenne (G2) et 19 % de texture grossière (G3) (Figure 2). Dans la suite du document, la description de certaines caractéristiques physico-chimiques des sites sera présentée plus en détail dans les chapitres sur l'azote (p. 23), le phosphore (p. 43), le potassium (p. 55) et le soufre (p. 73).



**Figure 2.** Distribution des blocs des essais dans le triangle des textures. ALo : Argile lourde; ALi : Argile limoneuse; A : Argile; LLiA : Loam limono-argileux; LA : Loam argileux; AS : Argile sableuse; L : Loam; Li : Limon; LLi : Loam limoneux; LSA : Loam sablo-argileux; LS : Loam sableux; SL : Sable loameux; S : Sable. Les sols G1 rassemblent les sols argileux : ALo, ALi, A, LLiA, LA, AS. Les G3 représentent les sols sableux : S, SL, LS. Les G2 regroupent les textures intermédiaires : L, Li, LLi, LSA.

## 1.4 Dispositifs expérimentaux et traitements

### 1.4.1 Dispositifs

Les essais de fertilisation N, P, K et S des prairies ont été menés en plein champ. Plusieurs doses de N, de  $P_2O_5$ , de  $K_2O$ , ainsi qu'une dose de S, ont été testées. Les sites ont été établis chez des producteurs agricoles ou sur des fermes expérimentales et ont été entretenus selon une régie de production conventionnelle.

Dans tous les essais du PSEF, les traitements (doses d'engrais testées) étaient disposés selon un plan en trois blocs complètement aléatoires. Les unités expérimentales mesuraient 6 m par 2 m. Dans les essais supplémentaires, les traitements étaient disposés selon un plan en blocs complètement aléatoires ou un plan en tiroirs. Les traitements étaient répétés de trois à cinq fois selon l'essai. Ces essais supplémentaires ont tous été établis sur des prairies à forte proportion de graminées, composées majoritairement de fléole des prés ou de dactyle. Les essais de prairie de graminées ont duré de 70 à 98 jours pour les régies à 2 coupes (différence entre la date de la 1<sup>re</sup> application d'engrais au printemps et la date de la dernière récolte) et de 112 à 158 jours pour les régies à 3 coupes. Les essais de prairie de légumineuses ont, quant à eux, duré 67 jours (régie à 2 coupes), 91 à 139 jours (3 coupes) et de 113 à 164 jours (4 coupes). Les dates et la durée de l'essai ont varié en fonction du nombre de coupes et de la durée entre celles-ci, lesquelles ont varié selon les régions (Tableau 1), les espèces végétales et la régie des producteurs. Les récoltes ont été effectuées selon les stades de développement visés, présentés au Tableau 2.

**Tableau 1.** Dates de récolte pour chaque coupe en fonction de la composition de la prairie, la région et la coupe

Zone de DJ <sub>0</sub>	Prairies de graminées			Prairies mixtes			Prairies de légumineuses		
	< 2450	2450-2850	> 2850	< 2450	2450-2850	> 2850	< 2450	2450-2850	> 2850
Nb sites	N : 7 PK : 6	N : 18 PK : 11	NPK: 4	NPK : 2	NPK : 0	NPK : 1	NPK : 0	NP : 9 K : 8	NPK: 5
Nb coupes	2-3	2 - 3	2 - 3	3	-	3	-	3 - 4	3 - 4
1 <sup>re</sup> coupe	9 - 26 juin	31 mai - 23 juin	2 - 10 juin	15-21 juin	-	6 juin	-	7 juin – 3 juil.	29 mai - 17 juin
2 <sup>e</sup> coupe	2 août - 10 sept.	17 juil. - 29 août	16 - 23 juil.	25-29 juil.	-	14 juil.	-	6 juil. - 10 août	11 - 27 juil.
3 <sup>e</sup> coupe	4 -17 sept.	1 sep - 20 oct.	30 août - 18 sept.	1-13 sept.	-	1 sept.	-	7 août - 15 oct.	11 août - 17 sept.
4 <sup>e</sup> coupe	-	-	-	-	-	-	-	12 oct.	15 sept.

**Tableau 2.** Stade de développement visé pour chaque coupe en fonction de la composition de la prairie

Composition de la prairie <sup>(1)</sup>	Stade visé		Nombre de coupes visé
	1 <sup>re</sup> coupe	2 <sup>e</sup> coupe et coupes subséquentes	
Prairies de 60 % et plus graminées à dominance de fléole des prés ou de brome	Début épiaison (10 %) (#45-52 Zadoks) à fin épiaison (#54-58 Zadoks)	6 à 8 semaines après la dernière coupe selon le taux de regain.	≥ 2
Prairies de 60 % et plus graminées à dominance de fétuque ou de dactyle	Stade gonflement (#45 Zadoks), avant début épiaison	6 à 8 semaines après la dernière coupe selon le taux de regain.	≥ 2
Prairies 60 % et plus de légumineuses	Fin bouton – début floraison (25 % en fleur)	Dès l'apparition des fleurs.	≥ 3

(1) Parmi les 3 sites de prairies mixtes, 2 étaient gérés comme les sites dits de légumineuses et 1 comme les sites dits de graminées.

#### 1.4.2 Traitements

Dans les essais du PSEF, les courbes de doses de N testées ont varié selon le type de prairies, c'est-à-dire selon les familles de plantes fourragères dominant la composition botanique (graminées ou légumineuses). Pour les essais K, les doses testées ont également varié selon la classe de fertilité potassique des sols, définie selon leurs teneurs en K<sub>M3</sub>. Deux courbes de doses K différentes ont donc été testées. Dans le cas des essais P, la courbe de doses testée était la même, quel que soit le type de prairies ou le contenu en P du sol. Enfin, pour tous les essais, tel que mentionné précédemment, seul l'élément testé variait. Ainsi, les autres éléments nutritifs majeurs étant fixés au troisième niveau de traitement de chaque élément afin qu'ils ne soient pas limitants. Selon la quantité d'engrais à apporter pour atteindre la dose testée, ceux-ci étaient appliqués à la volée en un ou deux apports, soit au printemps et après la 1<sup>re</sup> coupe. Dans le cas des essais supplémentaires réalisés par les équipes d'AAC, les doses testées variaient largement selon le site, l'année de réalisation de l'essai et l'équipe de recherche. Tel qu'effectué dans le PSEF, dans ces essais, les éléments majeurs autres que celui à l'étude ont été apportés à des niveaux non limitants afin de favoriser une bonne croissance des plantes.

### 1.4.2.1 Doses d'azote

Dans le cadre du PSEF (Tableau 3), cinq doses de N ont été testées. Pour les prairies de légumineuses, les doses variaient entre 0 et 100 kg/ha. Pour les prairies de graminées, les doses variaient de 0 à 200 kg/ha. Les engrais étaient apportés sous forme de nitrate d'ammonium calcique (27-0-0), en un ou deux apports selon la dose à atteindre.

**Tableau 3.** Description des traitements des essais de fertilisation azotée dans les essais du PSEF

Essais N				Dose de N (kg/ha)				
Prairie <sup>(1)</sup>	Années	Nb sites	Mode et période d'application	T1	T2	T3	T4	T5
60 % de légumineuses et plus	2013-2019	16	À la volée au printemps	0	25	50	50	50
			À la volée après la première coupe	0	0	0	25	50
			Apport total	0	25	50	75	100
60 % de graminées et plus	2013-2019	18	À la volée au printemps	0	50	50	75	100
			À la volée après la première coupe	0	0	50	75	100
			Apport total	0	50	100	150	200

(1) Parmi les 3 sites de prairies mixtes, 2 étaient gérés comme les sites dit de légumineuses et 1 comme les sites dit de graminées.

Dans le cas des données supplémentaires (Tableau 4), les engrais étaient également apportés sous forme de nitrate d'ammonium calcique (27-0-0). Les doses retenues pour la présente analyse ont varié entre 0 et 275 kg/ha, selon le site. L'essai réalisé en 1999 consistait en une expérience factorielle (4 doses de N, 4 doses de P, 4 stades de récolte) où les traitements azotés correspondaient à 4 doses de N variant de 0 à 180 kg/ha (Tableau 4) à différentes doses de P et différentes dates de récolte, espacées d'une semaine.

**Tableau 4.** Description des traitements des essais supplémentaires de fertilisation azotée pour les prairies de graminées

Essais N				Dose de N (kg/ha)						
Années	Nb sites	Mode et période d'application		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
2017 - 2018	4	À la volée au printemps		0	50	75	100	125	100	125
		À la volée après la 1 <sup>re</sup> coupe		0	50	50	50	50	75	75
		À la volée après la 2 <sup>e</sup> coupe		0	50	50	50	50	75	75
		Apport total		0	150	175	200	225	250	275
2016	3	À la volée au printemps		0	25	50	75	100	75	100
		À la volée après la 1 <sup>re</sup> coupe		0	25	25	25	25	50	50
		À la volée après la 2 <sup>e</sup> coupe		0	25	25	25	25	50	50
		Apport total		0	75	100	125	150	175	200
1999	1	À la volée au printemps		0	60	120	180	-	-	-
1994	4	À la volée au printemps		0	30	60	90	120	-	-
		À la volée après la 1 <sup>re</sup> coupe		0	30	60	90	120	-	-
		Apport total		0	60	120	180	240	-	-

### 1.4.2.2 Doses de phosphore

Dans le cadre du PSEF, les traitements des essais de fertilisation phosphatée correspondaient à cinq doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> variant entre 0 et 100 kg/ha (Tableau 5), apportées au printemps sous forme de superphosphate triple (0-46-0). Dans le cas des données supplémentaires, dans les essais de 1994, les doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> testées ont été apportées sous forme de superphosphate triple (0-46-0). Les deux essais réalisés en 2010 consistaient en des expériences factorielles (4 doses de

P et 4 dates de récolte différentes pour la coupe 1). Seules les trois dernières dates de récolte réalisées au cours du mois de juin ont été retenues pour les analyses.

**Tableau 5.** Description des traitements des essais de fertilisation phosphatée du PSEF et supplémentaires pour les prairies de graminées, mixtes et de légumineuses

Essais P				Dose de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg/ha)				
Source	Années	Nombre de sites <sup>(1)</sup>	Mode et période d'application	T8	T9	T10	T11	T12
PSEF	2013-2019	34	À la volée, au printemps	0	25	50	75	100
	2010	2	À la volée, au printemps	0	23	46	92	-
Essais supplémentaires	1994	4	À la volée au printemps	0	15	30	45	60
			À la volée après la 1 <sup>re</sup> coupe	0	15	30	45	60
			Apport total	0	30	60	90	120

(1) 17 sites de graminées, 3 sites mixtes et 14 sites de légumineuses.

#### 1.4.2.3 Doses de potassium

Dans le cadre du PSEF, les traitements des essais potassiques correspondaient à cinq doses de K<sub>2</sub>O, se situant entre 0 et 300 kg/ha (Tableau 6), apportées sous forme de muriate de potassium (0-0-60) ou de sulfate de potassium et de magnésium (0-0-22-11) lorsque du Mg était nécessaire. Les doses de K<sub>2</sub>O testée dans les essais supplémentaires de 2010 ont été apportées sous forme de muriate de K (0-0-60) (Tableau 6).



**Tableau 6.** Description des traitements des essais de fertilisation potassique du PSEF et supplémentaires pour les prairies de graminées, mixtes et de légumineuses

Essais K				Doses de K <sub>2</sub> O (kg/ha)				
Source (années)	Nb sites <sup>(1)</sup>	K <sub>M3</sub> (kg/ha)	Mode et période d'application	T13	T14	T15	T16	T17
<b>60 % de légumineuses et plus <sup>(2)</sup></b>								
PSEF (2013-2019)	4	≤ 200	À la volée au printemps	0	75	75	150	150
			À la volée après la première coupe	0	0	75	75	150
			Apport total	0	75	150	225	300
	9	> 200	À la volée au printemps	0	37,5	75	75	75
			À la volée après la première coupe	0	0	0	37,5	75
			Apport total	0	37,5	75	112,5	150
<b>60 % de graminées et plus <sup>(2)</sup></b>								
PSEF (2013-2019)	11	≤ 200	À la volée au printemps	0	50	100	100	100
			À la volée après la première coupe	0	0	0	50	100
			Apport total	0	50	100	150	200
	6	> 200	À la volée au printemps	0	25	50	75	100
			À la volée après la première coupe	0	0	0	0	0
			Apport total	0	25	50	75	100
Essais supplémentaires (1994)	4	-	À la volée au printemps	0	25	50	75	100
			À la volée après la 1 <sup>re</sup> coupe	0	25	50	75	100
			Apport total	0	50	100	150	200

(1) L'attribution des sites dans l'une ou l'autre des classes a été effectuée *a priori* des essais. Les analyses de sol *a posteriori* ont parfois révélé que la richesse supposée du site était erronée et que certains sites étaient mal classés.

(2) Parmi les 3 sites de prairies mixtes, 2 étaient gérés comme les sites dits de légumineuses et 1 comme les sites dits de graminées.

#### 1.4.2.4 Doses de soufre

L'effet de la fertilisation soufrée a été évalué uniquement dans le cadre du PSEF, à l'intérieur du dispositif des essais potassium. Au dispositif des essais K, un 6<sup>e</sup> traitement apportant 25 kg S/ha (traitement T<sub>S</sub> avec N, P et K aux 3<sup>e</sup> niveaux de doses, Tableau 7) a été aléatoirement distribué à l'intérieur de chaque bloc. Ainsi, pour les analyses, cette dose unique de 25 kg S/ha de l'essai K a pu être comparée à toutes les parcelles des essais N, P et K du 3<sup>e</sup> niveau de doses identifiées comme étant la dose 0 kg S/ha (T<sub>0</sub>).

**Tableau 7.** Description des traitements des essais de fertilisation soufrée du PSEF pour tous les types de prairies.

Essais S					
Dose de S (kg/ha)	Années	Nb de sites <sup>(1)</sup>	Nb de traitements par site	Essais (Traitements)	Mode et période d'application
0	2013-2019	34	3	N (T3), P (T10) et K (T5) K (T18)	À la volée, au printemps
25			1		

(1) 17 sites de graminées, 3 sites mixtes et 14 sites de légumineuses.



## 1.5 Rendements

Lorsque possible, la récolte des parcelles a été faite à l'aide d'une minifourragère en suivant les stades de récolte indiqués au Tableau 2. La zone de récolte a d'abord été découpée à chacune des extrémités des parcelles, la longueur de la zone de récolte a été mesurée, puis le centre de chacune des parcelles a été récolté sur la largeur de la minifourragère. La hauteur de fauche était de 5 à 7 cm du sol, tandis que la coupe faite en octobre a été faite à 8 cm. Lorsqu'aucune minifourragère n'était disponible, la récolte s'est effectuée avec une cisaille à gazon ou un sécateur, dans trois quadrats de 1 m par 1 m, suivant les mêmes indications de stade et de hauteur de fauche qu'avec la minifourragère. La biomasse de récolte a été pesée par parcelle et a subi deux séchages. Le premier séchage a été effectué à 55 °C le plus rapidement possible après l'échantillonnage afin de prévenir que les échantillons ne chauffent. Une fois séchés, les échantillons de biomasse ayant reçu le même traitement ont été regroupés pour former un composite puis envoyés au laboratoire de Valacta pour un deuxième séchage et l'analyse de la qualité fourragère.

Les rendements par coupe ont été calculés en rapportant la masse stabilisée à 55 °C (6-8 % d'humidité) en kilogramme à l'hectare (kg/ha) par la règle de trois. Les rendements par saison sont la somme des rendements de toutes les coupes. Dans le cas où un rendement d'une coupe était manquant, le rendement de la saison a été défini manquant et ne faisait donc pas partie des analyses.

Les statistiques descriptives sur les rendements par coupe et totaux des prairies sont présentées au Tableau 8. Les données sont présentées selon la nouvelle classification des types de prairies réalisée dans le cadre de la présente étude. Les rendements totaux étaient variables selon les essais, les traitements, la durée de l'essai et le nombre de coupes. En moyenne, les rendements sont plus élevés dans les prairies de légumineuses en comparaison aux prairies de graminées. Pour un même type de prairies, les rendements moyens et les variations de rendements ont été variables entre les trois essais N, P et K.

**Tableau 8.** Statistiques descriptives sur l'ensemble des données validées de rendements dans les essais N, P et K

	Essai	Nb <sub>obs</sub> <sup>1</sup>	Moyenne	Minimum	Maximum
----- (kg/ha) -----					
<b>Prairies de graminées (≤ 30 % de légumineuses)</b>					
Coupe 1	N	470	3 921	710	10 830
	P	380	3 134	952	7 546
	K	290	2 933	1 023	7 448
Coupe 2	N	470	3 372	520	12 163
	P	380	2 978	572	7 173
	K	290	3 103	1 104	7 365
Coupe 3	N	238	3 073	389	10 184
	P	89	1 620	304	2 860
	K	90	1 520	189	3 125
Rendement total	N	470	8 805	1 666	25 249
	P	380	6 473	3 560	12 839
	K	290	6 498	3 466	12 823
<b>Prairies mixtes (31 à 69 % de légumineuses)</b>					
Coupe 1	N	45	3 846	2 293	5 738
	P	44	3 946	2 599	6 021
	K	45	3 884	2 532	5 603
Coupe 2	N	45	2 717	1 260	4 328
	P	44	2 561	1 381	3 629
	K	45	2 633	1 098	3 798
Coupe 3	N	45	2 880	1 206	4 631
	P	44	2 739	1 174	4 527
	K	45	2 906	699	4 852
Rendement total	N	45	9 444	6 289	13 679
	P	44	9 246	6 295	12 655
	K	45	9 423	5 316	13 509
<b>Prairies de légumineuses (≥ 70 % de légumineuses)</b>					
Coupe 1	N	188	4 130	1 044	7 024
	P	194	4 126	1 294	6 597
	K	165	3 950	1 484	6 336
Coupe 2	N	188	3 005	1 195	5 435
	P	194	2 815	984	5 445
	K	165	2 889	738	4 807
Coupe 3	N	173	2 395	1 262	5 078
	P	179	2 392	1 080	4 280
	K	150	2 370	1 018	5 098
Coupe 4	N	59	1 201	831	1 958
	P	59	1 233	649	1 887
	K	45	1 538	956	2 492
Rendement total	N	188	9 552	4 902	14 517
	P	194	9 328	3 603	14 177
	K	165	9 255	4 507	13 504

<sup>1</sup>Nb<sub>obs</sub> : nombre d'observations.

## 1.6 Composition botanique

Dans le cadre du PSEF, l'évaluation de la composition botanique des prairies en production a été effectuée au départ de chaque essai, selon une combinaison de plusieurs méthodes et outils. D'abord, un dénombrement de la composition botanique a été effectué au moyen de trois quadrats de 1 m<sup>2</sup> (un par essai) par site, au printemps, dans l'aire du dispositif, afin de déterminer le pourcentage de graminées et de légumineuses. Ensuite, à chacune des coupes durant la saison, des échantillons de biomasse de récolte ont été prélevés par parcelle puis regroupés par traitement afin de procéder aux

analyses de la qualité fourragère, parmi lesquelles une évaluation visuelle du type de prairies a été effectuée (*grass forage; mix, mostly grass forage; mixed forage; legume forage*) de même qu'une analyse des teneurs en hémicellulose. Conformément au NASEM (2021), ces teneurs en hémicellulose ont servi à catégoriser en prairies majoritairement de graminées (< 30 % lég.; 17-22 % hémicellulose), majoritairement de légumineuses (>70 % lég.; 10-13 % hémicellulose) ou des prairies mixtes (> 13 à 17 % hémicellulose). De surcroit, deux catégories supplémentaires ont été ajoutées à celles du NASEM, soit les prairies constituées presque uniquement de graminées (>22 % d'hémicellulose) et les prairies constituées presque uniquement de légumineuses (< 13 % d'hémicellulose). La composition du mélange au semis a été consultée à titre indicatif, mais n'était pas un bon indice sur la composition botanique l'année de l'essai puisque celle-ci varie avec les années. Enfin, les photos et les commentaires des essais ont été consultés. L'ensemble de ces informations ont permis d'estimer les pourcentages de graminées et de légumineuses au 5 % près et pour l'ensemble de la saison. Il est à noter que les prairies de graminées et de légumineuses des essais ne comportaient que très peu de mauvaises herbes à feuilles larges.

Concernant les essais supplémentaires, la composition botanique a été établie selon les indications fournies par les différentes équipes de recherche (Parent et al., 1997; Bélanger et Ziadi, 2008; Messiga et al., 2014; Bélanger et al. 2016; Bélanger et al. 2017; Abdi et al.; 2019).

## 1.7 Calculs et analyses statistiques

La méthodologie employée pour le calcul des VSRF et les analyses statistiques préconisées ont varié selon l'élément à l'étude. Les méthodes d'analyses ont donc été similaires pour le P et le K dont les jeux de données comportaient principalement des essais du PSEF, mais différentes pour le N qui disposait de 46 essais (PSEF et supplémentaires) ce qui a permis de conduire des analyses plus détaillées. En absence d'un nombre suffisant de traitements pour produire des courbes de réponse, la modélisation non linéaire mixte a été utilisée pour l'évaluation de l'effet du soufre. Dans le cas de l'azote, plusieurs approches d'analyses ont été explorées afin de créer des groupes de sites homogènes, comme la méthode de classification hiérarchique de cluster (méthode de Ward) où les sites sont regroupés en utilisant les caractéristiques invariables à l'intérieur d'un site (l'âge de la prairie, le pourcentage de légumineuses, la région, les degrés-jours cumulés, le pourcentage d'argile, la texture du sol, etc.). De même, l'élaboration d'un arbre de classification basé sur le critère de croissance CHAID a également été testée, ainsi que des analyses de trajectoires. Dans la suite de cette section, seules les méthodes de calculs et d'analyses statistiques retenues seront décrites.

En complément des calculs et analyses statistiques, tout au long de la démarche d'établissement des VSRF, divers intervenants du milieu ont été contactés (ex.: conseillers du MAPAQ et de Club-conseil en agroenvironnement, producteurs, professionnels de centres de recherche appliquée). Les échanges avec ces spécialistes ont permis de comparer les conditions des essais avec les pratiques culturales en vigueur afin de valider l'adéquation avec les recommandations (VSRF).

### 1.7.1 Calculs des degrés-jours

Les degrés-jours journaliers (DJ<sub>j</sub>, éq. 1) sont des indices agrométéorologiques qui fournissent une mesure cumulative de l'accumulation thermique au fil du temps. Ces indicateurs sont largement utilisés pour surveiller le développement des plantes et des ravageurs, dont la croissance dépend principalement de la température (Worner, 1992). L'accumulation des degrés-jours journaliers donne le degré-jours de croissance (DJ). Dans cette étude, la méthode de la moyenne arithmétique des températures minimales et maximales journalières a été utilisée (McMaster et Wilhelm, 1997) pour des températures de base de 0 °C et 5 °C ( $T_{base} = 0 \text{ °C}$  ou  $5 \text{ °C}$ ) entre le 1<sup>er</sup> avril et le 31 octobre.

$$DJ_j = \begin{cases} \left[ \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \right] - T_{base} & \text{si } \left[ \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \right] > T_{base} \\ 0 & \text{si } \left[ \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \right] < T_{base} \end{cases} \quad (\text{Éq. 1})$$

L'indice agroclimatique des degrés-jours a été calculé pour 48 sites d'essais. Les données climatiques maillées modélisées par les Ressources Naturelles Canada (RNC), à partir de stations météorologiques du Canada et des États-Unis pour la période de 1950 à 2017 (RNC, 2020) ont été utilisées. La méthode du lissage par plans affinés (ANUSPLIN), développée par McKenney et ses collègues (2011), a été employée pour produire ce maillage. Pour accéder aux données climatiques et calculer les degrés-jours, le logiciel de programmation Python (version 3.09) a été utilisé. La plateforme PAVICS (Ouranos et CRIM, 2018-2023) a été utilisée comme boîte à outils pour reproduire les codes nécessaires sur Python pour extraire les données climatiques de RMC. La librairie XCLIM (Logan et al., 2023) a été utilisée pour calculer les degrés-jours.

### 1.7.2 Classification des prairies et détermination des classes de fertilité de sols.

Un test de partition binaire effectué selon la méthode de Cate-Nelson (Cate et Nelson, 1971; IRDA, 2020a) a été utilisé afin de vérifier la présence de seuil permettant de délimiter les types de prairies selon le pourcentage de légumineuses (pour la détermination de la composition botanique, voir section 1.6) et l'amplitude de la réponse aux apports d'engrais azotés, phosphatés et potassiques. Par la suite, en fonction de l'élément à l'étude (N, P, K ou S), pour chacune de catégories de prairies, définies en fonction de leur pourcentage de légumineuses, la détermination des classes de fertilité des sols a été effectuée selon le même test de partition binaire. Les tests de Cate-Nelson ont été effectués en utilisant le logiciel R (RStudio Team, 2019). Ce test consiste à mettre en relation le rendement relatif de la culture (RRel, %) et l'indicateur de prédiction de la fertilité du sol (ex. la teneur en  $K_{M3}$ ). Dans le cadre de la réalisation de ce test, la valeur à l'ordonnée est fixée le plus souvent autour d'un RRel atteint de 80 % ou plus. Le niveau de signification de  $P$  a été considéré pour une valeur inférieure ou égale à 0,12. Les calculs des rendements relatifs, ainsi que les procédures de réalisation et d'interprétation des résultats du test de Cate-Nelson sont similaires à ce qui est présenté dans les précédents fascicules (Landry et al., 2021, 2022). Par la suite, à partir des seuils de réponse obtenus, plusieurs classes de fertilité ont été déterminées en utilisant la procédure de Cope et Rouse (Cope et Rouse, 1973; Benjannet et al., 2018). Le RRel est calculé par bloc, en divisant le rendement vendable du témoin ( $Rendement_{Témoin}$ ) par le rendement vendable maximal ( $Rendement_{Maximal}$ ) parmi tous les traitements du bloc, incluant le témoin (Éq. 2).

$$RRel (\%) = \frac{Rendement_{Témoin}}{Rendement_{Maximal}} \quad (\text{Éq. 2})$$

### 1.7.3 Détermination des doses optimales de fertilisants

Pour les trois éléments majeurs N, P et K, l'effet de l'apport des doses croissantes de fertilisants a été étudié en considérant le rapport de rendements (ROM, Éq. 3). L'utilisation du ROM en lieu et place du rendement permet d'éviter les biais causés par les grandes variations qui pourraient être observées entre les rendements produits en grandes surfaces en contexte de production et ceux obtenus en parcelles de recherche (Benjannet et al., 2018). Comme expliqué précédemment pour le rendement relatif, l'utilisation du ROM permet également d'atténuer les effets des sites et des conditions météorologiques annuelles sur la productivité. Le ROM est calculé pour chaque parcelle fertilisée d'un bloc, en utilisant l'équation suivante (Éq. 3) :

$$ROM = \frac{Rendement_{Fertilisé}}{Rendement_{Témoin}} \quad (\text{Éq. 3})$$

Cependant, les méthodes d'analyses pour la détermination des VRSF ont différé selon les éléments. La détermination des VRSF pour les éléments P et K a été effectuée suivant la même méthode. En revanche, la détermination des VRSF de l'azote a comporté des analyses supplémentaires. L'utilisation de procédures différentes dans le cadre des calculs s'explique principalement par le jeu de données beaucoup plus important pour le N qui a permis de considérer des aspects supplémentaires (les degrés-jour) et de détailler davantage la grille de fertilisation (classes de fertilisation plus

nombreuses). Cela a permis de mieux étudier la plus grande complexité de la réponse au N de la culture et un plus grand nombre de paramètres affectant l'effet des apports de N. Par ailleurs, l'analyse statistique de l'effet de la fertilisation soufrée a été faite selon une méthode distincte en raison de la structure des traitements qui était complètement différente des essais NPK (section 1.4.2). La dose de S a donc été définie comme une variable catégorielle à deux modalités (avec ou sans S). Du coup, l'influence de l'apport du soufre a été évaluée en analysant les contrastes entre les rendements absolus des deux modalités et en considérant comme aléatoire l'effet des sites sur la réponse.

Pour les trois éléments nutritifs majeurs testés, le calcul des VSRF s'est appuyé sur la dose agronomique optimale (DAO) et non sur la dose économique optimale (DEO). Ce choix s'appuie, entre autres, sur la très grande hétérogénéité des réalités de production, que ce soit en termes de coûts ou de valeurs de vente (ex. grande variabilité des sources de fertilisant, usage à la ferme des fourrages, ventes à l'externe) qui multiplient les facteurs à prendre en compte et qui créent une grande variation du ratio coûts/revenus. De plus, comme le contexte économique évolue dans le temps, les DÉO calculées sont sujettes à devenir désuètes. Par ailleurs, la connaissance des besoins nutritifs, et non seulement de ce qui est payant dans une certaine réalité, permet la meilleure polyvalence de la grille de fertilisation qui devient ainsi la même pour tous, tant en production biologique que conventionnelle, jumelée ou non à une production animale avec engrais de ferme à disposer. Ainsi, il est conseillé d'étudier les aspects économiques de façon complémentaire, mais distincte des recommandations agronomiques et de fournir aux producteurs des outils d'aide à la décision agroéconomique, par exemple une table de sensibilité, qui permettrait d'ajuster les apports de fertilisants d'une année à l'autre selon la source fertilisante. Dans le cadre de cette étude, l'optimisation de la dose fertilisante tient uniquement compte de la proportion du ROM maximal qui pourrait être atteinte en fonction de l'allure de la courbe de réponse. Pour les grilles P et K, les rendements suivaient des courbes linéaires et quadratiques. Par conséquent, la valeur maximale du ROM constituait un évènement possible et a donc été fixée comme objectif à atteindre dans le calcul de la dose optimale. Dans le cas du N, 95 % du ROMmax a été visé puisque les rendements suivaient une courbe asymptotique et conséquemment, par définition, la courbe n'attendra jamais 100 % du ROMmax. L'objectif de 95 % du ROMmax a été retenu parmi les scénarios testés (90 %, 95 % et 99 %) pour éviter à la fois une diminution considérable du rendement et une hausse excessive des doses pour des gains supplémentaires négligeables (voir la section 2.3.2).

En dernière étape, les VSRF ont été recoupées avec les analyses de qualité fourragère afin de s'assurer que le gain de productivité ne se faisait pas au détriment de la qualité et réciproquement, si certaines VSRF ne devaient être ajustées en cas de gain significatif de qualité sans gain significatif de biomasse.

### **Azote**

Dans le cadre de la détermination des VSRF azotée, un modèle a été construit pour estimer le rendement des prairies en fonction de la dose d'azote, des degrés-jours (base 0°C) et du pourcentage de légumineuses. Les paramètres du modèle ont été estimés avec les données d'essais effectués sur 46 sites répartis sur 8 années entre 1994 et 2019. Une grille de doses de N a ensuite été élaborée à partir du modèle. Ainsi, chaque VSRF ne repose pas uniquement sur les sites d'une même zone, mais bien sur l'information fournie par la totalité des sites, qui conditionne le modèle.

Une équation exponentielle asymptotique a été utilisée pour modéliser la réponse des prairies à l'apport de doses croissantes de N. Pour ce faire, il a été supposé que le rendement ( $rdt$ ) augmente avec la dose de N appliquée ( $x_N$ ) et approche une asymptote ( $rdt_{max}$ ). Un champ a aussi un rendement minimum ( $rdt_{min}$ ) lorsqu'aucun engrais n'est ajouté. Cette relation de base est définie par l'équation suivante :

$$rdt = rdt_{min} + (rdt_{max} - rdt_{min}) \times (1 - e^{-\beta_N x_N}) \quad (\text{Éq. 4})$$

Le rendement minimum est en fonction du pourcentage de légumineuses puisque le rendement des graminées et des légumineuses peut différer.

$$rdt_{min} = \beta_0 + \beta_1 x_{lég} \quad (\text{Éq. 5})$$

La réponse au rendement est modifiée par les degrés-jours (fonction exponentielle à partir de 2000 DJ<sub>0</sub>) et par le pourcentage de légumineuses (fonction logistique).

$$(1 - e^{-\beta_{DJ_0}(x_{DJ_0}-2000)}) \quad (\text{Éq. 6})$$

$$(1 - e^{-\beta_{lég}(1+x_{lég})})^{\beta_{2lég}} \quad (\text{Éq. 7})$$

Les paramètres du modèle ont été estimés avec une approche bayésienne avec des distributions *a priori* informatives pour éviter les valeurs invraisemblables. Un algorithme *MCMC* adaptatif (*no-U-turn sampler*) implémenté dans Stan (version 2.26.1) et la librairie R (brms version 2.18) a été utilisé avec six chaînes de 3 334 itérations pour obtenir 20 000 itérations (10 000 retenues). Les chaînes et les distributions postérieures ont été inspectées pour vérifier la convergence. Le modèle a été utilisé pour estimer le rendement pour toutes les combinaisons de doses (0-300 kg/ha, intervalles de 5), degrés-jours (2200 – 3200, intervalles de 100), et pourcentage de légumineuses (0-100 %, intervalles de 1). Une analyse de regroupement (*k-means clustering*) a été utilisée pour définir trois groupes de degrés-jours selon les doses à 99 % du ROM maximal (ROM<sub>max</sub>). Finalement, pour chaque groupe de degrés-jours, les doses agronomiques optimales de N ont été calculées par classe de proportion de légumineuses, lorsque l'atteinte de 90 %, 92, 95 et 99 % du rendement maximal est visée.

Plusieurs mesures ont été prises pour s'assurer que les doses recommandées soient les plus précises possible et pour éviter des résultats aberrants ou extrêmes.

- **Approche** : l'ensemble des données ont été intégrées dans un seul modèle plutôt que de faire des analyses séparées pour chaque « condition » de DJ<sub>0</sub> et %Lég. Ceci permet d'inclure l'ensemble des données pour tous les estimés. Pour des conditions où il y a peu de données, une analyse séparée produirait des résultats avec énormément d'incertitude ou même des résultats fortuits. En combinant toutes les données et en modélisant la dose N, les DJ<sub>0</sub> et %Lég en continu, le maximum de données est utilisé pour chaque estimé.
- **Choix du modèle** : Pour plusieurs des essais, les doses maximales testées étaient trop faibles, ce qui fait que le rendement augmentait encore considérablement même aux doses les plus fortes (plus de 200 kg/ha), c.-à-d. que seule la partie linéaire de la réponse était mesurée et pas le plafonnement. Dans ces cas, un modèle linéaire-plateau ne peut pas être estimé (ou le plateau serait incorrectement défini à la dose la plus forte testée). Le choix du modèle avec asymptote qui permet de forcer en quelque sorte un plateau et d'estimer un rendement maximal s'est avéré le plus judicieux dans cette situation (asymptote).
- **Données** : Les essais avec des doses élevées (≥ 300 kg N/ha) ont été effectués sur trois sites seulement. Ces doses ont donc été exclues des analyses afin d'éviter d'estimer des relations qui pourraient ne pas être généralisables.
- **Méthode d'estimation** : L'estimation des paramètres du modèle a été faite avec une approche bayésienne, ce qui a permis de limiter les résultats à des valeurs plausibles. L'estimé des paramètres est donc une combinaison entre les attentes *a priori* (avec les limites définies préalablement) et l'information contenue dans les données. Des diagnostics ont été effectués pour s'assurer que le modèle a produit des estimés fiables (convergence).
- **Calcul des grilles** : Pour le calcul des VSRF, le rendement à l'asymptote (99 % du ROM) était considéré comme le rendement maximal, à moins que ce dernier ait été atteint à des doses supérieures à 300 kg N/ha. Dans ce cas, le rendement maximal a été fixé à la dose de 300 kg/ha. Ce fut le cas pour les conditions à faible %Lég et haut DJ<sub>0</sub>. Les doses N recommandées pour ces conditions sont donc inférieures à ce que l'analyse suggère.

### **Phosphore et potassium**

Pour les essais phosphatés et potassiques, les doses optimales de fertilisants pour chacune des classes de fertilité de sol déterminées à la section 1.7.2 ont été calculées selon une approche par régression en utilisant les procédures *Nlmixed* (régressions quadratiques) ou *mixed* (régressions linéaires) de SAS® (SAS Institute Inc., 2013) et en considérant les effets des blocs et des sites comme étant aléatoires. Afin de pallier les problèmes de variabilité de la variance, les logarithmes naturels des ROM ont été utilisés lors de la réalisation des régressions. La standardisation des doses de P et de K a

également été effectuée pour pallier aux problèmes de colinéarité. Le calcul des intervalles de confiance à 95 % a permis de déterminer les bornes minimales et maximales des doses agronomiques optimales.

### **Soufre**

À partir des données validées des essais N, P et K, un modèle linéaire mixte généralisé utilisant la procédure « Template Model Builder » a été implémenté dans le logiciel R (R Core Team, 2023) via la fonction `glmmTMB` de la librairie `glmmTMB` (Brook et al., 2017) pour évaluer l'effet du soufre pour chaque type de prairies. L'algorithme utilisé est basé sur l'estimation du maximum de vraisemblance et a permis de développer des modèles d'effets aléatoires complexes. Une fois le modèle construit, l'analyse des contrastes entre les deux traitements de soufre a été réalisée avec la librairie `emmeans` (Lenth, 2023). En plus des traitements comme facteur fixe, le seuil de 0,25 % de S dans la biomasse (Haupt et al., 2015; Schulte et Kelling, 1992) a été considéré pour une analyse plus poussée pour les légumineuses connues comme ayant une meilleure réponse à la fertilisation soufrée.

#### 1.7.4 Diagnostic nutritionnel, quantités d'éléments nutritifs exportés et qualité des prairies

Le diagnostic nutritionnel a été effectué sur la base des concentrations en éléments nutritifs de la biomasse et des rendements de la première coupe et les rendements totaux de la saison. Enfin, les exportations en N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O, Ca, Mg et S ont été calculées en considérant la partie aérienne de la plante. Seuls les résultats pour la 1<sup>re</sup> coupe et le rendement total de la saison, soit la somme des rendements mesurés pour toutes les coupes, sont présentés dans le présent document.

Le taux d'humidité, les concentrations en éléments nutritifs dans les tissus et les exportations en N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O, Ca, Mg et S ont été calculés à partir d'un sous-ensemble d'individus appelé population de tête, regroupant les individus ayant présenté les rendements les plus élevés et des concentrations équilibrées entre les éléments nutritifs qui composent leurs tissus (Brown, 1945; Landry et al., 2021). Dans le cadre du calcul des VSRF, le diagnostic nutritionnel des tissus de la plante a été effectué en se basant sur la méthode du *Compositional nutrient diagnosis* (CND) développée par Parent et Dafir (1992), puis améliorée par Khiari *et al.* (2001) et Parent *et al.* (2009). Toutefois, afin d'améliorer la robustesse du calcul, la méthode de sélection de la population de référence ainsi que la méthode de calcul de la norme ont été modifiées par l'équipe IRDA (`cmdMethodRobustIrda`; IRDA, 2020b).

À partir du diagnostic nutritionnel et en considérant le rendement moyen de la population de tête, le calcul des exportations fournit de nouvelles valeurs scientifiques liées à la nutrition des prairies. En effet, le Québec ne dispose pas à ce jour de valeurs de composition des tissus et d'exportation des éléments produites sous les conditions pédoclimatiques de la province. De plus, ces valeurs sont d'une grande utilité au regard de l'évaluation des diagnostics nutritionnels et des besoins en éléments nutritifs. Celles-ci sont exploitées à maints endroits lors de l'établissement des grilles de référence en fertilisation, par exemple en France, en Grande-Bretagne, aux États-Unis, en Nouvelle-Zélande et en Allemagne (Culman et al., 2020; Defra, 2010; Metz et Nass, 2015; Reid et Morton, 2019; Sullivan et al., 2017). Près du Québec, plusieurs provinces et États américains au sud des Grands Lacs utilisent ces valeurs pour déterminer les apports de P et K, et ce tant pour les doses d'enrichissement, de maintien, que de réduction des teneurs du sol en l'élément visé (Culman et al., 2020; Munroe et al., 2017; Warncke et al., 2004). Par conséquent, dans le cadre de la détermination des VSRF, les valeurs d'exportations ont pu être utilisées en absence de données en quantité suffisante pour établir des recommandations ou justifier le choix d'une dose, particulièrement dans les classes de sol les plus pauvres.

De même que pour les essais P et K, l'effet des fertilisations azotée, phosphatée et potassique sur la qualité des prairies a été évalué selon une approche par régression en utilisant les procédures *Nlmixed* (régressions quadratiques) et *mixed* (régressions linéaires) de SAS® (SAS Institute Inc., 2013) et en considérant les blocs et les sites comme des effets aléatoires. Ces régressions ont également été effectuées en considérant les rapports des divers paramètres de qualité et en considérant les doses standardisées pour les mêmes raisons évoquées précédemment (section 1.7.3).

## 2 FERTILISATION AZOTÉE

### 2.1 Portrait et représentativité des données

Les essais de fertilisation azotée étaient composés essentiellement de prairies soit à forte proportion de graminées (30 % et moins de légumineuses), soit à forte proportion de légumineuses (70 % et plus de légumineuses), ne laissant qu'un faible nombre de prairies mixtes (entre 31 et 69 % de légumineuses). Ces essais se sont déroulés sur une vaste gamme de conditions pédoclimatiques, à savoir dix régions administratives du Québec, couvrant de 2 282 à 3 114 degrés-jours en base 0°C (DJ<sub>0</sub>) et 1 370 à 2 092 degrés-jours en base 5 °C (DJ<sub>5</sub>). Les propriétés de sol de la couche de surface (0-20 cm) sont résumées au Tableau 9. Dans l'ensemble, les trois groupes de textures de sol étaient bien représentés dans les prairies de graminées et les prairies de légumineuses, tandis que les prairies mixtes n'étaient que sur des sols limoneux (G2). Les sols étaient moyennement acides à neutres (Cescas, 1978), en grande partie à l'intérieur des intervalles de pH optimal allant de 6,0 à 7,0 pour les prairies de graminées et de 6,2 (G1, G2) ou 6,5 (G3) à 7,0 pour la luzerne (CRAAQ, 2022). Les graminées tolèrent généralement mieux l'acidité du sol que les légumineuses (MAAARO, 2017; CRAAQ, 2022). Selon le guide de production des plantes fourragères (CRAAQ, 2022), elles peuvent tolérer un pH de 5,6 dans un sol à texture fine ou limoneuse, tandis que le pH critique de la luzerne dans un sol comparable est de 6,0. Autrement, les sols avaient une bonne étendue de la MO<sub>PAF</sub> (2,5 à 12,4 % MO<sub>PAF</sub>, médiane de 5,1 %). Les teneurs en MO<sub>PAF</sub> avaient tendance à être plus élevées dans les régions froides, légèrement plus élevées dans les sols argileux (G1), et légèrement plus élevées dans les cultures à haut pourcentage de graminées. Les teneurs de nitrates au printemps (N-NO<sub>3</sub>, 0-30 cm) ont été mesurées dans le cadre du PSEF seulement. Dans l'ensemble, 59 % des blocs avaient une teneur égale ou inférieure à 5 ppm N-NO<sub>3</sub> au semis, pour une étendue allant de 0,4 à 35 ppm N-NO<sub>3</sub>.

Tableau 9. Répartition des blocs des essais N des prairies pour différentes classes de propriétés de sol

pH <sub>eau</sub> <sup>(1)</sup>	(%)	MO <sub>PAF</sub> (%) <sup>(2)</sup>		N-NO <sub>3</sub> (ppm) <sup>(3)</sup>		Groupe de textures <sup>(4)</sup>	
		(%)	G1	G2-G3	(%)	(%)	(%)
<b>Graminées (≤ 30 % de légumineuses)</b>							
≤ 5,5	4	≤ 2	0	0	≤ 5	27	G1 33
5,5 – 6,0	7	2 – 3	0	2	5 – 10	14	G2 37
6,0 – 6,5	43	3 – 5	11	62	10 – 15	4	G3 23
6,5 – 7,0	18	5 – 6	41	9	> 15	1	nd 6
> 7,0	7	> 6	48	26	nd	54	- -
<b>Mixtes (31 à 69 % de légumineuses)</b>							
≤ 5,5	0	≤ 2	0	0	≤ 5	33	G1 0
5,5 – 6,0	11	2 – 3	0	0	5 – 10	33	G2 100
6,0 – 6,5	44	3 – 5	0	11	10 – 15	33	G3 0
6,5 – 7,0	44	5 – 6	0	44	> 15	0	- -
> 7,0	0	> 6	0	44	-	-	- -
<b>Légumineuses (≥ 70 % de légumineuses)</b>							
≤ 5,5	0	≤ 2	0	0	≤ 5	38	G1 39
5,5 – 6,0	13	2 – 3	0	9	5 – 10	25	G2 30
6,0 – 6,5	62	3 – 5	39	65	10 – 15	8	G3 31
6,5 – 7,0	25	5 – 6	7	9	> 15	13	- -
> 7,0	0	> 6	54	18	nd	16	- -

(1) Le pH optimal est de 6,0 à 7,0 pour les prairies de graminées et de 6,2 à 7,0 (G1, G2) ou 6,5 à 7,0 (G3) pour la luzerne (CRAAQ, 2022).

(2) Matière organique déterminée par la méthode de perte au feu.

(3) Nitrate mesuré au semis dans la couche de sol 0-30 cm. nd : non disponible.

(4) G1 : sols à texture fine; G2 : sols à texture moyenne; G3 : sols à texture grossière.

\* Prairie de graminées : 29 sites (80 blocs); prairies mixtes : 3 sites (9 blocs); prairies de légumineuses : 14 sites (42 blocs).



## 2.2 Détermination des groupes de prairies

Dans un premier temps, il s'est avéré nécessaire de définir un seuil de légumineuses qui départagerait les prairies de graminées du reste. En effet, les recommandations en fertilisation azotée des prairies dépendent de la présence de légumineuses, lesquelles comblent leurs besoins en N par la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique en plus d'en fournir une partie aux graminées via la décomposition et les exsudats racinaires (CRAAQ, 2022). Actuellement au Québec, le seuil de 40 % de légumineuses est utilisé pour départager la recommandation à appliquer (CRAAQ, 2010). D'autres guides techniques consultés utilisés dans d'autres provinces ou États utilisent un ou plusieurs seuils oscillant généralement entre 20 et 60 % (voir Tableau 19). Ainsi, un premier test de partition de Cate-Nelson a servi pour départager les prairies de graminées des prairies mixtes et de légumineuses (Tableau 10). La valeur critique de 32,5 % a été retenue avec une précision de 89 % ( $P < 0,001$ ). À noter que, comme le pourcentage de légumineuses a été évalué à une précision de 5 %, la valeur critique de 32,5 % se situe entre les observations à 30 et 35% de légumineuses et donc, ce seuil départage les prairies composées de 30 % et moins de légumineuses des prairies de 35 % et plus. Un deuxième seuil a ensuite été déterminé afin de départager les prairies mixtes des prairies de légumineuses. Compte tenu de l'absence de données entre 51 et 69 % de légumineuses, les prairies de légumineuses ont été définies comme étant composées de 70 % et plus de légumineuses, à l'image miroir des prairies de graminées définies plus tôt. Considérant ces deux seuils, les prairies mixtes ont été définies par défaut comme étant composées de 31 à 69 % de légumineuses.

Tableau 10. Valeur critique du pourcentage de légumineuses selon le test de Cate-Nelson pour les essais N de prairies

Indicateur	Nobs	Valeur critique	RRel (%)	Sensitivité	Spécificité	Précision	Valeur de P
Composition botanique – pourcentage de légumineuses	131	32,5 %	85	0,88	0,89	0,89	< 0,001

Nobs : nombre d'observations. RRel : Rendement relatif (100 % × rendement du témoin/rendement maximum par bloc).

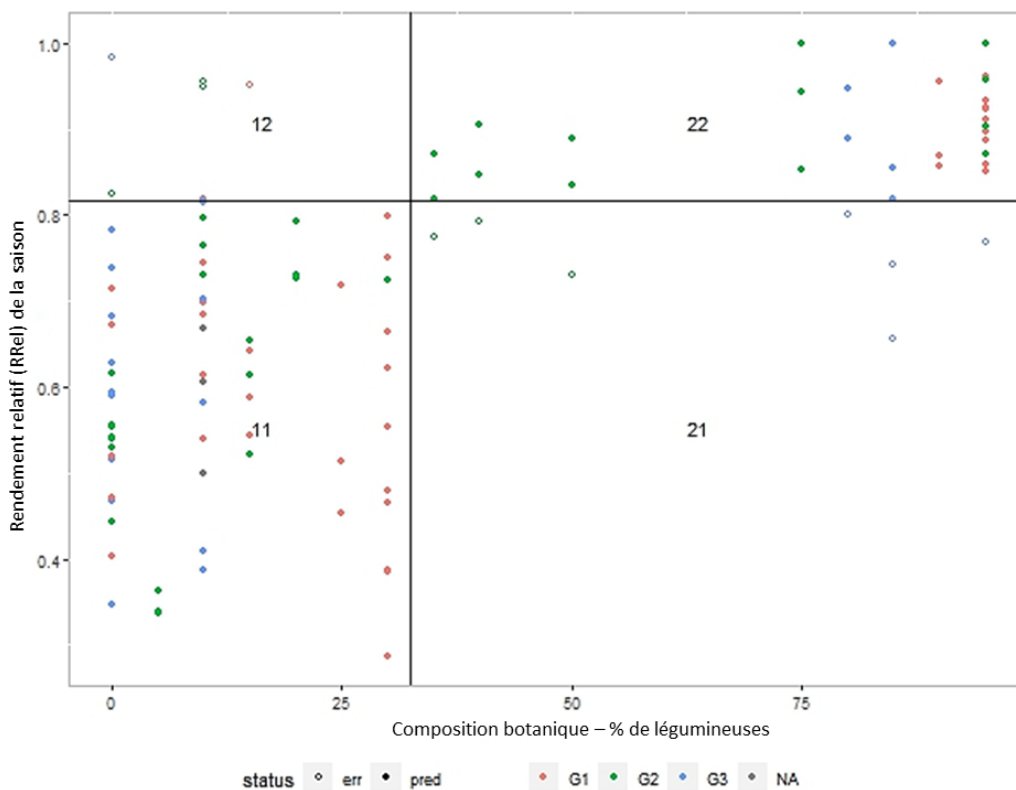


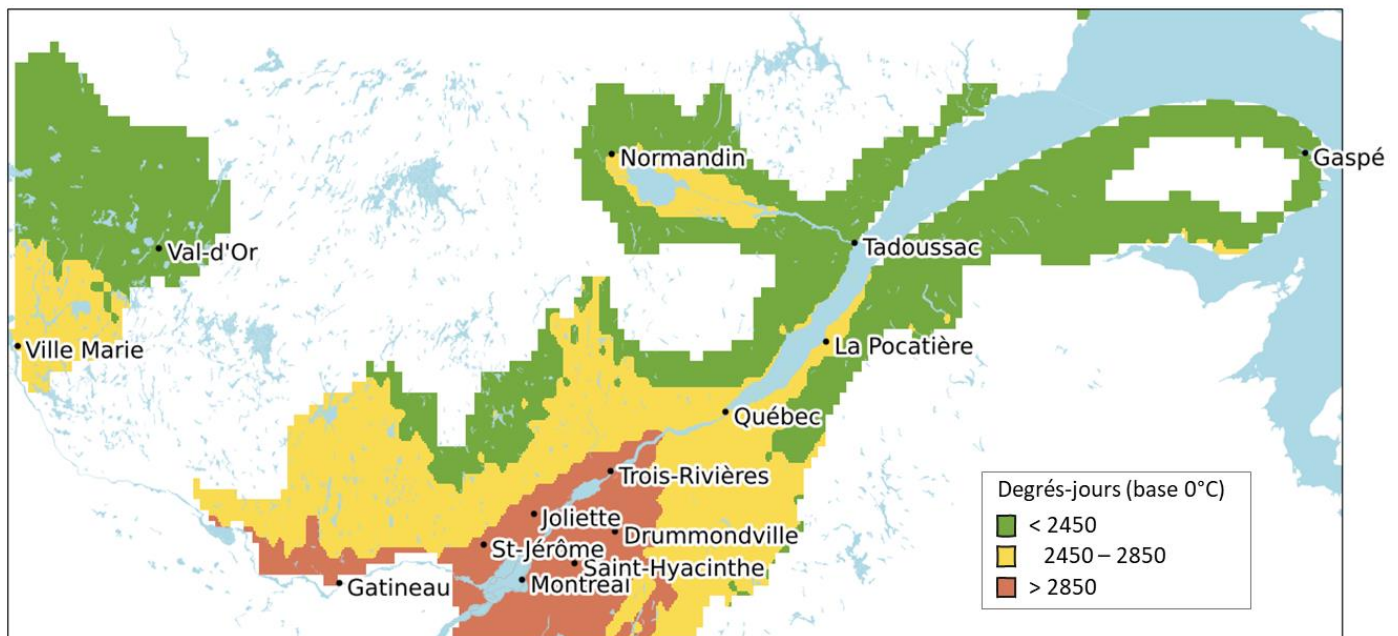
Figure 3. Valeur critique de légumineuses (%) dans la composition botanique des essais N de prairies selon le test de Cate-Nelson (1971).

## 2.3 Détermination des doses agronomiques optimales

### 2.3.1 Recherche d'indicateurs de potentiel de rendement et de fertilité du sol

Dans les essais de fertilisation azotée, l'ajout de données supplémentaires au jeu de données PSEF a permis d'approfondir les analyses par rapport à ce qui est généralement possible dans les autres éléments testés (P, section 3; K, section 4; S, section 4) ou les autres cultures faisant partie du plan de révision (Landry et al., 2020-2023).

Dans un premier temps, il y a eu recherche d'un indicateur représentatif des conditions climatiques qui puisse être corrélé au potentiel de rendement et à la réponse aux engrais azotés. En effet, les prairies sont cultivées dans une multitude de régions qui connaissent des conditions climatiques variées, affectant la durée de la saison de croissance. Conséquemment, plusieurs indicateurs potentiels de rendement ou des combinaisons de ceux-ci ont été testés : la durée de saison de croissance, les degrés-jours de la saison cumulés en base 5 °C et en base 0°C, les degrés-jours cumulés jusqu'à la première coupe, le nombre de coupes et la région administrative (données non présentées). Parmi ces indicateurs, la normale calculée sur 30 ans de degrés-jours en base 0 °C a été retenue (section 1.7.1) puisqu'il était le plus performant. Les valeurs-seuils de 2450 et 2850 DJ<sub>0</sub>, déterminées lors de l'analyse de regroupement, ont été utilisées afin de distinguer trois grandes zones climatiques en fonction de la réponse à l'azote (Figure 4). Cette représentation a permis de considérer les différences de potentiel de rendements et de réponse, lesquels étaient généralement plus élevés dans les régions centrales-sud (zone rouge, > 2850 DJ<sub>0</sub>) du Québec que dans les régions périphériques (zone verte, < 2450 DJ<sub>0</sub>), en accord avec les rendements de références de la Financière (FADQ, 2021).



**Figure 4.** Carte des zones de réponse à l'azote des cultures fourragères, degrés-jours en base 0 °C.

En parallèle, des analyses ont été menées dans le but de trouver si des indicateurs agronomiques reflétaient la réponse des plantes fourragères à la fertilisation azotée. En effet, plusieurs paramètres du sol sont reconnus dans la littérature scientifique pour influencer la réponse des cultures à la fertilisation azotée et peuvent ainsi devenir des indicateurs de prédiction des besoins en apports azotés. Le potentiel de plusieurs indicateurs a donc été testé, à la fois par une analyse de classification hiérarchique (méthode de Ward, 1963) que par le test de Cate-Nelson (Cate et Nelson, 1971) : la teneur en nitrate du sol (N-NO<sub>3</sub>; 0-30 cm) au semis, la teneur en matière organique (MO<sub>PAF</sub>; 0-20 cm) et la teneur en argile (0-20 cm). D'autres indicateurs potentiels de réponse soulevés dans la littérature, comme l'âge de la prairie, ont également été analysés. Les indicateurs ont été testés sur l'ensemble des données, puis sur chaque groupe de prairies, c.-

à-d. de graminées ( $\leq 30$  % lég.) et de légumineuses ( $\geq 70$  % lég.), séparément. Pour les prairies mixtes, les données étaient en quantité insuffisante pour mener des analyses. Lorsque possible, les indicateurs ont été testés à l'intérieur des groupes de textures G1, G2 et G3, puis à l'intérieur des groupes de DJ<sub>0</sub> déterminés plus tôt. Dans le but d'alléger la présentation des résultats, seuls les paramètres statistiques des indicateurs dont la valeur de *P* est significative ( $P < 0,05$ ) ou présentait une tendance ( $P < 0,12$ ) sont présentés (Tableau 11).

Parmi les indicateurs de fertilité testés, seul le nitrate du sol (N-NO<sub>3</sub>; 0-30 cm) au semis, mesuré par la méthode au KCl 2M, s'est révélé un indicateur prometteur afin de préciser la réponse à la fertilisation azotée des prairies de graminées. Le seuil de 4,2 ppm N-NO<sub>3</sub> a été retenu dans les sols à textures fines (G1), et le seuil de 4,5 ppm N-NO<sub>3</sub> dans les sols à textures moyennes à grossières (G2, G3). Ainsi, contrairement à ce qui est souvent observé pour les cultures annuelles (Landry et al., 2021; Landry et al., 2022), la MO<sub>PAF</sub> ne s'est pas révélé un bon indicateur pour les prairies, probablement parce que les sols de celles-ci avaient tous un taux de MO<sub>PAF</sub> généralement élevé pour des sols minéraux québécois (Tableau 9). Dans les cultures fourragères, comme le sol demeure généralement non travaillé plusieurs années et qu'il est couvert en permanence par des végétaux, combiné au fait que les plantes fourragères développent des systèmes racinaires importants et reçoivent très souvent des engrais et amendements organiques, il est attendu que les taux de MO mesurés soient élevés. De plus, dans les prairies de graminées, le tiers des essais ont été menés sur un sol acide (pH < 6,0), ce qui a pu freiner les quantités d'azote minéralisé de la matière organique puisque l'activité des microorganismes est plus faible en sols plus acides que dans les sols dont le pH se rapproche de la neutralité (CRAAQ, 2010). De même, la texture du sol ou le pourcentage d'argile ne semblaient pas expliquer la réponse à l'azote ni pour les graminées, ni pour les légumineuses.

**Tableau 11.** Valeurs critiques des indicateurs de sol significatifs selon les tests de Cate-Nelson pour les essais N de prairies

Indicateur de sol <sup>(1)</sup>	Type de prairies	Groupes de textures <sup>(2)</sup>	N <sub>obs</sub> <sup>(3)</sup>	Valeur critique	RRel <sup>(4)</sup> (%)	Sensitivité	Spécificité	Précision	Valeur de <i>P</i>
N-NO <sub>3</sub> printemps (0-30 cm; ppm)	Graminées	G1	15	4,2	72	1,00	0,64	73	0,077
	( $\leq 30$ % légumineuses)	G2, G3	29	4,5	64	0,75	0,71	72	0,025

<sup>(1)</sup> Le nitrate au semis a été déterminée par la méthode au KCl 2M et dosé par colorimétrie.

<sup>(2)</sup> RRel : Rendement relatif (100 % × rendement du témoin/rendement maximum par bloc).

<sup>(3)</sup> N<sub>obs</sub> : nombre d'observations.

<sup>(4)</sup> G1 : sols à texture fine ; G2 : sols à texture moyenne ; G3 : sols à texture grossière.

### 2.3.2 Effet de la dose d'azote sur le rendement

Tel que décrit à la section 1.7.3, l'étude de la réponse des prairies aux apports de N a été étudiée en utilisant une approche bayésienne et une équation exponentielle asymptotique faisant intervenir la dose de N, le pourcentage de légumineuses et les degrés-jours (base 0 °C), définie par les équations 5 à 8 (page 20). Les paramètres estimés du modèle sont présentés au Tableau 12. Une analyse de regroupement (*k-means clustering*) a été utilisée pour définir trois groupes de degrés-jours selon les doses 99 %, puis, pour chaque groupe de degrés-jours, les doses agronomiques optimales de N ont été calculées pour 5 classes de pourcentage de légumineuses déterminées, lorsque 90, 92, 95 et 99 % du rendement maximal était visé (Tableau 13). Le modèle élaboré tenait compte de toutes les données (% de légumineuses, degrés-jours, dose N) simultanément, ce qui a permis de proposer des doses optimales selon les catégories de prairies et les zones climatiques souhaitées. L'ensemble des doses optimales recommandées se basent donc sur le même modèle, lequel comprenait 701 observations provenant de 46 sites, couvrant de 2282 à 3114 degrés-jours en base 0 °C.

**Tableau 12.** Résultats du modèle exponentiel asymptotique sur la réponse des prairies de graminées et de légumineuses aux doses croissantes de N

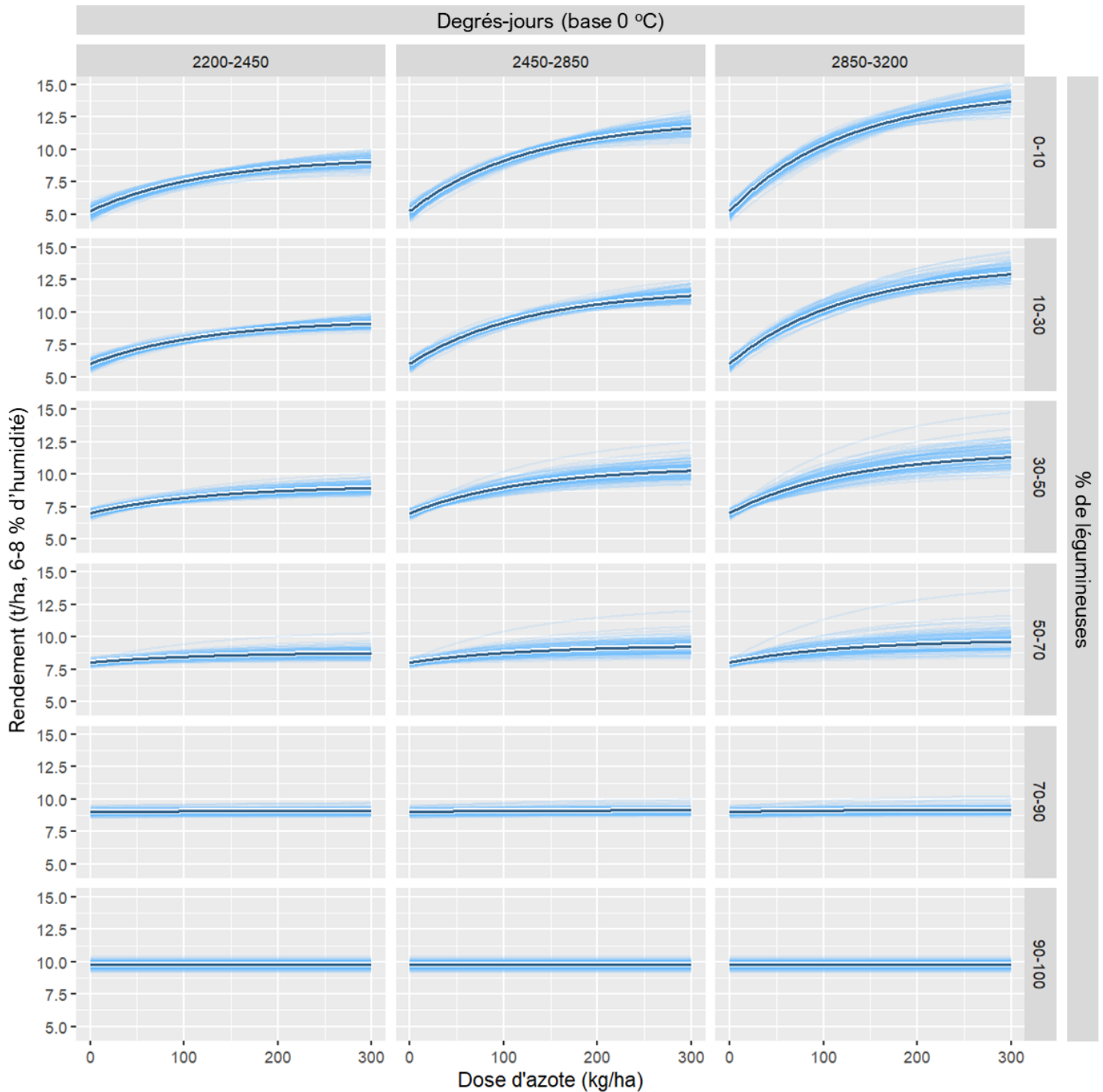
	Estimation du modèle	Intervalle de confiance à 95 % borne inférieure – supérieure
$rdt_{min}$	5,00 t/ha	4,28 – 5,71
$rdt_{max}$	22,89 t/ha	16,79 – 29,17
$\beta_N$	0,0079	0,0046 – 0,0130
$\beta_{DJO}$	0,0011	0,0007 – 0,0018
$\beta_{lég}$	3,78	2,55 – 5,21
$\beta_{2lég}$	7,16	3,27 – 12,56

$rdt_{min}$  : rendement minimum en fonction du pourcentage de légumineuses lorsqu'aucun engrais n'est ajouté ;  $rdt_{max}$  : rendement maximal pouvant être atteint avec les degrés-jours, les apports d'azote et la présence de légumineuses.  $\beta_N$ ,  $\beta_{DJO}$ ,  $\beta_{lég}$ ,  $\beta_{2lég}$  : paramètres estimés du modèle.

Dans les essais de graminées du PSEF, plusieurs cas ont été observés où la dose maximale testée (200 kg N/ha) ne permettait pas d'atteindre un plateau de rendement. L'intégration des données supplémentaires a permis de mieux évaluer la réponse des prairies de graminées au-delà de 200 kg N/ha puisque les doses ajoutées à l'analyse couvraient jusqu'à 275 kg N/ha. À l'opposé, dans la plupart des prairies de légumineuses, très peu de gain de rendement a été observé suivant les apports en N, même à de très fortes doses.

Le niveau du ROM<sub>max</sub> visé a un impact direct sur les doses optimales retenues (Tableau 13). Le choix a été fait de retenir les VSRF à 95 % du ROM maximal. Les données du tableau 14 permettent toutefois de voir l'impact du choix du % de ROM sur les rendements produits et les VSRF recommandées. À titre de rappel, plusieurs mesures ont été prises afin de s'assurer de la précision des VSRF et d'éviter toute surestimation (voir section 1.7.3, sous Azote). Le choix du ROM à 95% entraîne déjà une réduction de rendement conséquente dans certaines situations, par exemple, une réduction d'une demi-tonne de fourrage à l'hectare (0,54 t/ha) en zone Centre-Sud (90 % de graminées). Ceci apparaît toutefois acceptable au regard de la réduction des intrants. Cependant, la réduction à un ROM de 90 % entraînerait une perte de 1 t/ha, ce qui est probablement une quantité significative pour un producteur, surtout si celui-ci fertilise avec les engrais organiques de son entreprise.

Les résultats du Tableau 13 montrent que pour un pourcentage de légumineuses similaire, les doses optimales de N sont généralement plus élevées dans les zones plus chaudes (centrale-sud : 2850 à 3200 DJ<sub>0</sub>) en comparaison aux zones périphériques qui sont plus froides (2200 à 2450 DJ<sub>0</sub>). Par exemple, lorsque 95 % du ROM<sub>max</sub> est visé pour une prairie composée de 0 -10 % de légumineuses, la dose optimale moyenne est respectivement de 198, de 220 et de 227 kg N/ha dans les zones centrale-sud, intermédiaire et périphérique. Cette variation entre les besoins en N selon la région pourrait en partie être attribuée à la grande différence de rendement observée entre les régions du Québec. En effet, selon les données de rendements de références du foin rapportées par la Financière agricole du Québec (FADQ, 2021), les rendements sont globalement plus élevés dans la région de la Montérégie, située dans la zone centrale-sud. Or, les besoins en N des prairies, en particulier les graminées fourragères, dépendent des rendements visés. Par exemple, en Ontario, les recommandations en N des graminées fourragères sont modulées selon les rendements prévus (MAARO, 2017).



**Figure 5.** Rendements estimés par le modèle en fonction des doses croissantes d'azote, selon les zones de degrés-jours (colonnes) et le pourcentage de légumineuses (lignes). Les courbes illustrées (et les incertitudes) représentent les estimés à la médiane des intervalles (exemple : la courbe de la catégorie 2450-2850 DJ<sub>0</sub> et 0-10% de légumineuses représente les estimés pour 2650 DJ<sub>0</sub> et 5 % de légumineuses).

En zone périphérique ( $\leq 2450$  DJ<sub>0</sub>), pour les prairies de graminées pures ou presque ( $< 10$  % légumineuses), la dose optimale a varié entre 180 et 215 kg N/ha lorsque 95 % du ROM<sub>max</sub> estimé était visé (Tableau 13). La dose optimale diminuait avec l'augmentation de la proportion des légumineuses, pour atteindre 145 à 205 kg N/ha dans le cas où la proportion des légumineuses ne dépassait pas 30 % au champ. Dans les prairies mixtes (31 à 69 % de légumineuses),

dépendamment de la composition botanique, les doses optimales ont varié entre 0 et 180 kg N/ha, avec de plus fortes doses lorsque les graminées étaient encore majoritaires au champ (80 à 180 kg N/ha pour les prairies de 30-50 % légumineuses). Enfin, lorsque les prairies étaient à forte proportion de légumineuses ( $\geq 70\%$ ), aucun apport de N n'était nécessaire.

**Tableau 13.** Doses optimales de N à 90, 92, 95 et 99 % du ROM<sub>max</sub>

Zone de DJ <sub>0</sub>	% légumineuses	Dose N (kg/ha) pour 90 % du ROM <sub>max</sub>			Dose N (kg/ha) pour 92 % ROM <sub>max</sub>			Dose N (kg/ha) pour 95 % ROM <sub>max</sub>			Dose N (kg/ha) pour 99 % ROM <sub>max</sub>		
		Min	Moy	Max	Min	Moy	Max	Min	Moy	Max	Min	Moy	Max
Centrale-sud 2850 à 3200 DJ <sub>0</sub>	0 - 10	175	181	185	195	197	200	225	227	230	280	281	285
	10 - 30	155	168	180	175	186	195	210	218	225	275	279	280
	30 - 50	105	136	160	125	156	180	170	194	210	260	271	275
	50 - 70	0	53	110	0	75	135	45	122	175	195	239	265
	70 - 90	0	0	0	0	0	0	0	4	50	0	75	200
	90 - 100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Intermédiaire 2450 à 2850 DJ <sub>0</sub>	0 - 10	160	171	180	180	188	195	210	220	225	275	279	280
	10 - 30	135	155	170	155	174	190	190	209	220	270	276	280
	30 - 50	75	118	150	95	139	170	140	179	205	250	265	275
	50 - 70	0	33	95	0	51	115	5	97	160	165	225	260
	70 - 90	0	0	0	0	0	0	0	0	25	0	58	185
	90 - 100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Périphérique 2200 à 2450 DJ <sub>0</sub>	0 - 10	120	142	160	140	162	180	180	198	215	265	272	280
	10 - 30	80	120	150	100	141	170	145	181	205	250	266	275
	30 - 50	5	70	120	30	93	140	80	139	180	215	248	265
	50 - 70	0	6	55	0	15	75	0	46	125	100	189	240
	70 - 90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28	145
	90 - 100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

ROM<sub>max</sub> : rapport de rendement maximal; DJ<sub>0</sub> : degrés-jours en base 0°C.

**Tableau 14.** Rendements et rapports de rendement (ROM) modélisés suivant les doses optimales de N moyennes à 90, 92, 95 et 99 % du ROM<sub>max</sub>

Zone de DJ <sub>0</sub>	% légum.	90 % ROM <sub>max</sub>			92 % ROM <sub>max</sub>			95 % ROM <sub>max</sub>			99 % ROM <sub>max</sub>		
		dose N <sub>moy</sub>	rdt <sub>moy</sub>	ROM <sub>moy</sub>	dose N <sub>moy</sub>	rdt <sub>moy</sub>	ROM <sub>moy</sub>	dose N <sub>moy</sub>	rdt <sub>moy</sub>	ROM <sub>moy</sub>	dose N <sub>moy</sub>	rdt <sub>moy</sub>	ROM <sub>moy</sub>
Centrale-sud	0 - 10	181	12,38	2,36	197	12,66	2,41	227	13,07	2,49	281	13,61	2,60
	10 - 30	168	11,62	1,93	186	11,88	1,98	218	12,27	2,04	279	12,78	2,13
	30 - 50	136	10,18	1,45	156	10,40	1,48	194	10,74	1,53	271	11,19	1,60
	50 - 70	53	8,75	1,09	75	8,93	1,12	122	9,22	1,15	239	9,61	1,20
	70 - 90	0	9,03	1,00	0	9,03	1,00	4	9,05	1,00	75	9,19	1,02
	90 - 100	0	9,81	1,00	0	9,81	1,00	0	9,81	1,00	0	9,81	1,00
Intermédiaire	0 - 10	171	10,45	1,99	188	10,68	2,04	220	11,03	2,10	279	11,49	2,19
	10 - 30	155	10,05	1,67	174	10,28	1,71	209	10,61	1,77	276	11,06	1,84
	30 - 50	118	9,20	1,31	139	9,41	1,34	179	9,71	1,38	265	10,12	1,44
	50 - 70	33	8,41	1,05	51	8,55	1,07	97	8,81	1,10	225	9,18	1,15
	70 - 90	0	9,03	1,00	0	9,03	1,00	0	9,03	1,00	58	9,13	1,01
	90 - 100	0	9,81	1,00	0	9,81	1,00	0	9,81	1,00	0	9,81	1,00
Périphérique	0 - 10	142	7,89	1,50	162	8,07	1,54	198	8,33	1,59	272	8,68	1,66
	10 - 30	120	7,99	1,33	141	8,16	1,36	181	8,43	1,40	266	8,79	1,46
	30 - 50	70	7,92	1,13	93	8,10	1,15	139	8,36	1,19	248	8,71	1,24
	50 - 70	6	8,08	1,01	15	8,14	1,02	46	8,30	1,04	189	8,63	1,08
	70 - 90	0	9,03	1,00	0	9,03	1,00	0	9,03	1,00	28	9,07	1,00
	90 - 100	0	9,81	1,00	0	9,81	1,00	0	9,81	1,00	0	9,81	1,00

rdt<sub>moy</sub> : rendement moyen estimé par le modèle. ROM<sub>max</sub> : rapport de rendement maximal; DJ<sub>0</sub> : degrés-jours en base 0°C

En zone intermédiaire (2450 à 2850 DJ<sub>0</sub>), dans les prairies de graminées pures ou ayant moins de 10 % de légumineuses, la dose optimale a varié entre 210 et 225 kg N/ha lorsque 95 % du ROM<sub>max</sub> estimé était visé (Tableau 13). La dose optimale diminuait avec l'augmentation de la proportion des légumineuses pour atteindre 190 à 220 kg N/ha dans le cas où la proportion des légumineuses ne dépassait pas 30 % au champ. Dans les prairies mixtes, dépendamment de la composition botanique, les doses optimales ont varié entre 5 et 205 kg N/ha, avec une plus forte dose lorsque les graminées étaient encore majoritaires (140 à 205 kg N/ha pour les prairies de 30-50 % légumineuses). Enfin, lorsque les prairies étaient à forte proportion de légumineuses ( $\geq 70\%$ ), la dose permettant 95 % du ROM<sub>max</sub> se situait entre 0 et 25 kg N/ha, tandis qu'aucun apport azoté n'était nécessaire lorsque les légumineuses représentaient 90 % et plus de la composition botanique au champ.

Dans la zone centrale-sud ( $\geq 2\ 850\ DJ_0$ ), les prairies de graminées pures ou presque (< 10 % légumineuses) ont répondu fortement aux apports azotés. La dose optimale a varié entre 225 et 230 kg N/ha lorsque 95 % du ROM<sub>max</sub> estimé était visé (Tableau 13). Cette dose diminuait avec l'augmentation de la proportion des légumineuses, pour atteindre 210 à 225 kg N/ha dans le cas où la proportion des légumineuses ne dépassait pas 30 % au champ. Dans les prairies mixtes, dépendamment de la composition botanique, les doses optimales de N ont varié entre 45 et 210 kg N/ha, avec une plus forte dose lorsque les graminées sont encore majoritaires (170 à 210 kg N/ha pour les prairies de 30-50 % légumineuses). Enfin, lorsque les prairies étaient à forte proportion de légumineuses ( $\geq 70\%$ ), la dose permettant 95 % du ROM<sub>max</sub> se situait entre 0 et 50 kg N/ha. Dans la zone centrale-sud, comme pour les zones périphériques intermédiaires, aucun apport de N n'était nécessaire lorsque les légumineuses représentaient 90 % et plus de la composition botanique au champ.

Plusieurs travaux ont démonté la propension des prairies de graminées à répondre aux apports en azote (Ziadi, 1999; Parent et al., 1997; Belanger et al., 2016; Belanger et al., 2015; Bélanger et Gastal, 2000) à des doses annuelles de 200 kg N/ha et plus (Gagnon et al., 2018, Guertin et al., 1979). Lorsque les graminées sont en mélange avec des légumineuses, à rendements égaux, les besoins en apports azotés deviennent moins importants (Whitehead, 2000; Nyfeler et al., 2009). En Suisse, des prairies mixtes comportant de 50 à 70 % de légumineuses fertilisées avec une dose totale annuelle de 50 kg N/ha ont produit des rendements comparables à des prairies de graminées pures fertilisées avec 450 kg N/ha (Nyfeler et al., 2009). Dans une expérience de Bélanger et al. (2019), la fertilisation azotée n'a pas eu d'effet significatif sur le rendement lors de la première année de production d'une prairie en mélange, alors que la proportion des légumineuses était autour de 30 à 50 %. L'effet de la dose d'azote était plus tangible à la 2<sup>e</sup> et à la 3<sup>e</sup> année de production, où les légumineuses représentaient moins de 30 % du mélange (Bélanger et al., 2019). Par ailleurs, l'Ontario préconise 60 kg N/ha lorsque la proportion des légumineuses est estimée entre 33 à 50 %, et un apport nul au-delà de 50 % légumineuses (MAAARO, 2017).

Dans les prairies de graminées, le nitrate du sol pourrait servir d'outil décisionnel supplémentaire aux conseillers. En effet, suivant le test de Cate-Nelson (Tableau 11), une comparaison des valeurs des pentes (*b*, paramètre linéaire) révèle que les gains à fertiliser sont 1,4 à 1,6 fois plus importants par unité d'azote apporté lorsque le niveau en N-NO<sub>3</sub> est en dessous du seuil par rapport aux gains au-dessus du seuil. Comme la quantité de données ne permettait pas d'approfondir les résultats, la teneur du sol en N-NO<sub>3</sub> au printemps n'a pas servi à l'établissement des VSRF. Par ailleurs, il convient de revenir sur le dosage du nitrate qui a été réalisé par la méthode au KCl 2M en laboratoire. La corrélation entre cette méthode et d'autres permettant le dosage rapide au site de production, par exemple le Nitratecheck, serait à réaliser, car il est attendu que les seuils différeront selon la méthode utilisée (Wetselaar et al., 1998). Cet outil pourrait être à développer davantage, mais d'ores et déjà, il ressort que les sols sous 4,2 ou 4,5 ppm N-NO<sub>3</sub> répondent davantage à l'azote.



**Tableau 15.** Réponse des prairies de graminées et de légumineuses aux doses croissantes de N

Classe de fertilité N-NO <sub>3</sub> (ppm) <sup>(1)</sup>	N <sub>site</sub>	N <sub>obs</sub>	Paramètre du modèle <sup>(2)</sup>						Dose <sub>max</sub> testée (kg N/ha)	Dose de N (kg/ha)			ROM
			a	err-t	Valeur de P	b	err-t	valeur de P		Min	Max	Optim.	
<b>Graminées, sols G1</b>													
a) ≤ 4,2	4	28	.	.	0,248	0,108	0,018	<b>&lt; 0,001</b>	200	.	.	200	1,50
b) > 4,2	4	32	.	.	0,719	0,079	0,015	<b>0,001</b>	200	.	.	200	1,34
<b>Graminées, sols G2-G3</b>													
a) ≤ 4,5	6	56	-0,039	0,016	<b>0,032</b>	0,147	0,020	<b>&lt; 0,001</b>	200	140	322	200	1,74
b) > 4,5	5	56	.	.	0,554	0,090	0,014	<b>&lt; 0,001</b>	200	.	.	200	1,40

N<sub>site</sub> : nombre de sites; N<sub>obs</sub> : nombre d'observations; Min et Max : bornes inférieure et supérieure de l'intervalle de confiance à 95 %. na : non applicable; Optim : dose optimale pour l'atteinte de 100 % du ROMmax.

(1) N-NO<sub>3</sub> : nitrate dosé par la méthode au KCl 2M ; dose<sub>max</sub> : dose maximale testée; err-t : erreur-type.

(2) Modèle de type quadratique :  $\log(\text{ROM}) = a \times \text{dose}^2 + b \times \text{dose} + c$

### 2.3.3 Diagnostic nutritionnel et exportations en azote

Les valeurs d'humidité, de concentrations et d'exportations en N par les prairies de graminées et de légumineuses en fonction du diagnostic nutritionnel sont présentées au Tableau 11 et à la Figure 15. Le calcul des exportations a été effectué sur la partie récoltée de la plante, fauchée à une hauteur de 5 à 7 cm du sol. Seuls les résultats pour la 1<sup>re</sup> coupe et le rendement total de la saison, soit la somme des rendements mesurés pour toutes les coupes, sont présentés. Le nombre de coupes a varié entre 2 et 4 selon le type de prairies et la région de réalisation des essais (Tableau 1).

Pour les prairies à forte proportion de graminées (≤ 30 % légumineuses), pour la 1<sup>re</sup> coupe, la population de tête, c'est-à-dire le groupe d'individus à haut rendement et à l'équilibre nutritionnel, a eu une concentration moyenne de 21,6 ± 2,6 kg N/t stabilisée à 6 % d'humidité. Considérant un rendement de 4 575 kg/ha, les exportations de la 1<sup>re</sup> coupe étaient en moyenne de 99 kg N/ha. Pour l'ensemble de la saison, la population de tête a eu une concentration moyenne de 22,0 ± 2,2 kg N/t stabilisée à 7 % d'humidité (Tableau 11), ce qui équivaut à 23,7 ± 2,4 kg N/t sur une base de 100 % de matière sèche (MS). Ces valeurs sont similaires aux teneurs référencées dans le guide du CRAAQ (2010), lesquelles sont de 18,8 ; 23,5 et 27,4 kg N/t MS en moyenne pour respectivement les coupes 1, 2 et 3. Considérant un rendement de 8 294 kg/ha (7 % d'humidité), les exportations de la population de tête représentent une médiane de 179 kg N/ha pour la saison, bien qu'elles puissent grimper jusqu'à 280.

Pour les prairies à forte proportion de légumineuses (≥70 %), pour la 1<sup>re</sup> coupe, la population de tête avait une teneur moyenne de 33,5 ± 3,7 kg N/t (6% hum.). Considérant un rendement de 5 525 kg/ha, les exportations médianes de la 1<sup>re</sup> coupe ont représenté 157 kg N/ha. Pour le total de la saison, la population de tête a eu une concentration moyenne de 31,3 ± 2,2 kg N/t stabilisée à 6 % d'humidité (Tableau 11), équivalant à 33,3 ± 2,3 kg N/t MS. Ces valeurs sont légèrement supérieures (1<sup>re</sup> coupe), sinon similaires (2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> coupes) à celles mentionnées dans le guide de référence du CRAAQ (2010), lesquelles correspondent en moyenne à 25,3 ; 28,9 et 32,5 kg N/t MS pour respectivement les coupes 1, 2 et 3. Considérant un rendement de 11 093 kg/ha (6 % d'humidité), les exportations de la population de tête avaient une médiane de 346 kg N/ha pour la saison, variant de 306 à 386 kg N/ha.

Ainsi, il ressort que les coupes cumulées annuelles des prairies de légumineuses entraînent des exportations moyennes en N de près du double (1,9 fois plus) de celles des prairies de graminées. Cette différence tient en partie sur la teneur plus élevée en N des tissus des coupes de légumineuses (1,4 fois plus) et sur des rendements de tête plus élevés (moyenne de 11,0 t/ha) que ceux des graminées (moyenne de 8,3 t/ha).



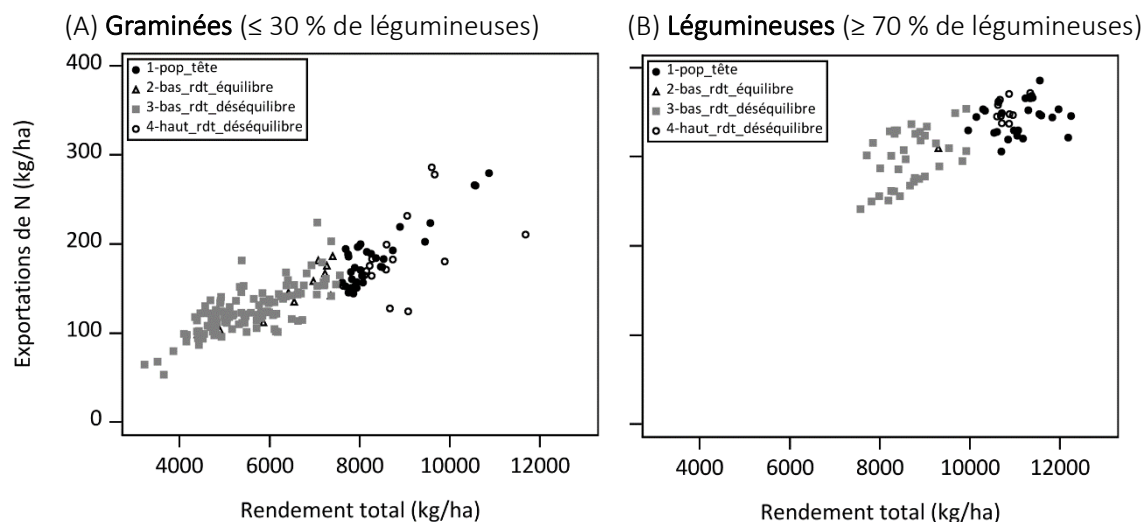
Les données de la Figure 6 montrent que les exportations en N ont augmenté de façon assez linéaire avec les rendements, tant pour les prairies de graminées que celles de légumineuses. Pour les graminées, les exportations en N ont varié entre 54 et 286 kg/ha tandis que les exportations en azote des prairies de légumineuses couvrent des plages de valeurs plus élevées, allant de 241 à 386 kg N/ha. Dans le cadre de cette étude, il n'a pas été possible de produire des valeurs d'exportations détaillées par espèces et encore moins par cultivar, la principale contrainte étant le nombre limité de données disponibles.

**Tableau 16.** Concentrations et exportations en N des prairies de graminées et de légumineuses selon le diagnostic nutritionnel

	Humidité <sup>(1)</sup>			Exportations <sup>(2)</sup>			
	(%)	(kg N/t)		(kg N/ha)			
		Moy	Éc-T	Moy	Med	Min	Max
<b>Graminées (≤ 30 % légumineuses)</b>							
<b>1<sup>re</sup> coupe</b>							
Haut rendement et équilibre nutritionnel (« population de tête »)	6	<b>21,6</b>	2,6	<b>99</b>	98	82	120
Faible rendement et équilibre nutritionnel	6	23,8	1,0	87	85	65	111
Faible rendement et déséquilibre nutritionnel	6	23,8	4,6	65	65	30	106
Haut rendement et déséquilibre nutritionnel	7	21,9	5,4	105	106	67	146
<b>Total de la saison</b>							
Haut rendement et équilibre nutritionnel (« population de tête »)	7	<b>22,0</b>	2,2	<b>183</b>	179	144	280
Faible rendement et équilibre nutritionnel	7	22,5	2,2	146	146	99	186
Faible rendement et déséquilibre nutritionnel	6	22,7	3,0	125	121	54	224
Haut rendement et déséquilibre nutritionnel	6	21,4	4,3	192	180	125	286
<b>Légumineuses (≥ 70 % de légumineuses)</b>							
<b>1<sup>re</sup> coupe</b>							
Haut rendement et équilibre nutritionnel (« population de tête »)	6	<b>33,5</b>	3,7	<b>158</b>	157	137	195
Faible rendement et équilibre nutritionnel	7	34,8	2,5	159	159	134	184
Faible rendement et déséquilibre nutritionnel	7	33,5	2,5	138	137	102	176
Haut rendement et déséquilibre nutritionnel	6	31,6	1,7	147	142	131	178
<b>Total de la saison</b>							
Haut rendement et équilibre nutritionnel (« population de tête »)	6	<b>31,3</b>	2,2	<b>344</b>	346	306	386
Faible rendement et équilibre nutritionnel	7	33,4	-	310	310	310	310
Faible rendement et déséquilibre nutritionnel	8	34,5	3,3	299	302	241	354
Haut rendement et déséquilibre nutritionnel	6	32,8	1,2	354	348	337	372

(1) Humidité après séchage à 55 °C pendant au moins 48 h, jusqu'à un poids constant.

(2) Moy : moyenne; Éc-T : Écart-type; Med : médiane; Min : valeur minimale; Max : valeur maximale.



**Figure 6.** Exportations en azote des prairies de graminées (A) et de légumineuses (B) en fonction des rendements totaux de la saison stabilisés à 6-8% d'humidité, selon le diagnostic nutritionnel.

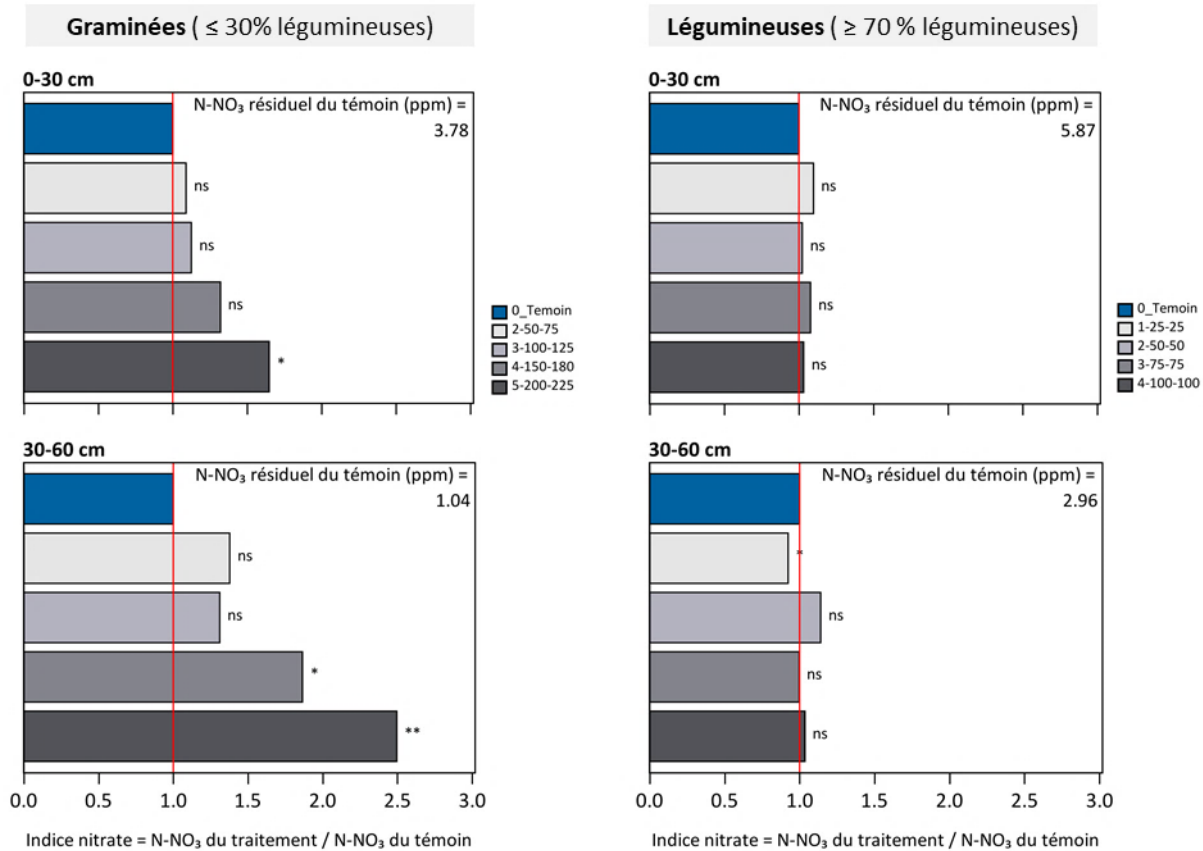
#### 2.3.4 Nitrate résiduel après la dernière coupe

Le N apporté par fertilisation n'est pas absorbé en totalité par les cultures. Ainsi, une partie de ce N est à risque de diffuser dans l'environnement après une saison de croissance (Bélangier et al., 2003). Afin d'évaluer ce risque, le nitrate ( $\text{N-NO}_3$ ) résiduel a été mesuré sur deux profondeurs (0-30 et 30-60 cm) immédiatement après la dernière coupe. Les concentrations en  $\text{N-NO}_3$  des différents traitements ont été analysées en tant qu'« indice nitrate ». Cet indice s'obtient en divisant la teneur en  $\text{N-NO}_3$  du traitement fertilisé par la teneur en  $\text{N-NO}_3$  de la parcelle témoin. Ainsi, un indice nitrate supérieur à 1 signifie qu'il y a une hausse (significative ou non) du nitrate dans les parcelles fertilisées en comparaison au témoin.

Les augmentations de nitrate résiduel dans le sol à la suite des essais N et par rapport au témoin sont présentées à la Figure 7. De manière générale, les témoins 0 N étaient plus riches en nitrate résiduel dans les prairies de légumineuses que dans les prairies de graminées.

Dans les prairies de graminées, les parcelles n'ayant reçu aucune fertilisation azotée affichaient des teneurs moyennes de 3,78 ppm  $\text{N-NO}_3$  en surface et de 1,04 ppm en profondeur. En surface, les apports azotés ont engendré une hausse des teneurs en nitrate qu'à la dose de 200-225 kg N/ha, où les concentrations en nitrate ont augmenté en moyenne de 65 % (indice nitrate de 1,65) par rapport au témoin, menant à une teneur de 6,2 ppm  $\text{N-NO}_3$  (3,78 ppm x 1,65). En profondeur, les applications de 150 kg N/ha et plus ont contribué à la hausse des teneurs en nitrate de 86 à 150 % (indices nitrate de 1,86 et 2,50 pour les groupes de doses 150-180 et 200-225 kg N/ha, respectivement). Cela dit, malgré ces augmentations, les concentrations mesurées restent très faibles, avec des teneurs moyennes de 2,6 ppm suivant la plus forte dose (200-225 kg N/ha). Ces résultats confirment ainsi la réputation des graminées, connues pour être d'excellents pièges à nitrate. De plus, les mesures ont été prises au moment de la dernière coupe. Il restait donc encore plusieurs semaines afin que le nitrate soit prélevé par la culture puisque celle-ci demeure en place. Enfin, la culture occupe 100 % de la superficie cultivée. L'analyse du nitrate ne doit donc pas être vue comme celle effectuée après une culture en rangée laissant le sol à nu et sans prélèvement pour des semaines avant les gels automnaux.

Dans les prairies de légumineuses, les parcelles n'ayant reçu aucun apport azoté affichaient des teneurs de 5,87 ppm  $\text{N-NO}_3$  en surface et de 2,96 ppm en profondeur. Pour les deux couches de sol, les teneurs en  $\text{N-NO}_3$  n'ont pas été affectées par les doses testées.



**Figure 7.** Indices nitrate des traitements d'azote des prairies de graminées (à gauche) et de légumineuses (à droite) aux profondeurs 0-30 et 30-60 cm, après la dernière récolte. La statistique présentée à droite des barres horizontales indique si le traitement est différent du témoin 0 N. NS : non significatif ; t : tendance à  $P < 0,12$  ; \* :  $P$  entre 0,05 et 0,01 ; \*\* :  $P$  entre 0,01 et 0,001 ; \*\*\* :  $P < 0,001$ .

### 2.3.5 Les risques d'intoxication au nitrate dans les fourrages

Lorsqu'ils ingèrent une trop grande quantité de nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ), les animaux monogastriques peuvent développer une gastrite sévère (Bruning-Fann et Kaneene, 1993b), tandis que les ruminants, plus sensibles en raison de l'action des microbes du rumen, peuvent développer une méthémoglobinémie (Drewnoski et al., 2019; Walters et Walker, 1978; Bruningfann et Kaneene, 1993a). La concentration en nitrate dans le fourrage est donc à surveiller. Celle-ci peut être exprimée en ion nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) ou en azote nitrate ( $\text{N-NO}_3$ ), en considérant le facteur de conversion  $[\text{NO}_3^-] = [\text{N-NO}_3] \times 4,43$ . On considère que la concentration sur base sèche est généralement sécuritaire sous 0,15 %  $\text{NO}_3$  (< 350 ppm  $\text{N-NO}_3$ ), que des précautions sont à prendre lorsqu'elle se situe entre 0,15 et 1,0 %  $\text{NO}_3$  (350 à 2260 ppm  $\text{N-NO}_3$ ), tandis qu'un fourrage qui affiche au-delà de 1,0 %  $\text{NO}_3$  (>2260 ppm  $\text{N-NO}_3$ ) est à proscrire de l'alimentation (Glunk et al., 2015; MAAARO, 2023).

#### 2.3.5.1 Les causes de hautes teneurs en nitrate dans le fourrage

Chez les végétaux, la conversion du  $\text{NO}_3^-$  est fortement liée à l'activité photosynthétique. Normalement, le  $\text{NO}_3^-$  du sol est prélevé et réduit en  $\text{NH}_4^+$  avant d'être intégré aux tissus de la plante sous forme d'acides aminés et de protéines (Bolan et Kemp, 2003). Cependant, si la plante prélève plus de  $\text{NO}_3^-$  qu'elle n'en réduit, par exemple lorsque les conditions sont moins favorables à la croissance des plantes, les nitrates peuvent s'accumuler (Maynard et al. 1976). Les causes les plus

communes comprennent un épisode de sécheresse avant la récolte, une faible luminosité, un gel, des températures froides, des maladies ou des applications d'herbicide provoquant une défoliation ou des dommages aux tissus de la plante, ou encore un taux élevé de nitrate dans le sol (Drewnoski et al., 2019; Bolan et Kemp, 2003, Glunk et al., 2015). Les teneurs des tissus en  $\text{NO}_3$  du fourrage varient également en fonction de l'espèce végétale, du stade de la culture, de la partie de la plante, de la fertilisation en azote ainsi que la présence d'espèces accumulatrices de  $\text{NO}_3$ . Par exemple, l'avoine, le maïs, le seigle, le blé, l'orge, de même que plusieurs espèces de mauvaises herbes comptent parmi les plantes accumulatrices de nitrate, tandis que la fléole des prés, l'agrostide commune et le dactyle pelotonné sont connus comme non-accumulatrices (Geurink et al. 1979; Cash et al. 2002; Bolan et Kemp, 2003). Par ailleurs, les légumineuses ne présentent pas ou très peu de risque de toxicité au nitrate, car le N est intégré à la plante sous forme ammoniacale lors de la fixation symbiotique de l'azote (Haynes, 1984; Ledgard et Giller, 1995).

### 2.3.5.2 La fertilisation en azote et les teneurs en nitrate de la plante

Le nitrate dans la biomasse provient du sol, et bien qu'il existe une corrélation positive entre le nitrate du sol et le nitrate dans les plantes, l'effet de la fertilisation, à moins qu'elle soit excessive, a un effet moins important que l'ensemble des facteurs climatiques mentionnés ci-haut (Drewnoski et al., 2019). D'ailleurs, il convient de souligner que le fractionnement de la dose de N est d'autant plus important à mesure que la dose augmente afin d'éviter une accumulation de nitrate dans la plante. À juste titre, de fortes doses de N (apportées en un seul passage) sont à éviter. Généralement, dans la littérature scientifique, les applications jusqu'à 150-200 kg N/ha maintiennent le  $\text{NO}_3$  à des niveaux sécuritaires dans le fourrage, tandis que les doses de plus de 200 kg N/ha (en un seul apport) présentent plus souvent qu'autrement des teneurs toxiques (> 1,0 %  $\text{NO}_3$ ) ou qui nécessitent des précautions (0,15-1,0 %  $\text{NO}_3$ ) (Ryan et al., 1972; Hojjati et al., 1972; Guertin et al., 1979; George et al., 1973; Kline et Broersma, 1983; Prins, 1983; Penney et al., 1990; Shiel et al., 1999; Bolan et Kemp, 2003). Par exemple, en Nouvelle-Zélande, les applications de 50 et 100 kg N/ha ont présenté des niveaux de  $\text{NO}_3$  sécuritaires, l'application de 200 kg N/ha a entraîné des hausses de  $\text{NO}_3$  à des niveaux nécessitant des précautions, alors que les teneurs en  $\text{NO}_3$  dans le fourrage ont atteint un niveau toxique aux doses de 400 et 600 kg N/ha (Bolan et Kemp, 2003). Au Québec, Guertin et al. (1979) ont noté que des doses jusqu'à 224 kg N/ha étaient sécuritaires sur trois cultivars de fléole des prés, alors qu'ils ont noté un dépassement du seuil de toxicité qu'aux doses de 448 et 896 kg N/ha. Enfin, Kline et Broersma (1983) ont démontré qu'une dose de 180 kg N/ha en une seule application était sécuritaire sur quatre années consécutives sur la fléole des prés. Dans la même lignée, les recommandations ontariennes préconisent de ne pas appliquer plus de 170 kg N/ha à la fois (en un seul passage) afin de prévenir les risques de toxicité au nitrate (MAAARO, 2017).

Afin de réduire les risques à un niveau « plus que sécuritaire », il est important que les VSRF recommandées (Tableau 17) de plus de 150 kg N/ha soient fractionnées en deux ou trois apports, appliqués au printemps et après les coupes. De plus, le jugement de l'agronome est primordial afin de rectifier la recommandation en cours de saison au besoin, par exemple dans le cas où des facteurs de stress freinent la croissance de la culture. En procédant de la sorte, les risques de toxicité au nitrate dans le fourrage demeurent très faibles, voire inexistantes.

## 2.4 Fertilisation azotée proposée et comparaison avec les recommandations au Canada et à l'étranger

Les valeurs scientifiques de référence en fertilisation (VSRF) en azote proposées pour les prairies de graminées et de légumineuses en production sont présentées au Tableau 17. Ces VSRF reposent sur l'effet des doses de N sur la quantité et la qualité des rendements obtenus. Pour plus de détails concernant les effets de la fertilisation azotée sur la valeur fourragère des prairies, consulter l'effet de la fertilisation sur la valeur nutritive à la page 83.

Les valeurs proposées se basent sur le modèle visant 95 % du  $\text{ROM}_{\text{max}}$  (Tableau 13). Pour les prairies de graminées (30 % de légumineuses ou moins), les doses correspondant à la borne inférieure de l'intervalle de confiance ont été retenues. Ceci s'ajoute aux précautions prises afin de s'assurer de ne pas surestimer la dose de N recommandée (p. 38). Ainsi, les

doses pour les prairies de moins de 10 % de légumineuses et de 10 à 30 % de légumineuses sont respectivement de 180 et 145 kg N/ha en zone périphérique ( $DJ_0 < 2450$ ), de 210 et 190 kg N/ha dans la zone intermédiaire ( $DJ_0$  compris entre 2450-2850) et de 225 et 210 kg N/ha dans la zone centrale-sud ( $DJ_0 > 2850$ ). Ces doses permettront d'atteindre 95 % du  $ROM_{max}$  en plus d'augmenter de 25 % la teneur en protéines des graminées (voir la section 7.2.1). En outre, à ces doses, le risque de dépassement du seuil de toxicité de 0,15 % MS en azote nitrique (Ryan et al., 1972) est très faible, voire inexistant (Guertin et al., 1979), d'autant plus que le fractionnement est recommandé d'emblée puisque l'azote est un élément sujet à des pertes par volatilisation (Sheppard, 2010; Soares et al., 2012) surtout lorsqu'il est laissé en surface, comme c'est le cas dans les prairies. Il est ainsi fortement conseillé de fractionner la dose totale en deux ou trois apports. Conformément à ce qui est proposé dans le guide de production des plantes fourragères (CRAAQ, 2022), le fractionnement proposé dépend du nombre de coupes prévues dans la saison. Dans un régime à deux coupes, 60 % de la dose totale sera apporté dès que les conditions sont propices au printemps et 40 % après la 1<sup>re</sup> coupe. Dans un régime à trois ou quatre coupes, il est conseillé de fractionner la dose totale en trois apports, soit 40 % de la dose totale au printemps, 30 % après la 1<sup>re</sup> coupe et 30 % après la 2<sup>e</sup> coupe. La fertilisation azotée doit être effectuée le plus rapidement possible après une fauche afin d'éviter les dommages sur les nouvelles pousses en croissance causés par le passage de la machinerie ou les brûlures des feuilles par certains engrais (CRAAQ, 2022).

De même que pour les prairies de graminées, deux catégories de prairies mixtes sont proposées, soit à majorité de graminées (31-50 % légumineuses) et à majorité de légumineuses (51-69 %). Pour les prairies mixtes à majorité de graminées, les doses correspondant à la borne inférieure de l'intervalle de confiance ont été retenues pour les zones intermédiaires (2450-2850  $DJ_0$ ) et centrale-sud ( $> 2850 DJ_0$ ). Pour la zone périphérique ( $< 2450 DJ_0$ ), la borne inférieure de l'intervalle de 80 N a été jugée trop faible par rapport aux recommandations des classes avoisinantes (145 et 140 N) et considérant la présence encore prépondérante des graminées. Par conséquent, la valeur moyenne entre 80 et 140, soit 110 kg N/ha, est proposée. Pour les prairies mixtes à majorité de légumineuses, des intervalles de doses sont proposés puisque les doses optimales peuvent varier selon le potentiel de fixation symbiotique des légumineuses. Dans les zones périphérique et intermédiaire, les intervalles correspondent à la plus petite dose testée et la borne supérieure de l'intervalle de confiance. Dans la zone centrale-sud, cet intervalle est délimité par les bornes inférieure et supérieure de l'intervalle de confiance. Les doses proposées ont été arrondies au 5 kg N/ha supérieur. Il est suggéré de fractionner la dose totale en 1, 2 ou 3 apports selon la même logique que pour les prairies de graminées, c'est-à-dire en fonction de la dose totale prévue et le nombre de coupes.

Pour les prairies ayant entre 70 et 90 % de légumineuses, un apport de 0 à 25 kg N/ha est proposé dans les zones périphérique et intermédiaire. L'apport varie de 0 à 50 kg N/ha dans la zone supérieure à 2850  $DJ_0$ , ce qui correspond aux bornes inférieures et supérieures de l'intervalle de confiance. Enfin, pour les prairies composées à plus de 90 % de légumineuses, aucun apport de N n'est jugé nécessaire, considérant que les légumineuses peuvent combler leurs besoins azotés par l'utilisation de l'azote du sol et la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique.

Par rapport à l'actuelle recommandation du CRAAQ (2010), le seuil servant à distinguer les prairies de graminées des prairies de légumineuses a été actualisé (30 % plutôt que 40 %) et les recommandations sont regroupées en un seul tableau plutôt que deux tableaux distincts, ce qui facilite sa consultation. De plus, en comparaison à la grille actuelle du CRAAQ (2010), la recommandation en azote prend en compte les potentiels de réponse selon les zones climatiques et se détaille en fonction de la proportion des légumineuses au champ. Dans les prairies de graminées en zone centrale-sud, les recommandations marquent une augmentation des apports en azote par rapport à la grille actuelle. Selon la catégorie considérée, les VSRF de la présente étude sont plus élevées que plusieurs recommandations canadiennes, mais rejoignent celles du Vermont (É-U) qui recommandent entre 112 et 224 kg N/ha dans les prairies de graminées sans dépasser la recommandation ontarienne dans le cas où d'importants rendements sont prévus (ex. 10 t MS/ha  $\times$  23 kg N/t MS prévue = 230 kg N/ha). Les potentiels de rendements, lesquels sont étroitement liés aux zones climatiques, et les proportions de légumineuses sont des indicateurs couramment utilisés pour moduler la dose (Tableau 19).

Il est à noter que la rentabilité économique, tel que pour les autres cultures des fascicules précédents Landry et al., 2020-2023), n'a pas été considérée dans le modèle. Cependant, la qualité nutritionnelle a été un élément important de l'analyse grâce à des analyses spécifiques détaillées. Le choix de baser les VSRF sur les besoins de la culture s'appuie, entre autres, sur la très grande hétérogénéité des réalités de production, laquelle implique une grande variabilité des coûts et revenus. Par exemple, l'achat d'engrais minéraux est une réalité très différente de celle de l'obligation de valoriser à la ferme les fumiers produits par les élevages. De même, la vente de foin n'entraîne pas les mêmes revenus que l'emploi au site de production des fourrages pour l'élevage de l'entreprise. Pour une analyse complète, le coût environnemental et monétaire d'acheter et de faire livrer un complément alimentaire en remplacement du fourrage non produit devrait être pris en compte. La culture du maïs n'a pas le même impact que celle des prairies par unité d'énergie produite et son transport par camion entraîne aussi des coûts environnementaux. Cependant, ceci n'écarte pas le principe que l'augmentation des VSRF dans le but de hausser la production de fourrages n'est intéressante que dans la mesure où le supplément est valorisé (Comifer, 2013). Par conséquent, il est primordial d'ajuster la dose selon la nature de la prairie (permanente, temporaire, présence de légumineuses, espèces), son utilisation et son niveau d'intensification (nombre de coupes, rendements). Il est donc conseillé d'étudier les aspects économiques et environnementaux de façon complémentaire, mais distincte des recommandations agronomiques et de fournir aux producteurs des outils d'aide à la décision agroéconomique, par exemple une table de sensibilité, qui permettrait d'ajuster les apports de fertilisants d'une année à l'autre selon la source fertilisante.

De plus, dans le cadre des essais, la nodulation des légumineuses et la quantité de N fixé n'ont pas été évaluées. Plusieurs facteurs peuvent influencer la quantité d'azote fixé par la symbiose, notamment l'espèce, les conditions de croissance et la localisation géographique (Unkovich and Pate, 2000; Whitehead, 1995), mais également la bonne bactérie et une nodulation adéquate. Selon les travaux de Carlsson et Huss-Danell (2003), la luzerne serait meilleure fixatrice que le trèfle rouge, lequel fixerait davantage que le trèfle blanc. La quantité de N fixé est également étroitement corrélée à la biomasse produite (Carlsson et Huss-Danell, 2003). Dans des prairies en mélange, l'azote fixé par les légumineuses peut être rendu disponible aux graminées via la décomposition et les exsudats racinaires. De plus, la fixation symbiotique sera freinée dans le cas où une forte fertilisation azotée est apportée (Eardly et al., 1985).

### Pratiques et recommandations dans des zones pédoclimatiques comparables

En Ontario, les recommandations pour les prairies de graminées (< 33% légumineuses) sont modulées par le rendement prévu, soit 23 kg N par tonne MS récoltée. Par conséquent, les doses recommandées augmentent à mesure que les producteurs intensifient leurs pratiques, ou encore que le climat, la région, ou encore l'espèce permettent davantage de rendement. De la même manière, les VSRF proposées dans le présent document s'appliquent aux producteurs qui ont une régie de foin intensive et où des rendements conséquents sont prévus ( $\geq 8,3$  t/ha pour les prairies de graminées;  $\geq 11,1$  t/ha pour les prairies de légumineuses; voir les rendements de population de tête à la section 2.3.3). Ainsi, pour les prairies de graminées pratiquement pures et en région centrale-sud, la VSRF proposée est de 225 kg N/ha, ce qui est similaire aux recommandations de l'Ontario lorsque le rendement prévu est de  $\geq 10$  t MS/ha. Les VSRF proposées se comparent également à différentes recommandations états-uniennes. Au Vermont, une dose de 224 kg N/ha est recommandée pour la production de foin de graminées pour un rendement attendu de 12 t/ha à 12-15 % d'humidité (UVM Extension, 2017). En Suède, sous une régie à trois coupes, les recommandations pour les prairies de graminées contenant 10% de légumineuses varient de 150 à 225 kg N/ha pour des rendements respectifs de 7 à 11 t MS/ha (Jordbruksverket, 2023).

Dans les prairies de graminées, les VSRF proposées marquent une augmentation par rapport aux recommandations actuelles du CRAAQ (2010). Les résultats de la présente analyse peuvent ainsi susciter des questionnements ou réticences à savoir si cette hausse traduit un besoin effectif des prairies ou résulte en partie des méthodes d'analyses. Cependant, plusieurs précautions ont été prises afin d'éviter tout biais qui entraînerait une surestimation des doses recommandées, à savoir :

- **Les données sont fiables et de qualité.** Les sites qui ont présenté un ou des facteurs qui auraient pu influencer la réponse à la fertilisation autre que les engrais eux-mêmes ont été exclus de l'analyse. Par exemple, un épisode de sécheresse prolongée, un sol dégradé repéré à l'analyse pédologique, une baisseur localisée entraînant un patron de rendement, une mauvaise synchronisation coupe-engrais, etc.
- **Le calculer des VSRF de chaque catégorie s'appuie sur l'ensemble des données et non pas seulement sur celles des sites de cette catégorie.** En effet, la qualité et la quantité de données disponibles ont permis la construction d'un modèle robuste à partir duquel la VSRF de chaque catégorie est calculée. Ainsi, toutes les données disponibles sont considérées pour chaque condition de DJO et %Lég, et où les VSRF sont extraites aux conditions définies. Ceci permet d'inclure l'ensemble des données pour tous les estimés. Pour des conditions où il y a peu de données, une analyse séparée produirait des résultats avec énormément d'incertitude ou même des résultats fortuits.
- **Les doses de 300 kg N/ha et plus ont été éliminées du jeu de données.** Pour le calcul des doses recommandées, le rendement à l'asymptote était considéré comme le rendement maximal, à moins que ce dernier ait été atteint à des doses supérieures à 300 kg N/ha. Dans ce cas, le rendement maximal a été fixé à la dose de 300 kg/ha. Ce fut le cas pour les conditions à faible %Lég et haut DJO. **Les doses N recommandées pour ces conditions sont donc inférieures à ce que l'analyse suggère.**
- **L'objectif de rendement a été réduit à 95 % du ROMmax.** En effet, initialement, les VSRF proposées visaient 99% du ROMmax, comme c'est le cas pour le P et le K où les VSRF proposées correspondent à l'atteinte de l'optimum. Dans le cas du N, l'objectif de rendement a été réduit à 95% du ROMmax afin d'éviter toute surestimation.
- **Les doses correspondent aux bornes inférieures de l'intervalle de confiance.** Alors que les doses moyennes ou maximales auraient pu être choisies afin de maximiser les rendements, les doses minimales ont été privilégiées, considérant que les gains de rendements obtenus aux doses moyennes et maximales sont non significatifs par rapport à ceux obtenus suivant la dose de la borne inférieure de l'intervalle de confiance. De plus, la catégorie 0-10 % de légumineuses en zone centrale-sud présente l'intervalle de confiance le plus petit (225 à 230 N) de toutes les catégories de prairies.
- **Calcul des grilles :** Pour le calcul des VSRF, le rendement à l'asymptote (99 % du ROM) était considéré comme le rendement maximal, à moins que ce dernier ait été atteint à des doses supérieures à 300 kg N/ha. Dans ce cas, le rendement maximal a été fixé à la dose de 300 kg/ha. Ce fut le cas pour les conditions à faible %Lég et haut DJO. **Les doses N recommandées pour ces conditions sont donc inférieures à ce que l'analyse suggère.**

Bien qu'elles soient encore élevées par rapport aux recommandations actuelles (CRAAQ, 2010), les VSRF proposées restent donc conservatrices. Elles permettent aussi la meilleure qualité nutritive en optimisant la teneur en protéine du foin de graminées (section 7.2).

Tableau 17. Fertilisation azotée des prairies en production – Valeurs scientifiques de référence en fertilisation

Proportion des légumineuses (%)	Période d'application	Fractionnement <sup>(1)</sup> (% de la dose totale)	VSRF (kg N/ha)		
			Zone périphérique <sup>(9)</sup>	Zone intermédiaire <sup>(9)</sup>	Zone centrale-sud <sup>(9)</sup>
<b>Graminées (≤ 30 % de légumineuses) <sup>(11)</sup></b>					
0 – 10	Au printemps et après les coupes	2 apports : 60-40 %	180 <sup>(2,10)</sup>	210 <sup>(2,10)</sup>	225 <sup>(2,10)</sup>
11 – 30		3 apports : 40-30-30 %	145 <sup>(2)</sup>	190 <sup>(2,10)</sup>	210 <sup>(2,10)</sup>
<b>Mixtes (31- 69 % de légumineuses)</b>					
31 – 50	Au printemps et après les coupes	1 apport : 100 %	110 <sup>(3)</sup>	140 <sup>(2)</sup>	170 <sup>(2,10)</sup>
50 – 69		2 apports : 60-40 % 3 apports : 40-30-30 %	25-50 <sup>(4,8)</sup>	25-100 <sup>(4,8)</sup>	50-125 <sup>(5,8)</sup>
<b>Légumineuses (≥ 70 % de légumineuses) <sup>(12)</sup></b>					
70 – 89	Au printemps	1 apport : 100 %	0-25 <sup>(6,8)</sup>	0-25 <sup>(7,8)</sup>	0-50 <sup>(7,8)</sup>
90 – 100			0 <sup>(7,8)</sup>	0 <sup>(7,8)</sup>	0 <sup>(7,8)</sup>

Dj<sub>0</sub>: degrés-jours en base 0°C

- (1) Dans le cadre des essais de graminées du PSEF, les doses supérieures ou égales à 100 N étaient fractionnées en deux apports à proportion égale (50-50 %), au printemps et après la 1<sup>re</sup> coupe. Les fractionnements proposés dans ce tableau tiennent compte de la pratique habituellement recommandée sur le terrain.
- (2) Dose correspondant à la borne inférieure de l'intervalle de confiance (95 % du ROM maximal).
- (3) Dose moyenne de l'intervalle Min-Moy (95 % du ROM maximal). La borne inférieure de l'intervalle de confiance (80 N) est jugée trop faible.
- (4) Correspond à la plus petite dose testée et la dose moyenne (95 % du ROM maximal), arrondie au multiple de 5 supérieur.
- (5) Correspond à la borne inférieure de l'intervalle de confiance et à la dose moyenne (95 % du ROM maximal), arrondies au multiple de 5 supérieur.
- (6) Correspond à la borne inférieure (95 % du ROM maximal) et la plus petite dose testée.
- (7) Correspond aux bornes inférieures et supérieures de l'intervalle de confiance (95 % du ROM maximal).
- (8) Considérer l'historique du champ et le potentiel de fixation symbiotique des légumineuses.
- (9) Se référer à la carte des zones du présent document (Figure 4, page 25).
- (10) Les doses de 150 kg N/ha et plus doivent être fractionnées en deux ou trois apports (au printemps et après les coupes) afin d'éviter les risques de toxicité au nitrate et de favoriser un meilleur synchronisme avec les besoins de la plante.
- (11) Dans l'éventualité où les doses les plus élevées de N sont appliquées, une attention particulière doit être portée à la nutrition K, surtout en sols moins bien pourvus en K.
- (12) Pour les prairies de légumineuses, en cas de carence en S (teneur dans la biomasse de récolte inférieure à 0,25 % MS), une dose de 25 kg S/ha de est recommandée pour optimiser le rendement et la qualité nutritive des fourrages.



## Fixation symbiotique de l'azote des légumineuses

Dans le cadre des essais, la nodulation des légumineuses et la quantité de N fixé n'ont pas été évaluées. Les nodules sont des petits renflements des racines où des bactéries du genre *Rhizobium* fixent l'azote de l'air qui peut ensuite être transféré et utilisé par la plante hôte. La présence de nodules n'est cependant pas garante d'une fixation symbiotique efficace. On considère que les *Rhizobium* sont actifs lorsque l'intérieur est de couleur rosée, bien qu'il existe aussi des méthodes plus précises pour dénombrer les *Rhizobium*s. Plusieurs facteurs peuvent influencer la quantité d'azote fixé par la symbiose, notamment l'espèce, les conditions de croissance et la localisation géographique (Unkovich and Pate, 2000; Whitehead, 1995), mais également la bonne bactérie et une nodulation adéquate. Selon les travaux de Carlsson et Huss-Danell (2003), la luzerne serait meilleure fixatrice que le trèfle rouge, lequel fixerait davantage que le trèfle blanc. La quantité de N fixé est également étroitement corrélée à la biomasse produite (Carlsson et Huss-Danell, 2003). Dans des prairies en mélange, l'azote fixé par les légumineuses peut être rendu disponible aux graminées via la décomposition et les exsudats racinaires. De plus, la fixation symbiotique sera freinée dans le cas où une fertilisation azotée est apportée (Salvagiotti et al., 2009; Saito et al., 2014; Schipanski et al., 2010; Reinprecht et al., 2020).

## Prendre en compte le contexte et les besoins du producteur



Les VSRF proposées ont été calculées à partir d'essais dont les espèces dominantes sont la fléole des prés dans les prairies de graminées, et la luzerne dans les prairies de légumineuses. Elles s'appliquent aux producteurs qui ont une régie de foin intensive et où des rendements conséquents sont prévus ( $\geq 8,3$  t/ha pour les prairies de graminées; 11,1 t/ha pour les prairies de légumineuses; voir les rendements de population de tête à la section 2.3.3). Cependant, il est primordial d'ajuster la dose selon la nature de la prairie (permanente, temporaire, présence de légumineuses, espèces), son utilisation et son niveau d'intensification (nombre de coupes, rendements). Par conséquent, une diminution de la dose azotée est envisageable lorsque l'agronome le juge nécessaire, par exemple si d'autres espèces fourragères prédominent, que le producteur n'a pas besoin de maximiser ses rendements ni la qualité de son fourrage, ou encore que les sources fertilisantes sont limitées. Les doses estimées par le modèle correspondant à 90 % du ROM<sub>max</sub> sont proposées à titre d'exemple à la page suivante (Tableau 18). Les VSRF ne doivent cependant pas servir à prévenir de mauvaises pratiques ou un mauvais jugement agronomique.

## Utilisation des coefficients d'efficacité des engrais

Une part significative des prairies fait l'objet d'une fertilisation organique. Cependant, les engrais utilisés lors des essais étaient sous forme minérale avec un coefficient d'efficacité considéré par défaut à 100 %. Dans le cas où les engrais seraient apportés sous une forme organique, il revient à l'agronome d'utiliser les bons coefficients d'efficacité et les bons facteurs de perte, de même que d'informer le producteur sur les bonnes pratiques d'épandage afin d'éviter tout apport excessif et de minimiser les pertes.

À la demande du MAPAQ, un tableau des VSRF à 90 % du ROM est inclus ci-après. Il ne constitue pas une recommandation à adopter de l'IRDA qui juge que l'adoption des VSRF à 95 % du ROM représente le meilleur compromis au regard de la structure des données, du rendement produit et de la qualité atteinte, en comparaison du ROM à 99 %. Par défaut, plus une recommandation s'approche de l'optimum, moins le gain est important par unité de fertilisant apporté. Ainsi, lorsque possible, une relation (quadratique ou linéaire) avec plateau est employée comme modèle, ce qui règle en partie cette problématique. Cependant, tel qu'expliqué à la section 1.7.3, il n'a pas été possible de réaliser une quadratique-plateau avec les données des essais N, car certains sites ne plafonnaient pas. Ainsi, l'adoption de l'exponentielle avec asymptote constitue déjà un choix de compromis qui s'ajoute au choix du ROM à 95 %, et de tous les autres aspects résumés aux pages 21 et 38.

**Tableau 18.** Fertilisation azotée des prairies en production – VSRF basées sur les résultats du modèle à 90 % du ROM<sub>max</sub>



Proportion des légumineuses (%)	Période d'application	Fractionnement (% de la dose totale)	VSRF (kg N/ha)		
			Zone périphérique	Zone intermédiaire	Zone centrale-sud
<b>Graminées (≤ 30 % de légumineuses)</b>					
0 – 10	Au printemps et après les coupes	2 apports : 60-40 %	120	160*	175*
11 – 30		3 apports : 40-30-30 %	80	135	155*
<b>Mixtes (31- 69 % de légumineuses)</b>					
31 – 50	Au printemps et après les coupes	1 apport : 100 %	40	75	105
50 – 69		2 apports : 60-40 %	0-30	0-40	0-50
<b>Légumineuses (≥ 70 % de légumineuses)</b>					
70 – 89	Au printemps	1 apport : 100 %	0	0	0
90 – 100			0	0	0

\* Les doses de 150 kg N/ha et plus doivent être fractionnées en deux ou trois apports (au printemps et après les coupes) afin d'éviter les risques de toxicité au nitrate et de favoriser un meilleur synchronisme avec les besoins de la plante.

**Tableau 19.** Comparaison des recommandations en N pour les prairies en production au Canada et aux États-Unis

Provinces/États	Mode et période d'application	Fractionnement	Indicateurs		Objectif de rendement (t/ha)	% Légumineuses	Dose N (kg/ha)	Source
			Fertilité du sol	Autres				
Québec (CAN)	À la volée	2 coupes: 60 % au printemps + 40 % après 1 <sup>re</sup> coupe.	-	Rapport de productivité (\$/t MS)/(\$/kg N), objectif de rendement	5-10	0-40	75-160	CRAAQ (2010)
		3 coupes : 40 % au printemps + 30 % après 1 <sup>re</sup> coupe + 30 % après 2 <sup>e</sup> coupe		-	7-8	40-100	0-75	

Provinces/États	Mode et période d'application	Fractionnement	Indicateurs		Objectif de rendement (t/ha)	% Légumineuses	Dose N (kg/ha)	Source
			Fertilité du sol	Autres				
Ontario (CAN)	-	Au printemps lorsque la culture commence à verdier, après la 1 <sup>re</sup> coupe et après la 2 <sup>e</sup> coupe	-	Objectif de rendement	-	> 50	0	MAAARO (2017)
						33 - 50	60	
Alberta (CAN)	-	-	-	-	-	0-20	45-134	Agriculture, Food, and Rural Development (2004)
						20-40	34-101	
Provinces de l'Atlantique (CAN)	-	75- 100 kg N /ha au printemps + 75-100 kg N/ha après chaque coupe + 10 kg N/ha après la dernière coupe	-	-	-	0-30	160 (2 coupes) + 75-100 pour chaque coupe supp.	Atlantic Forage and Corn Team (2021)
		50 kg N /ha au printemps + 45 kg N/ha après chaque coupe + 10 kg N/ha après la dernière coupe				30-60	105 (2 coupes) + 45 pour chaque coupe supp.	
		20 kg N /ha au printemps + 0 kg N/ha après la première coupe + 0 kg N/ha après la dernière coupe				60-100	20	
Minnesota (É-U)	À la volée au printemps	Objectif de rendement ≥ 4 t/ac et : 3/4 début printemps + 1/4 fin août	-	-	-	Mélange de légumineuses et de graminées	54	University of Minnesota extension (2018)
	Début printemps et fin août			Objectif de rendement	3 à >12	Graminées	67 - 168	
Vermont (É-U)	-	45 -84 kg N / application	-	-	-	0-30	112-224	University of Vermont Extension (2017)
		0-45 kg N/ha au printemps et 45 kg N/ha en saison				30-60	45-90	
Wisconsin (É-U)	-	-	Teneur en MO	-	1.2-19.8	-	56 -179	Laboski et Peters (2012)

## 3 FERTILISATION PHOSPHATÉE

### 3.1 Portrait et représentativité des données

La répartition des blocs des essais de P à travers les différentes classes de propriétés de sol (0-20 cm) est présentée au Tableau 20. Dans les essais de prairies de graminées, toutes textures de sol confondues, seulement 21 % des sols avaient un pH compris dans la fourchette optimale allant de 6,0 à 7,0 (CRAAQ, 2022) pour les cultures de graminées fourragères au Québec. Les données du Tableau 20 montrent que près du quart (22 %) des sols avaient un pH inférieur à 5,5. Tel que rapporté dans le guide de production des plantes fourragères du CRAAQ (2022), le pH critique pour la production de graminées fourragères est de 5,8 sur les sols sableux et de 5,6 sur les autres types de sols. Ainsi, dans les sols de pH moins de 5,5, une fixation du P Par le Fe et l'Al peut être attendue, entraînant une baisse de la disponibilité de cet élément pour la culture. En effet, la biodisponibilité du P dans le sol dépend grandement du pH du sol et la plus forte solubilité du P dans les sols minéraux se situe entre les pH 6,2 et 7,0 (Parent et al., 2002).

Les essais P des prairies de graminées ont été réalisés majoritairement sur des sols de textures fines (G1; 63 %), suivis par les sols de textures moyennes (G2; 27 %). Ainsi, très peu d'essais ont eu lieu sur des sols de textures grossières (G3; 9 %). La mauvaise répartition des sites d'essais à travers les groupes de texture de sol peut également influencer les résultats des analyses, la texture des sols étant un paramètre déterminant sur leur capacité physico-chimique à fixer et à retenir le P (Vézina et al., 2000). Toutefois, plus de 80 % des blocs de sol G1 (Tableau 20) étaient non saturés en P. Toutes textures de sol confondues, l'indice de saturation en P ( $ISP_1 = P_{M3}/Al_{M3} \times 100 \%$ ) a varié entre 0,5 et 22,3 %. Dans les sols G1, presque la totalité (96 %) des blocs avait un  $ISP_1$  inférieur au seuil critique environnemental de saturation en P de 7,6 % du règlement sur les exploitations agricoles (REA) (MDDEP, 2010). De même, dans respectivement 77 et 100 % des blocs des sols G2 et G3, les taux de saturation en P des sols étaient inférieurs au seuil critique de 13,1 % du REA. Pour ces deux derniers groupes de textures, environ la moitié des sols (G2 : 43 % et G3 : 57 %) avait un  $ISP_1$  inférieur à 6,5 %. Enfin, toutes textures confondues, presque la totalité des blocs des essais (92 %) avait une teneur en  $P_{M3}$  inférieure à 100 ppm.

Dans les essais de prairies de légumineuses, les pH des sols ont été globalement adéquats pour une bonne disponibilité du P aux plantes. En effet, pour les essais de légumineuses, un pH inférieur à 6,0 a été mesuré dans seulement 15 % des sols et aucun sol n'a eu un pH inférieur à 5,5. En revanche, la grande majorité des sols (près de 85 %) ont eu un pH proche de l'intervalle optimal allant de 6,2 et 7,0 pour une bonne croissance de la luzerne au Québec (CRAAQ, 2022). Une bonne répartition des sols à travers les groupes de texture a été obtenue avec 39 % des sols ayant une texture fine (G1), 39 % une texture moyenne (G2) et 23 % une texture grossière (G3). Toutes textures de sol confondues, l' $ISP_1$  des sols a varié entre 1,0 et 18,9 %, dont 80 % des blocs avaient un  $ISP_1$  inférieur au seuil de 7,6 % du REA dans les sols G1. Dans les sols G2 et G3, respectivement 100 et 66 % des blocs ont eu un  $ISP_1$  inférieur au seuil critique de 13,1 % du REA.

Contrairement aux deux précédents types de prairies, pour les prairies mixtes, les sites d'essais ont eu un pH situé dans la fourchette optimale de croissance (6,5 à 7,0) dans 57 % des blocs et entre 6,0 et 6,5 dans 32 % des blocs. Finalement, très peu de données ont été disponibles pour les prairies mixtes, soit trois sites d'essais de textures moyennes (G2), de teneurs en P inférieures à 100 ppm et d' $ISP_1 < 13,1 \%$ . L' $ISP_1$  des sols pour cette catégorie de prairies variait entre 3,8 et 13,1 %.

**Tableau 20.** Répartition des blocs des essais P des prairies en production selon différentes classes de propriétés de sol après la validation des données.

pH <sub>eau</sub> <sup>(1)</sup>	Bloc (%)	ISP <sub>1</sub>		ISP <sub>1</sub>			P <sub>M3</sub> (ppm)	Bloc (%)	Groupe de textures <sup>(3)</sup>	Bloc (%)
		(%) <sup>(2)</sup>	Blocs (%) G1	(%) <sup>(2)</sup>	G2	G3				
<b>Graminées (≤ 30 % de légumineuses)<sup>(4)</sup></b>										
≤ 5,5	22	≤ 3,8	82	≤ 3,8	10	0	≤ 50	75	G1	63
5,5 – 6,0	25	3,8 – 7,6	12	3,8 – 6,5	33	57	50 – 100	17	G2	27
6,0 – 6,5	22	7,6 – 15,2	2	6,5 – 13,1	34	43	100 – 200	8	G3	9
6,5 – 7,0	21	> 15,2	4	13,1 – 20	14	0	200 – 300	0	-	-
> 7,0	9	-	-	> 20	10	0	> 300	0	-	-
<b>Mixtes (31 à 69 % de légumineuses)<sup>(4)</sup></b>										
≤ 5,5	0	≤ 3,8	0	≤ 3,8	0	0	≤ 50	66	G1	0
5,5 – 6,0	11	3,8 – 7,6	0	3,8 – 6,5	34	0	50 – 100	34	G2	100
6,0 – 6,5	32	7,6 – 15,2	0	6,5 – 13,1	66	0	100 – 200	0	G3	0
6,5 – 7,0	57	> 15,2	0	13,1 – 20	0	0	200 – 300	0	-	-
> 7,0	0	-	-	> 20	0	0	> 300	0	-	-
<b>Légumineuses (≥ 70 % de légumineuses)<sup>(4)</sup></b>										
≤ 5,5	0	≤ 3,8	40	≤ 3,8	7	0	≤ 50	44	G1	39
5,5 – 6,0	15	3,8 – 7,6	40	3,8 – 6,5	47	32	50 – 100	41	G2	39
6,0 – 6,5	51	7,6 – 15,2	20	6,5 – 13,1	47	34	100 – 200	15	G3	23
6,5 – 7,0	34	> 15,2	0	13,1 – 20	0	34	200 – 300	0	-	-
> 7,0	0	-	-	> 20	0	0	> 300	0	-	-

(1) Le pH optimal est de 6,0 à 7,0 pour les prairies de graminées et de 6,2 à 7,0 (G1, G2) ou 6,5 à 7,0 (G3) pour la luzerne (CRAAQ, 2022).

(2) ISP<sub>1</sub> : indice de saturation en phosphore =  $P_{M3}/Al_{M3} \times 100$  %, éléments extraits au Mehlich-3 (Mehlich, 1984).

(3) G1 : sols à texture fine; G2 : sols à texture moyenne; G3 : sols à texture grossière.

(4) Prairie de graminées : 21 sites (64 blocs); prairies mixtes : 3 sites (9 blocs); prairies de légumineuses : 13 sites (39 blocs).

## 3.2 Détermination des doses agronomiques optimales

### 3.2.1 Recherche d'indicateurs de fertilité du sol

Dans la littérature scientifique, plusieurs indicateurs ont le potentiel de prédire la biodisponibilité du P du sol et la réponse à la fertilisation phosphatée des cultures (Menon et Chien, 1995; Parent et al., 2002; Khiari et Parent, 2005). Parmi ces indicateurs, le P<sub>M3</sub>, l'ISP<sub>1</sub>, le pH<sub>eau</sub> et la teneur en argile du sol ont été vérifiés avec le test de Cate-Nelson (1971). Lorsque possible, ces indicateurs ont été testés à l'intérieur des groupes de textures G1, G2 et G3. Dans le but d'alléger la présentation des résultats, seuls les paramètres statistiques des principaux indicateurs dont la valeur de P est inférieure à 0,12 sont présentés (Tableau 21). Parmi les indicateurs de fertilité testés, l'indice de saturation en P (ISP<sub>1</sub>), un meilleur indicateur de la biodisponibilité du P que le P<sub>M3</sub> seul (Khiari et al., 2000), a été le plus performant afin de prédire la réponse à la fertilisation phosphatée des prairies de légumineuses et de graminées.

La fertilisation en P a montré un faible effet sur la production de rendement des prairies en production, peu importe la composition botanique (voir section 3.2.2). Tous les types de prairies confondus, 85 % ou plus du potentiel de rendement (rendements relatifs > 85 %) de la culture ont été atteints dans 73 % des blocs des essais (Graminées : 75 % et légumineuses 66 %) sans apport d'engrais. Toutefois, les sols G2G3 étaient quasi absents des sols les moins bien pourvus en P (sous 3,8 % d'ISP). Une meilleure répartition des données aurait peut-être permis de dégager des seuils pour chaque groupe de texture et de mesurer davantage de réponse. Cela dit, dans une étude sur des prairies de graminées, Giroux et Lemieux (2000) ont également rapporté une faible réponse des prairies de graminées à la fertilisation en P avec des rendements relatifs variant entre 87,3 % et 94,1 %. Selon la littérature, une faible réponse à fertilisation phosphatée serait attendue dans les prairies en production, cet élément étant plus essentiel lors de l'année d'établissement de la prairie

principalement en raison de l'importance de cet élément dans la croissance racinaire (Forage and Corn Variety Evaluation Task Group Atlantic Canada, 2014). Peu d'études au Québec font mention de l'effet du P sur les rendements des prairies de légumineuses.

Le test de Cate-Nelson montre des seuils de réponse similaires indépendamment des types de prairies et des groupes de textures de sol considérés (Tableau 21). Toutes textures confondues, le seuil d'ISP<sub>1</sub> critique est de 4,8 % dans les prairies de graminées et de 5,3 % dans celles de légumineuses. Dans les prairies de légumineuses, lorsque les sols du groupe de textures G1 étaient considérés seuls, le seuil d'ISP<sub>1</sub> critique était de 4,8 %, tandis que, dans les sols G2-G3, aucun seuil n'a été obtenu. Inversement, pour les prairies de graminées, aucun seuil de réponse n'a été obtenu dans les sols G1, tandis que, dans ceux G2-G3, le seuil d'ISP<sub>1</sub> critique était de 5,4 %. En raison de la faible quantité de données disponibles pour les prairies mixtes (31 % à 69 % de légumineuses), aucun seuil de réponse à la fertilisation en P n'a pu être déterminé.

**Tableau 21.** Valeurs critiques des indicateurs potentiels de sols significatifs selon les tests de Cate-Nelson pour les essais P de prairies

Indicateur de sol	Type de prairies	Groupes de textures <sup>(2)</sup>	N <sub>obs</sub> <sup>(3)</sup>	Valeur critique (%)	RRel <sup>(4)</sup>	Sensitivité	Spécificité	Précision	Valeur de P
ISP <sub>1</sub> <sup>(1)</sup>	Graminées (≤ 30 % de lég.)	G1- G2- G3	80	4,8	0,87	0,36	0,83	0,50	0,114
		G2- G3	27	5,4	0,82	0,70	1,00	0,74	0,019
	Légumineuses (≥ 70 % de lég.)	G1- G2- G3	38	5,3	0,84	0,68	0,62	0,66	0,098
		G1	15	4,8	0,82	0,70	0,80	0,73	0,119

(1) ISP<sub>1</sub> : indice de saturation en phosphore =  $P_{M3}/Al_{M3} \times 100$  %, éléments extraits au Mehlich-3 (1984).

(2) G1 : sols à texture fine; G2 : sols à texture moyenne; G3 : sols à texture grossière.

(3) N<sub>obs</sub> : nombre d'observations.

(4) RRel : Rendement relatif (100 % × rendement du témoin/rendement maximum par bloc).

### 3.2.2 Effet de la dose de phosphore sur le rendement

Les analyses de l'effet de l'apport de P sur le rendement total (sommées de toutes les coupes) de la saison ont été réalisées par types de prairies et selon le niveau de saturation en P du sol. Ainsi, les analyses ne tiennent pas compte de la texture du sol puisque, tel que rapporté à la section précédente (section 3.2.1), il n'a pas été possible d'obtenir des seuils spécifiques à chaque groupe de texture. Tel que mentionné dans la section 1.7.3, afin de pallier aux problèmes d'hétérogénéité de la variance, les régressions ont été réalisées en utilisant les logarithmes naturels des rapports de rendements (ROM). De même, la standardisation des doses a été effectuée afin de résoudre les problèmes de colinéarité. Les résultats des régressions linéaire ou quadratique sont présentés au Tableau 22. À partir des deux seuils d'ISP<sub>1</sub> de 4,8 %, et de 5,3 % obtenus respectivement dans les prairies de graminées et de légumineuses, lors des tests de Cate-Nelson, quatre classes de fertilité de sol ont été déterminées en appliquant une procédure modifiée de la méthode de Cope-Rouse. Pour ce faire, les deux seuils d'ISP<sub>1</sub> critiques obtenus lors du test de Cate-Nelson ont donc été multipliés par 2 et par 3.

Dans les essais de prairies de graminées, un effet quadratique statistiquement significatif des doses de P a été obtenu dans les sols ayant un ISP<sub>1</sub> inférieur à 9,6 % (Tableau 22). L'apport de P par fertilisation a donc eu un effet significatif sur les ROM de la culture pour la classe de sols d'ISP<sub>1</sub> inférieur au seuil de réponse agronomique de 4,8 % et pour la classe de sols situés entre ce seuil et le double de celui-ci (ISP<sub>1</sub> compris entre 4,8 et 9,6 %). Pour les sols ayant un ISP<sub>1</sub> situé en dessous du seuil de 4,8 % ( $P = 0,028$ ), les résultats montrent une dose agronomique optimale de 71 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha, avec une variation allant de 50 à 93 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha. L'apport de cette dose optimale entraîne un gain de rendement de 5 % (ROM de 1,05). Ces résultats sont similaires à ceux de Giroux et Lemieux (2000) qui ont rapporté sur trois saisons une dose optimale moyenne de 50 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha pour un gain moyen de 6,6% (soit près de 1 T) pour un sol ayant un ISP<sub>1</sub> de 3,9 %. Parent et al. (1997) recommandent également un apport de 60 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha dans la production de prairies de graminées, en conditions de sols pauvres en P (25 à 63 kg/ha de P<sub>M3</sub>, correspondant à un ISP<sub>1</sub> de 1,0 à 2,6 % si on considère une teneur en Al de

1100 ppm). Tel qu'observé dans la présente étude, ces derniers auteurs ont également rapporté que l'effet des apports de P sur le rendement des prairies de graminées reste plutôt faible. À l'inverse, aucun effet de l'apport de P sur le rendement n'a été observé par Bélanger et Ziadi (2008) dans un sol pauvre en P (54 kg/ha de  $P_{M3}$ , correspondant à un  $ISP_1$  de 2,2 % si on considère une teneur en Al de 1100 ppm). Plusieurs autres études (Parent et al., 1997, Grant et MacLean, 1966) ont observé une légère augmentation des rendements à la suite de l'ajout de P, uniquement après la 3<sup>e</sup> année d'essais.

Dans les sols ayant un  $ISP_1$  compris entre 4,8 et 9,6 %, une forte tendance à un effet quadratique ( $P = 0,051$ ) des doses sur les ROM a été obtenue (Tableau 22). Toutefois, le patron d'évolution des rendements selon les doses de P appliquées formait une parabole de forme convexe. Pour ces sols, les bornes de doses optimales étaient donc de 37 et 63 kg  $P_2O_5$ /ha, avec un creux (ROM minimal de 0,94) à la dose de 50 kg  $P_2O_5$ /ha. Une telle diminution du ROM à la suite de l'apport d'engrais phosphatés complètement hydrosolubles est non attendue en contexte de fertilisation minérale des sols, car la fertilisation phosphatée n'est pas reconnue pour des effets de toxicité, surtout à cette dose. Cette observation pourrait donc être due à un biais de mesure ou expérimental. Ainsi, considérant que le modèle indique que l'apport de moins de 37 ou de plus de 63 kg  $P_2O_5$ /ha donne des rendements équivalents, dans un contexte agroenvironnemental, la dose de 37 pourrait être recommandée. Finalement, au-delà d'un  $ISP_1$  de 9,6 %, aucun effet linéaire ou quadratique significatif des doses de P n'a été observé sur les ROM, suggérant que la plante serait en condition non limitante de P, même sans apport d'engrais phosphatés (Tableau 22).

**Tableau 22.** Résultats des régressions sur la réponse des prairies de graminées et de légumineuses aux doses croissantes de  $P_2O_5$

Classe de fertilité $ISP_1$ (%) <sup>(1)</sup>	$N_{site}$	$N_{obs}$	Paramètre du modèle <sup>(2)</sup>						Dose <sub>max.</sub> testée (kg $P_2O_5$ /ha)	Dose de $P_2O_5$ (kg/ha)			ROM
			a	err-t	Valeur de P	b	err-t	Valeur de P		Min	Max	Optim.	
<b>Graminées (≤ 30 % de légumineuses)</b>													
a) ≤ 4,8	15	208	-0,009	0,004	<b>0,028</b>	0,005	0,005	0,264	120	50	93	71	1,05
b) 4,8-9,6 <sup>(3)</sup>	6	36	0,026	0,011	<b>0,051</b>	0,020	0,013	0,152	100	37	63	50	0,94
c) 9,6-14,4	4	28	0,009	0,014	0,557	0,010	0,015	0,556	100	.	.	.	.
d) ≥ 14,4	3	24	-0,004	0,016	0,828	-0,014	0,019	0,494	100	.	.	.	.
<b>Mixtes (31- 69 % de légumineuses)</b>													
Données en quantité insuffisante													
<b>Légumineuses (≥ 70 % de légumineuses)</b>													
a) ≤ 5,3 <sup>(4)</sup>	6	63	.	.	.	0,001	0,064	<b>&lt; 0,001</b>	100	100	100	100	1,08
b) 5,3-10,5	6	46	-0,018	0,008	<b>0,054</b>	-0,015	0,012	0,245	100	40	64	52	1,07
c) 10,5-15,8	3	30	0,005	0,010	0,633	0,016	0,014	0,303	100	.	.	.	.
d) ≥ 15,8	1	12	0,000	0,007	0,996	0,017	0,017	0,490	100	.	.	.	.

$N_{site}$  : nombre de sites;  $N_{obs}$  : nombre d'observations; Min et Max : bornes inférieure et supérieure de l'intervalle de confiance à 95 %. na : non applicable; Optim : dose optimale pour l'atteinte de 100 % du ROMmax.

(1)  $ISP_1$  : indice de saturation en phosphore =  $P_{M3}/Al_{M3} \times 100$  %, éléments extraits au Mehlich-3 (1984).

(2) Modèle de type quadratique :  $\text{Log}(\text{ROM}) = a \times \text{dose}^2 + b \times \text{dose} + c$

(3) Pour cette catégorie de sol, la parabole est de forme convexe. Les doses optimales calculées à partir du modèle correspondent donc à celles qui entraînent des minimums de gain de rendement.

(4) Pour cette catégorie de sols, le modèle quadratique n'était pas significatif. Un modèle linéaire a donc été utilisé, car une forte tendance à une augmentation linéaire du rendement a été observée à la suite de l'application des doses croissantes de P sans atteindre un plateau.

Dans les prairies de légumineuses, tel que pour les prairies de graminées, l'apport de P par fertilisation a influencé significativement les ROM de la culture uniquement lorsque l'ISP<sub>1</sub> du sol était inférieur au double du seuil de réponse agronomique de 5,3 %. Ainsi, pour les sols les plus faiblement saturés ( $\leq 5,3$  %), un effet linéaire statistiquement significatif des doses de P a été obtenu (Tableau 22). Dans la classe suivante de sols (5,3-10,5 %), un effet quadratique a été obtenu. Plusieurs études de la littérature (Lissbrant et al., 2009; Berg et al., 2005, 2007; Simons et al., 1995) ont également rapporté un effet significatif de la fertilisation phosphatée sur le rendement des légumineuses comme la luzerne dans les sols ayant une faible teneur en P. Dans le cas des sols ayant un ISP<sub>1</sub> inférieur à 5,3 %, les résultats montrent une forte tendance ( $P = 0,064$ ) à un effet linéaire de la dose de P sur le ROM. Ainsi, aucun plafond de gain n'a été atteint dans cette catégorie de sol, même avec la plus forte dose testée, indiquant qu'un apport supplémentaire de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> pourrait augmenter davantage les rendements de la culture. La plus forte dose testée, soit 100 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha, est cependant la dose retenue puisque la réponse demeure inconnue au-delà de ce point et le gain de rendement associé à l'application de cette dose est de 8 %. Pour un ISP<sub>1</sub> compris entre 5,3 et 10,5 %, une forte tendance à un effet quadratique ( $P = 0,054$ ) des doses a été obtenue (Tableau 22) avec une dose optimale de 52 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha (sommet de courbe), permettant un gain de rendement de 7 % par rapport au traitement témoin. Pour ces sols, la dose optimale selon l'intervalle de confiance à 95 % varie entre 40 et 64 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha. Finalement, au-delà d'un ISP<sub>1</sub> de 10,5 %, les doses de P n'a eu aucun effet sur les ROM.

### 3.2.3 Diagnostic nutritionnel et exportations en phosphore

Les valeurs d'humidité, de concentrations et d'exportations en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> calculées pour les prairies de graminées et de légumineuses en fonction du diagnostic nutritionnel sont présentées au Tableau 23 et à la Figure 8. Ces calculs ont été effectués sur la partie aérienne de la plante, fauchée à une hauteur de 5 à 7 cm du sol. Seuls les résultats pour la 1<sup>re</sup> coupe et le rendement total de la saison, soit la somme des rendements mesurés pour toutes les coupes, sont présentés. Le nombre de coupes a varié entre 2 et 4 selon le type de prairies et la région de réalisation des essais (voir Tableau 1, p. 12).



**Tableau 23.** Concentrations et exportations en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> des prairies de graminées et de légumineuses selon le diagnostic nutritionnel

	Humidité <sup>(1)</sup>			Exportations <sup>(2)</sup>			
	(%)	(kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /t)		(kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)			
		Moy	Éc-T	Moy	Med	Min	Max
<b>Graminées (≤ 30 % de légumineuses)</b>							
<b>1<sup>re</sup> coupe</b>							
Haut rendement et équilibre nutritionnel (« population de tête »)	6	<b>7,1</b>	0,4	<b>33</b>	32	28	37
Faible rendement et équilibre nutritionnel	6	6,8	0,2	24	25	17	26
Faible rendement et déséquilibre nutritionnel	6	7,2	1,0	19	19	9	30
Haut rendement et déséquilibre nutritionnel	7	6,5	1,3	31	29	24	47
<b>Total de la saison</b>							
Haut rendement et équilibre nutritionnel (« population de tête »)	7	<b>7,7</b>	1,1	<b>64</b>	64	45	89
Faible rendement et équilibre nutritionnel	7	7,7	0,9	50	53	30	61
Faible rendement et déséquilibre nutritionnel	6	7,0	0,9	39	37	22	66
Haut rendement et déséquilibre nutritionnel	6	6,5	1,1	58	55	44	90
<b>Légumineuses (≥ 70 % de légumineuses)</b>							
<b>1<sup>re</sup> coupe</b>							
Haut rendement et équilibre nutritionnel (« population de tête »)	6	<b>8,7</b>	0,8	<b>37</b>	36	31	47
Faible rendement et équilibre nutritionnel	7	9,2	0,7	37	37	30	44
Faible rendement et déséquilibre nutritionnel	7	7,6	1,8	29	29	21	48
Haut rendement et déséquilibre nutritionnel	6	7,9	1,4	34	35	31	38
<b>Total de la saison</b>							
Haut rendement et équilibre nutritionnel (« population de tête »)	6	<b>7,9</b>	0,8	<b>87</b>	86	75	106
Faible rendement et équilibre nutritionnel	7	8,6	-	80	80	80	80
Faible rendement et déséquilibre nutritionnel	8	7,7	1,8	67	75	43	91
Haut rendement et déséquilibre nutritionnel	6	5,6	0,3	61	61	56	67

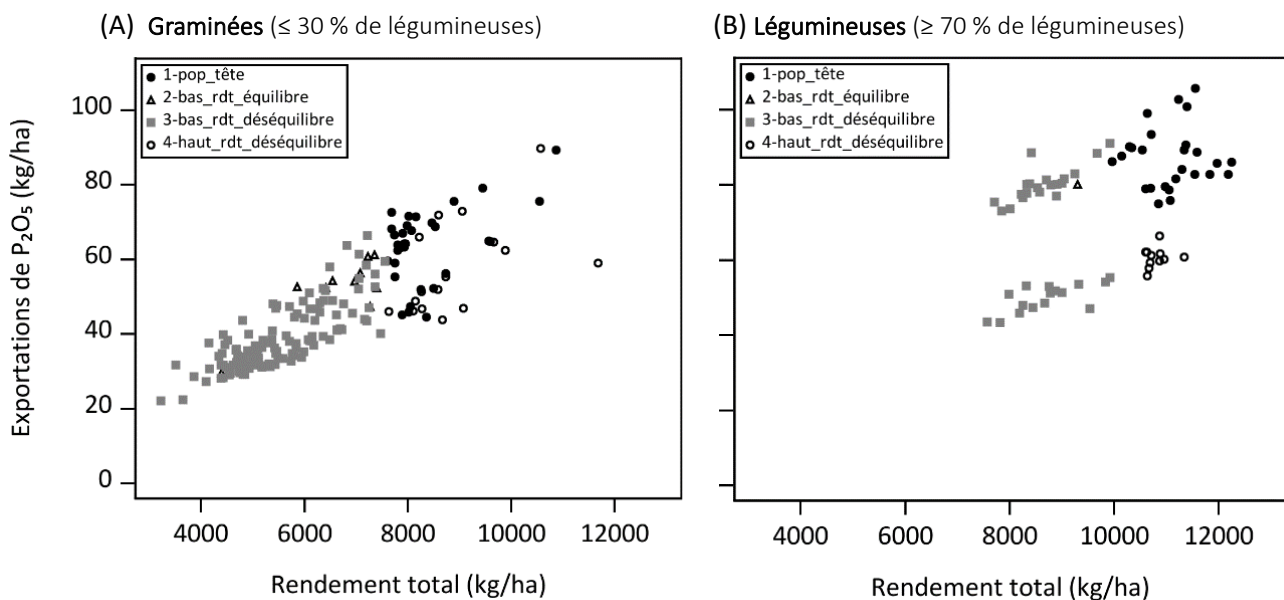
(1) Humidité après séchage à 55 °C pendant au moins 48 h, jusqu'à un poids constant.

(2) Moy : moyenne; Éc-T : Écart-type; Med : médiane; Min : valeur minimale; Max : valeur maximale.

Pour les prairies à prédominance de graminées (≤ 30 % légumineuses), pour la 1<sup>re</sup> coupe, la concentration en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> de la population présentant à la fois de hauts rendements et une composition nutritionnelle équilibrée (population de tête) a été en moyenne de 7,1 ± 0,4 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/t de fourrage stabilisée à 6 % d'humidité. Considérant un rendement de 4 575 kg/ha, les exportations de la 1<sup>re</sup> coupe étaient en moyenne de 33 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha. Pour l'ensemble de la saison, la population de tête a eu une concentration moyenne de 7,7 ± 1,1 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> par tonne de fourrage (7% d'humidité). Les exportations moyennes de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> de ces prairies pour la saison sont de 64 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha pour un rendement total de 8 294 kg/ha (7 % d'humidité), avec des valeurs qui varient entre 45 à 89 kg/ha de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Pour de plus faibles rendements (sous-groupe d'individus à faible rendement et à l'équilibre nutritionnel; 6 484 kg /ha (7 % d'humidité)), les exportations saisonnières ont été en moyenne de 50 kg/ha de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Les résultats montrent qu'en moyenne, les exportations de la première coupe comptent pour la moitié de la quantité totale de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> exportée par la prairie pour la saison de production, les rendements de la première coupe représentant un peu plus de la moitié du rendement total moyen de la saison. La concentration mesurée dans la présente étude est comparable, bien que légèrement supérieure à la valeur moyenne (3 coupes) de 7,4 ± 1,1 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/t MS présentée dans l'actuel guide de référence en fertilisation du CRAAQ (2010), correspondant à 6,9 ± 1,0 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/t humide lorsque rapportée à 7 % d'humidité. Selon le CRAAQ (2022), le seuil de suffisance en P, défini comme étant celui permettant l'atteinte de 90 % ou plus du rendement potentiel dans les principales prairies de graminées cultivées au Québec varie entre 2,4 à 3,6 kg/t de MS. Ce seuil a été largement dépassé dans le cadre de cette étude, expliquant le faible taux de réponse observé lors des essais.

Pour les prairies à prédominance de légumineuses (70 % de légumineuses et plus), pour la 1<sup>re</sup> coupe, la concentration en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> de la population de tête a été en moyenne de 8,7 ± 0,8 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/t de fourrage stabilisé à 6 % d'humidité. Considérant un rendement de 5 525 kg/ha, les exportations de la 1<sup>re</sup> coupe étaient en moyenne de 37 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha. Pour le total de la saison, la concentration en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> de la population de tête a été similaire aux prairies de graminées, soit en moyenne de 7,9 ± 0,8 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> par tonne de fourrage stabilisé à 6 % d'humidité. Pour ces prairies et pour un rendement total de 11 092 kg/ha (6 % d'humidité), les exportations ont varié entre 75 et 106 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha, avec une moyenne de 87 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Pour de plus faibles rendements (9 296 kg/ha (7 % d'humidité)), les exportations ont été similaires (80 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha) à celles de la population de tête. De même que pour les prairies de graminées, les exportations en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> des prairies de légumineuses pour la première coupe représentent près de la moitié de la quantité totale exportée au cours de la saison. De même, la moitié du rendement total de la saison a été récolté au cours de la première coupe. La concentration mesurée dans la présente étude est légèrement supérieure à la valeur moyenne (3 coupes) de 6,8 ± 1,1 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/t MS présentée dans l'actuel guide de référence en fertilisation du CRAAQ (2010), correspondant à 6,4 ± 1,0 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/t humide, lorsque rapporté à 6 % d'humidité. De même que pour les prairies de graminées, le seuil de suffisance en P dans les principales prairies de légumineuses cultivées au Québec (3,2 à 4,4 kg/t de MS) a été largement dépassé dans le cadre de cette étude.

Les données de la Figure 8 montrent que dans les prairies de graminées, les exportations en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ont varié entre 22 et 110 kg/ha et qu'elles ont augmenté de façon assez linéaire avec les rendements. Pour les prairies de légumineuses, les exportations montrent une plus faible corrélation avec les rendements. Pour ces prairies, considérant un rendement similaire, les exportations peuvent varier jusqu'au double selon le site.



**Figure 8.** Exportations de phosphore des prairies de graminées (A) et de légumineuses (B) en fonction des rendements de la saison stabilisés à 6-8% d'humidité, selon le diagnostic nutritionnel.

### 3.2.4 Fertilisation phosphatée proposée et comparaison avec les recommandations au Canada et à l'étranger

Les valeurs scientifiques de référence en fertilisation (VSRF) de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> proposées pour les prairies en production de graminées et de légumineuses sont présentées au Tableau 24. Ces VSRF reposent sur l'effet des doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> sur les rendements et sur la valeur nutritive des fourrages (voir la section 7.3). Dans les deux types de prairies, la fertilisation phosphatée n'a pas entraîné de différence significative sur les paramètres de la qualité nutritive des fourrages étudiés.

Ainsi, aucun ajustement aux VSRF n'a été effectué sur cette base. En dépit de l'absence d'effet significatif de la texture du sol sur la réponse des prairies à la fertilisation phosphatée, les seuils environnementaux du REA ont été considérés dans le cadre de la proposition des VSRF afin de maintenir le P des sols à un niveau adéquat pour la croissance de la culture tout en atténuant les risques au niveau environnemental. La distinction des classes de fertilité de sol est donc basée sur les groupes de textures et l'indice de saturation en phosphore des sols ( $ISP_1$ ), influençant significativement la dynamique du P et donc sa disponibilité dans les sols du Québec (Giroux et al., 2002; Parent et al., 2002). Le choix de l' $ISP_1$  comme indicateur, en lieu et place du  $P_{M3}$ , découle du fait que l' $ISP_1$  ( $P_{M3}/Al_{M3}$ ) est un indicateur agroenvironnemental plus fiable et plus performant que la seule considération du  $P_{M3}$  afin d'évaluer la disponibilité du P (Khiari et al., 2000). Cela permet de favoriser la protection de l'environnement en réduisant les risques de pertes de P des sols agricoles vers les ressources en eaux souterraines et de surface. En raison de l'absence de données en quantité suffisante pour les prairies mixtes (trois sites uniquement), aucune analyse statistique n'a pu être effectuée pour la détermination des doses optimales.

Pour les prairies de graminées, quatre classes de fertilité de sol ont été distinguées par groupe de textures de sol (G1 vs G2-G3). Dans les sols de textures fines (G1), les classes de fertilité suivantes ont été déterminées selon l' $ISP_1$  : 1) inférieur ou égal à 4,8 % (seuil agronomique), 2) entre 4,9 et 7,6 % (seuil environnemental du REA), 3) entre 7,7 et 9,6 % (double du seuil) et 4) supérieur à 9,6 %. Dans les sols de textures moyennes (G2) et grossières (G3), les classes de fertilité sont les suivantes : 1) inférieur ou égal à 4,8 % (seuil agronomique), 2) entre 4,9 et 9,6 % (double du seuil), 3) entre 9,7 et 13,1 % (seuil environnemental du REA) et 4) supérieur à 13,1 %.

Dans les deux grands groupes de textures (G1 et G2-G3), pour la première classe de fertilité regroupant les sols ayant un  $ISP_1$  égal ou inférieur à 4,8 %, la dose optimale de 71 kg  $P_2O_5$ /ha est proposée. Celle-ci correspond à la dose minimale de  $P_2O_5$  permettant l'atteinte du ROM maximal du modèle quadratique. Pour cette catégorie de sol très peu ou peu saturé en P, l'apport de 71 kg/ha est jugé suffisant pour couvrir les besoins en  $P_2O_5$  de la culture, cette valeur étant supérieure aux exportations moyennes, lesquelles sont de 64 kg  $P_2O_5$ /ha pour une variation allant de 45 à 89 kg  $P_2O_5$ /ha (Tableau 22). Comme la quasi-totalité des données de cette catégorie appartiennent au groupe G1, il est possible qu'une VSRF calculée uniquement sur des sols G2-G3 de moins de 4,8 % d' $ISP_1$  ait entraîné une réponse plus forte. Toutefois, sur la base des résultats actuels, cet apport est considéré permette un bilan équilibré afin d'éviter une baisse du P disponible à la suite de la transformation du P dans le sol et des exportations par la plante. Cette dose est proche de celle de 60 kg  $P_2O_5$ /ha recommandée par Parent et al. (1997) sur les sols pauvres en P (25 à 63 kg/ha de  $P_{M3}$ , correspondant à un  $ISP_1$  de 1,0 à 2,6 % si on considère une teneur en Al de 1100 ppm). Selon ces derniers auteurs, cet apport permettrait, en plus de garantir un rendement acceptable en fourrages, de combler les exportations en P de la culture et de maintenir les réserves en P du sol.

Entre un  $ISP_1$  de 4,9 et 9,6 %, tant dans les sols G1 que dans ceux G2-G3, les prairies de graminées ont montré une faible réponse à la fertilisation en P. La parabole de régression étant convexe, l'optimum indique un ROM minimal à la dose de 50 kg  $P_2O_5$ /ha avec un intervalle de confiance (IC) de 37 à 63 kg. Comme les deux bornes de l'IC mènent à un ROM équivalent, la plus petite des deux doses est recommandée, soit 37 kg/ha de  $P_2O_5$ . Dans les sols G1, cet apport est proposé jusqu'au seuil d' $ISP_1$  environnemental du REA qui est de 7,6 %, tandis que dans ceux G2- G3 le double du seuil agronomique de 9,6 % est maintenu. Cet apport permettrait, entre autres, de réduire les risques de diminution rapide des réserves en P, particulièrement dans les sols non saturés en P. En effet, Giroux et Lemieux (2000) rapportent une diminution des réserves en P des sols de 30 kg P/ha en absence de fertilisation en P. Pour les troisièmes classes de fertilité regroupant les sols ayant un  $ISP_1$  compris entre 7,7 et 9,6 % et entre 9,7 et 13,1 %, respectivement, dans les sols G1 et G2-G3, la plus petite dose testée dans ces catégories de sols (25 kg  $P_2O_5$ /ha) est recommandée en absence de réponse à la fertilisation. En raison de l'atteinte du seuil de saturation en P dans les sols G1, un apport nul est également suggéré pour cette catégorie de sols, considérant l'absence probable de gain par la fertilisation. Finalement, dans les dernières classes de fertilité, regroupant les sols ayant un  $ISP_1$  supérieur à 9,6 % et à 13,1 % dans les sols G1 et G2-G3 respectivement, une dose nulle est suggérée, considérant l'absence de gain de rendement suivant des apports d'engrais sur ces sols saturés en P.

De même que pour les prairies de graminées, quatre classes de fertilité de sol ont été distinguées dans les prairies de légumineuses selon l'ISP<sub>1</sub> pour chacun des grands groupes de textures de sols (G1 vs G2-G3). Dans les sols à textures fines (G1), les classes de fertilité suivantes ont été déterminées : 1) ISP<sub>1</sub> inférieur ou égal à 5,3 % (seuil agronomique), 2) entre 5,4 et 7,6 % (seuil environnemental du REA), 3) entre 7,7 et 10,5 % (double du seuil agronomique) et 4) supérieur à 10,5 %. Dans les sols de textures moyennes (G2) et grossières (G3), les classes de fertilité sont les suivantes : 1) inférieur ou égal à 5,3 %, 2) entre 5,4 et 10,5 %, 3) entre 10,6 % et 13,1 % et 4) supérieur à 13,1 %. En dessous d'un ISP<sub>1</sub> de 5,3 %, la dose de 100 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha est proposée, soit la plus forte dose testée dans cette catégorie de sol, puisqu'aucun plateau de rendement n'a été atteint (régression linéaire) et que la dose optimale demeure donc inconnue. Cette dose permet de couvrir la borne maximale des exportations qui varient de 75-106 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha. Dans les sols G1 ayant entre 5,4 et 7,6 % d'ISP<sub>1</sub> ou dans les sols G2-G3 ayant entre 5,4 et 10,5 % d'ISP<sub>1</sub>, un apport optimal de 52 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha, donnant 7 % de gain moyen, est proposé. Pour les troisièmes classes de fertilité regroupant les sols ayant un ISP<sub>1</sub> entre 7,7 % et 10,5 % dans les sols G1 et entre 10,6 et 13,1 % dans ceux G2-G3, la plus petite dose testée, soit un apport de 25 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha, est recommandée en absence de réponse à la fertilisation. Tel que mentionné précédemment pour les prairies de graminées, un apport nul est également suggéré dans les sols G1, considérant l'absence probable de gain par la fertilisation sur ces sols saturés en P. Finalement, comme pour les prairies de graminées, une dose nulle est suggérée dans la dernière classe de fertilité des sols ayant un ISP<sub>1</sub> supérieur à 10,6 % (sols G1) ou à 13,1 % (sols G2-G3), en raison de l'absence complète de gain de rendement suivant des apports d'engrais P et un haut taux de saturation en P.

Pour les prairies mixtes, c.-à-d. entre 31 et 69 % de légumineuses, le faible nombre de données n'a pas permis de déterminer des VSRF sur la base des analyses statistiques. En effet, pour ces prairies, seulement trois sites étaient disponibles, résultant en une faible représentativité de plusieurs paramètres importants tels que les différents groupes de textures (seulement des sols G2, Tableau 20) et les différentes régions. Une grille mitoyenne entre celle des graminées et celles des légumineuses est cependant proposée en fin de chapitre (p. 54).

**Tableau 24.** Fertilisation phosphatée des prairies en production – Valeurs scientifiques de référence en fertilisation

Type de prairies	Groupe de textures de sol <sup>(1)</sup>	Classe de fertilité ISP <sub>1</sub> (%) <sup>(2)</sup>	Période d'application	VSRF <sup>(3)</sup> (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)
Graminées (≤ 30% de légumineuses)	G1	≤ 4,8	Au printemps	70 <sup>(4)</sup>
		4,8- 7,6		35 <sup>(5)</sup>
		7,7- 9,6		0-25 <sup>(6,7)</sup>
		> 9,6		0 <sup>(7)</sup>
	G2-G3	≤ 4,8	Au printemps	70 <sup>(4)</sup>
		4,8- 9,6		35 <sup>(5)</sup>
		9,7-13,1		25 <sup>(6)</sup>
		> 13,1		0 <sup>(7)</sup>
Mixtes (31- 69 % de légumineuses)	Données en quantité insuffisante <sup>(8)</sup>			
Légumineuses (≥ 70 % de légumineuses)	G1	≤ 5,3	Au printemps	100 <sup>(4)</sup>
		5,4 – 7,6		50 <sup>(4)</sup>
		7,7-10,5		0-25 <sup>(6,7)</sup>
		> 10,5		0 <sup>(7)</sup>
	G2-G3	≤ 5,3	Au printemps	100 <sup>(4)</sup>
		5,4 – 10,5		50 <sup>(4)</sup>
		10,6-13,1		25 <sup>(6)</sup>
		> 13,1		0 <sup>(7)</sup>

<sup>(1)</sup> G1 : sols à textures fines; G2 : sols à textures moyennes; G3 : sols à textures grossières.

<sup>(2)</sup> ISP<sub>1</sub> : saturation en P du sol =  $[P_{M3}/Al_{M3}] \times 100$ , éléments extraits au Mehlich-3 (Mehlich, 1984) et dosés par spectroscopie d'émission au plasma (SEP ou ICP : *Inductively coupled plasma*).

<sup>(3)</sup> VSRF : Valeurs scientifiques de référence en fertilisation.

<sup>(4)</sup> Dose optimale dans cette catégorie de sols arrondie au multiple de 5, le cas échéant.

<sup>(5)</sup> En absence de dose optimale unique dans cette catégorie de sols, la borne inférieure est retenue, arrondie au multiple de 5.

<sup>(6)</sup> Proposition de la plus petite dose testée pour cette catégorie de sol étant donnée l'absence de différence significative entre les ROM.

<sup>(7)</sup> Proposition d'un apport nul, considérant l'absence probable de gain par la fertilisation dans cette catégorie de sols saturés en P.

<sup>(8)</sup> Données en quantité insuffisante dans les prairies mixtes.

L'intervalle des VSRF proposées dans le cadre de cette étude pour la fertilisation des prairies en production, soit de 0 à 100 kg/ha de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, est similaire à celui recommandé actuellement au Québec (CRAAQ, 2010), variant de 0 à 75 kg/ha pour les graminées et de 0 à 90 kg/ha pour les légumineuses, selon la teneur en P<sub>M3</sub> et en Al<sub>M3</sub> du sol (Tableau 25). Hormis les grilles recommandées en Ontario (0 -180 kg/ha P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) et au Wisconsin (0 -174 kg/ha P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), où les doses sont plus élevées, les recommandations de la présente étude sont également similaires à celles actuellement en vigueur dans les autres provinces canadiennes et ailleurs aux États-Unis (Tableau 25). De même, tel qu'obtenu dans la présente étude, des doses de P plus élevées sont généralement recommandées dans les autres grilles canadiennes et américaines pour les prairies contenant un plus fort pourcentage de légumineuses.

**Tableau 25.** Comparaison des recommandations en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> pour les prairies en production au Canada et aux États-Unis.

Provinces/ États	Mode et période d'application	Fraction nement	Indicateurs		Objectif de rendement (t/ha)	Dose P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg/ha)				Source	
			Fertilité du sol	Autres		0-40 % de lég.		40-100 % de lég.			
Québec (CAN)	-	-	0-30 kg K <sub>M3</sub> /ha	Al du sol	Prairies de 40-100 % de légumineuse s: 7-8	50-75		60-90		CRAAQ (2010)	
			31-60			40-60		40-70			
			61-90			40-50		40-55			
			91-120			25-40		25-40			
			121-150			0-25		25			
			151-250			0-25		0-20			
251 et +	0		0								
Ontario (CAN)	-	-	P Olsen	-	-	0 - 180				MAAARO (2017)	
Alberta (CAN)	-	-	-	-	-	0-20 % de	20-40 %	40-60 %	60-100 %	Agriculture, Food, and Rural Development (2004)	
						lég.	de lég.	de lég.	de lég.		
Provinces de l'Atlantique (CAN) <sup>1</sup>	-	-	-	-	-	0-45		0-39	0-56	0-67	Atlantic Forage and Corn Team (2021)
						0-60 % de lég.		60-100 % de lég.			
Minnesota (É-U)	À la volée, début printemps	-	P <sub>Bray 1</sub> ou P Olsen	Objectif de rendement	4.9 - 12.4 et +	Graminées		Mixtes		University of Minnesota extension (2018)	
						0-78		0-101			
Vermont (É-U)	-	-	P <sub>Morgan</sub> modifié	Al réactif du sol	-	0 - 112				University of Vermont Extension (2017)	
Wisconsin (É-U)	-	-	P du sol	Texture, objectif de rendement	1.2-19.8	0 - 174				Laboski et Peters (2012)	

<sup>1</sup> 0-60 % de légumineuses: 60 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha au printemps + 20 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha après chaque coupe + 20 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha après la dernière coupe. 60-100 % de légumineuses: 40 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha au printemps + 40 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha après chaque coupe + 0 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha après la dernière coupe.

### Insuffisance de données dans les prairies mixtes (31- 69 % de légumineuses)

Pour les prairies mixtes, l'absence de données représentatives et en quantité suffisante n'a pas permis de déterminer des VSRF sur la base des analyses statistiques. En absence d'indicateurs de fertilité et de doses optimales modélisées, une grille moyenne entre celle des graminées et celles des légumineuses pourrait être proposée en faisant la moyenne des VSRF obtenues pour les deux autres types prairies. En raison plus grand besoin en P des légumineuses, les seuils de réponse agronomique obtenus pour ces dernières pourraient être considérés pour distinguer les différentes classes de fertilités de sols.



Type de prairies	Groupe de textures de sol	Classe de fertilité ISP <sub>1</sub> (%)	Période d'application	VSRF (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)
Mixtes (31 - 69 % de légumineuses)	G1	≤ 5,3	Au printemps	85
		5,4 – 7,6		45
		7,7-10,5		0-25
		> 10,5		0
	G2-G3	≤ 5,3	Au printemps	85
		5,4 – 10,5		45
		10,6-13,1		25
		> 13,1		0

G1 : sols à textures fines; G2 : sols à textures moyennes; G3 : sols à textures grossières; VSRF : Valeurs scientifiques de référence en fertilisation.

### Utilisation des coefficients d'efficacité des engrais

Une part significative des prairies fait l'objet d'une fertilisation organique. Cependant, les engrais utilisés lors des essais étaient sous forme minérale avec un coefficient d'efficacité considéré par défaut à 100 %. Dans le cas où les engrais seraient apportés sous une forme organique, il revient à l'agronome d'utiliser les bons coefficients d'efficacité et les bons facteurs de perte, de même que d'informer le producteur sur les bonnes pratiques d'épandage afin d'éviter tout apport excessif et de minimiser les pertes.

## 4 FERTILISATION POTASSIQUE

### 4.1 Portrait et représentativité des données

La répartition des blocs des essais K des trois types de prairies, selon différentes classes de propriétés de sol (0-20 cm), est présentée au Tableau 26. Peu de données ont été disponibles pour les prairies mixtes qui ne représentent que 8 % des blocs (3 sites), en comparaison de 57 % et 35 % pour les prairies de graminées et de légumineuses, respectivement. Ainsi, dans les sections ultérieures, les prairies mixtes ne seront pas discutées et seules les analyses des prairies de graminées et de légumineuses seront présentées.

Les essais K ont majoritairement été réalisés sur des sols moyennement acides à neutres. Des pH légèrement basiques ont été observés uniquement chez les prairies de graminées. Toutefois, cette gamme de pH très faiblement alcalins (valeur maximale de 7,2) ne concerne qu'un dixième des blocs des prairies de graminées. Pour les prairies de graminées, mixtes et de légumineuses, les pH les plus faibles ont été respectivement de 5,5; 5,9 et 5,6. Globalement, la plupart des blocs se situaient dans les limites du pH optimal pour les légumineuses (6,2 à 7,0; CRAAQ, 2022) tandis que seulement la moitié des blocs se trouvait dans la plage optimale de 6,0 à 7,0 (CRAAQ, 2022) pour les prairies de graminées.

Tous types de prairies considérés, les sols de texture légère ont été majoritaires, avec 50 % des blocs à l'intérieur du groupe de texture G1, suivi des sols de texture moyenne (G2; environ 30 %), puis grossière (G3; environ 20 %). Cependant, puisque les analyses portent sur le groupe de textures combinées G2-G3, le jeu de données se retrouve finalement équilibré pour ce paramètre. Tel qu'attendu, puisque les argiles sont naturellement plus riches en K, une forte proportion des blocs avait une teneur en  $K_{M3} \leq 100$  ppm dans le groupe G2-G3, et aucun bloc ne présentait des teneurs  $> 200$  ppm  $K_{M3}$ , tandis que le groupe G1 a présenté une large répartition de teneurs en  $K_{M3}$  allant de 24 à 589 ppm.

**Tableau 26.** Répartition des blocs des essais K des prairies en production selon différentes classes de propriétés de sol après la validation des données

pH <sub>eau</sub> <sup>(1)</sup>	Blocs (%)	Teneur en $K_{M3}$ (ppm) <sup>(2)</sup>	Blocs (%)		Groupe de textures <sup>(3)</sup>	Blocs (%)	Teneur en argile (%)	Blocs (%)
			G1	G2-G3				
<b>Graminées (<math>\leq 30</math> % de légumineuses)</b>								
< 5,5	0	$\leq 100$	43	89	G1	49	$\leq 30$	51
5,5 – 6,0	37	$> 100 - 200$	35	11	G2	31	$> 30 - 50$	16
6,0 – 6,5	31	$> 200 - 300$	11	0	G3	20	$> 50$	31
6,5 – 7,0	20	$> 300 - 400$	4	0	-	-	nd	2
$> 7,0$	11	$> 400$	7	0	-	-	-	-
<b>Mixtes (31 à 69 % de légumineuses)</b>								
< 5,5	0	$\leq 100$	0	67	G1	0	$\leq 30$	100
5,5 – 6,0	11	$> 100 - 200$	0	22	G2	100	$> 30 - 50$	0
6,0 – 6,5	56	$> 200 - 300$	0	0	G3	0	$> 50$	0
6,5 – 7,0	33	$> 300 - 400$	0	0	-	-	-	-
$> 7,0$	0	$> 400$	0	0	-	-	-	-
<b>Légumineuses (<math>\geq 70</math> % de légumineuses)</b>								
< 5,5	0	$\leq 100$	34	87	G1	54	$\leq 30$	55
5,5 – 6,2	16	$> 100 - 200$	17	13	G2	31	$> 30 - 50$	0
6,2 – 6,5	62	$> 200 - 300$	33	0	G3	15	$> 50$	45
6,5 – 7,0	22	$> 300 - 400$	0	0	-	-	-	-
$> 7,0$	0	$> 400$	17	0	-	-	-	-

(1) Le pH optimal est de 6,0 à 7,0 pour les prairies de graminées et de 6,2 à 7,0 (G1, G2) ou 6,5 à 7,0 (G3) pour la luzerne (CRAAQ, 2022).

(2)  $K_{M3}$  : K extrait par la méthode Mehlich-3 (1984).

(3) G1 : sols à texture fine; G2 : sols à texture moyenne; G3 : sols à texture grossière.

\* Prairie de graminées : 21 sites (85 blocs); prairies mixtes : 3 sites (9 blocs); prairies de légumineuses : 13 sites (42 blocs).



## 4.2 Détermination des doses agronomiques optimales

### 4.2.1 Recherche d'indicateurs de fertilité du sol

Plusieurs propriétés physico-chimiques du sol sont susceptibles d'avoir un impact sur la réponse des prairies à la fertilisation potassique en agissant sur la biodisponibilité de cet élément pour l'alimentation de la plante. Dans le cadre des analyses de répartition (Cate-Nelson 1971), les variables ayant démontré un potentiel comme indicateur de fertilité sont : la teneur du sol en K extrait par la méthode Mehlich-3 ( $K_{M3}$ ), la teneur du sol en argile, la CEC et différents ratios de  $K_{M3}$  sur des teneurs de bases échangeables (CEC, Ca, Mg). Parmi ceux-ci, deux indicateurs ont été retenus en fonction de leur performance (Tableau 27), soit le  $K_{M3}$  et le ratio  $K_{M3}/CEC$ . Trois seuils bien distincts ont été observés pour le  $K_{M3}$ , soit les seuils de 98,8 et 55,6 ppm pour les prairies de graminées pour les groupes G1 et G2-G3, respectivement, et le seuil de 167,5 ppm pour les prairies de légumineuses (toutes textures confondues). En ce qui a trait au rapport  $K_{M3}/CEC$ , les seuils varient inversement à ceux en  $K_{M3}$  dans les mêmes conditions de type de prairies et de groupe de texture. Ils sont de 3,04 et 3,37 pour les prairies graminées pour les groupes G1 et G2-G3, respectivement, et de 2,92 pour les prairies de légumineuses. Pour les recommandations, l'indicateur aboutissant aux modèles les plus performants dont les valeurs prédites sont valides du point de vue agronomique sera retenu.

Le rapport  $K_{M3}$  et CEC présente les caractéristiques d'un bon indicateur de fertilité potassique des sols en se basant sur l'analyse de la répartition de Cate-Nelson. Des seuils critiques de réponse bien définis ont été obtenus. Toutefois, les résultats des modèles n'ont pas permis d'aboutir à des doses optimales valides agronomiquement. Il convient de garder un œil ouvert sur le paramètre dans le cadre des analyses futures.

**Tableau 27.** Valeurs critiques des indicateurs potentiels de sols significatifs selon les tests de Cate-Nelson pour les essais K de prairies

Indicateur de sol	Type de prairies	Groupes de textures <sup>(3)</sup>	N <sub>obs</sub> <sup>(4)</sup>	Valeur critique	RRel <sup>(5)</sup> (%)	Sensitivité	Spécificité	Précision	Valeur de P
$K_{M3}$ <sup>(1)</sup> (ppm)	Graminées (≤ 30 % de lég.)	G1	30	98,8	83	0,82	0,69	0,77	0,008
		G2-G3	28	55,6	86	0,50	1,00	1,00	0,006
	Légumineuses (≥ 70 % de lég.)	G1-G2-G3	31	167,5	94	0,54	0,83	0,70	0,052
$K_{M3}/CEC$ <sup>(2)</sup>	Graminées (≤ 30 % de lég.)	G1	14	3,04	85	0,80	1,00	1,00	0,015
		G2-G3	27	3,37	85	0,56	1,00	1,00	0,003
	Légumineuses (≥ 70 % de lég.)	G1-G2-G3	31	2,92	81	1,00	0,50	0,93	0,013

(1)  $K_{M3}$  : Teneur en potassium extrait au Mehlich-3 (1984).

(2)  $K_{M3}/CEC$  : Rapport de la teneur en K sur la capacité d'échange cationique

(3) Groupe de sols en fonction de la texture (G1 : sols à texture fine; G2 : sols à texture moyenne; G3 : sols à texture grossière).

(4) Nobs : nombre d'observations.

(5) RRel : Rendement relatif (100 % × rendement du témoin/rendement maximum par bloc).

### 4.2.2 Effet de la dose de potassium sur le rendement

**Note de section :** À la lumière des résultats obtenus suivant l'étude du rapport N:K, les VSRF finales de prairies de graminées ont été produites en excluant les plants carencés (N:K < 0,852; voir la section 4.2.3) et en jumelant les groupes de texture. Cependant, les résultats des analyses de régression menées sur l'ensemble des données sont présentés dans un premier temps à titre indicatif.

Les résultats des analyses de régression menées sur les rapports de rendements sont présentés au Tableau 28. Seules les analyses utilisant les classes de sol délimitées par le  $K_{M3}$  sont présentées, car le ratio K/CEC s'est avéré moins performant (absence de DAO pour les sols G1 des prairies de graminées). Sur la base du seuil principal du  $K_{M3}$ , des seuils secondaires ont été obtenus (méthode de Cope-Rouse), ce qui a permis de créer plusieurs classes de fertilité à l'intérieur desquelles une dose optimale a été recherchée.

Pour les prairies de graminées, trois classes de fertilité ont été définies pour chacun des groupes de texture. Pour G1, la 1<sup>re</sup> classe de fertilité regroupant les teneurs en  $K_{M3}$  inférieures ou égales au seuil de réponse agronomique (98,8 ppm) a montré une tendance à des effets linéaire et quadratique significatifs de la dose de potassium sur le rapport de rendement (ROM) ( $P \leq 0,12$ ). Dans une approche agroenvironnementale, bien que la valeur de P soit plus significative pour la relation linéaire, la relation quadratique aboutissant à un plafonnement optimal de la dose a été priorisée. Une valeur optimale de 128 kg  $K_2O/ha$  a donc été calculée à partir du modèle quadratique. Suivant un intervalle de confiance à 95 %, cette dose varie entre 80 à 176 kg  $K_2O/ha$  et permet une augmentation de 12 % du rendement par rapport au témoin. Une étude réalisée en 2000 sur les graminées a également montré qu'un apport similaire, soit 133 kg/ha, était suffisant pour optimiser le rendement et maintenir la fertilité dans les sols moins pourvus en K (Giroux et Lemieux, 2000). Les deux autres classes de fertilité de G1 ne comportent aucun effet significatif de la fertilisation potassique sur le ROM. Ainsi, pour la 2<sup>e</sup> classe de fertilité, bornée par le seuil de réponse et son double (197,5 ppm), la courbe issue du modèle a une allure légèrement convexe ( $a > 0$ ) et tend vers un minimum. En absence de réponse, la plus petite dose testée est habituellement recommandée (25 kg/ha). Il est toutefois proposé, vu le grand écart avec la DAO précédente, de retenir un intervalle dont la borne supérieure considère la moitié de la dose optimale de 128 kg  $K_2O/ha$ , soit environ 65 kg  $K_2O/ha$ . Cette proposition s'appuie également sur des résultats publiés d'autres études. Des expériences menées par Lunnan et al. (2018) sur des prairies de graminées ont également abouti à des effets non significatifs de la fertilisation potassique dans des sols à texture fine de même richesse en  $K_{M3}$ , mais une faible tendance ( $P = 0,16$ ) à un effet quadratique était observée pendant la deuxième année avec une dose optimale de 60 kg  $K_2O/ha$  (Lunnan et al., 2018). Avec les mêmes données d'expérimentation, Øgaard et al. (2002) avaient auparavant considéré 60 kg  $K_2O/ha$  comme dose optimale dans de telles conditions. Une analyse portant sur davantage de données que celles possédées dans la présente étude aurait peut-être permis de mieux cerner la réponse dans cette classe de sol intermédiaire. Dans tous les cas, l'intervalle proposé devrait satisfaire aux exigences en potassium pour cette classe de fertilité suivant l'avis de l'agronome qui pourra appuyer son choix sur l'historique de fertilité du champ. Au-delà de 197,5 ppm de  $K_{M3}$ , la fertilisation en K n'a pas influencé les rendements en fourrages et le ROM tend vers 1 (absence de gain). Pour ce niveau de richesse du sol en  $K_{M3}$ , une dose nulle de K serait alors optimale. À l'image des sols G1, les sols du groupe de texture G2-G3 ont montré un effet significatif de la fertilisation potassique seulement pour la classe de fertilité la plus basse ( $\leq 55,60$  ppm; seuil de réponse). La réponse est cependant plus importante pour ces sols comportant moins d'argile que ceux du groupe G1, avec un effet linéaire fortement significatif ( $P = 0,003$ ) et un effet quadratique non significatif indiquant qu'aucun plateau n'a été atteint. Ainsi, par défaut, la dose maximale testée (200 kg  $K_2O/ha$ ) est celle correspondant au ROM maximal (ROM = 1,35 c.-à-d. augmentation de 35 % de rendement) et devient ainsi la DAO de cette classe de sol. Pour les classes de fertilité 55,6-111,2 et  $> 111,2$  ppm de G2-G3, les mêmes considérations que G1 ont été faites et les doses optimales respectives de 50-100 kg  $K_2O/ha$  et 0 kg  $K_2O/ha$  ont été retenues.

Pour les prairies de légumineuses, toutes textures de sol confondues, cinq classes de fertilité ont été définies sur la base du seuil critique principal de  $K_{M3}$ , excepté la 1<sup>re</sup> qui correspond à l'absence de donnée pour les sols contenant  $\leq 41,9$  ppm  $K_{M3}$  (94 kg  $K_{M3}/ha$ ). Il a été décidé de transformer cette plage de valeur en classe vu l'intervalle couvert qui est de près de 100 kg  $K_{M3}/ha$ . En absence de données, la recommandation proposée est fonction des exportations moyennes en  $K_2O$  de la culture qui sont de 300 kg  $K_2O/ha$ . Entre 41,9 et 83,8 ppm  $K_{M3}$ , une forte tendance ( $P = 0,07$ ) à un effet quadratique de la fertilisation potassique sur le ROM a été calculée. Bien que l'effet linéaire soit ressorti significatif ( $P = 0,048$ ), la tendance quadratique ( $P = 0,074$ ) a été privilégiée afin d'optimiser la dose plutôt que de la maximiser. La dose optimale recommandée est donc de 207 kg  $K_2O/ha$ , avec un intervalle de doses variant de 93 à 321 kg  $K_2O/ha$  pour un intervalle de confiance à 95 %. Une dose optimale presque 2 fois inférieure (115 kg  $K_2O/ha$ ) a été obtenue pour la classe de fertilité

suivante (83,8-167,5 ppm) présentant pour l'intervalle de confiance à 95 % des doses allant de 83 -143 K<sub>2</sub>O/ha. Lloveras et al. (2012) ont également remarqué qu'une dose similaire (100 kg K<sub>2</sub>O/ha) était suffisante pour atteindre le rendement maximal dans une luzernière moyennement riche en K (161 ppm). Dans la 4<sup>e</sup> plage de teneur en K<sub>M3</sub> s'étalant de 167,5 à 335,1 ppm, la fertilisation croissante en potassium n'a eu aucun effet notable sur le ROM. Ainsi, une dose entre 0 et la dose minimale testée (37,5 kg K<sub>2</sub>O/ha) devrait assurer l'alimentation adéquate des légumineuses. Aucune dose de potassium n'est requise pour les légumineuses dans des sols dont la teneur en K<sub>M3</sub> dépasse 335,1 ppm.

**Tableau 28.** Résultats des régressions sur la réponse des prairies de graminées et de légumineuses aux doses croissantes de K<sub>2</sub>O.

Groupes de textures (1)	Classe de fertilité K <sub>M3</sub> (ppm) (2)	N <sub>obs</sub> (3)	Paramètre du modèle (4)						Dose de K <sub>2</sub> O (kg/ha)				ROM
			a	Erreur-Type	Valeur de P	b	Erreur-Type	Valeur de P	Max testée	Min	Max	Optim.	
<b>Graminées</b> (≤ 30 % de légumineuses)													
G1	a) ≤ 98,8	54	-0,023	0,013	<b>0,118</b>	0,023	0,012	<b>0,078</b>	200	80	176	128	1,12
	b) 98,8 - 197,5	65	0,008	0,011	0,468	0,004	0,009	0,666	200	.	.	.	.
	c) > 197,5	30	0,002	0,020	0,940	-0,007	0,051	0,891	100	.	.	.	.
G2-G3	a) ≤ 55,6	120	na	na	na	0,037	0,011	<b>0,003</b>	200	.	.	200	1,15
	b) 55,6 - 111,2	20	0,009	0,016	0,612	0,002	0,024	0,928	200	.	.	.	.
	c) >111,2	15	-0,009	0,011	0,563	-0,010	0,017	0,643	200	.	.	.	.
<b>Mixtes</b> (31 à 69 % de légumineuses)													
Données en quantité insuffisante													
<b>Légumineuses</b> (≥ 70 % de légumineuses)													
G1-G2-G3	a) ≤ 41,883	0	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	b) 41,883 - 83,765	43	-0,008	0,004	<b>0,074</b>	0,021	0,009	<b>0,048</b>	300	93	321	207	1,06
	c) 83,765 - 167,530	65	-0,017	0,008	<b>0,064</b>	-0,003	0,008	0,703	300	87	143	115	1,06
	d) 167,53 - 335,06	39	-0,002	0,021	0,911	-0,029	0,033	0,402	150	.	.	.	.
	e) ≥ 335,06	15	-0,037	0,021	0,320	-0,050	0,029	0,332	150	.	.	.	.

(1) Groupe de sols en fonction de la texture (G1 : sols à texture fine; G2 : sols à texture moyenne; G3 : sols à texture grossière).

(2) K<sub>M3</sub> : Classe de teneur en potassium extrait au Mehlich-3 (1984).

(3) N<sub>obs</sub> : Nombre d'observations par classe de fertilité et par groupe de textures.

(4) Modèle de type quadratique :  $\log(\text{ROM}) = a \times \text{dose}^2 + b \times \text{dose} + c$

\*Min et Max : bornes inférieure et supérieure de l'intervalle de confiance à 95 %.

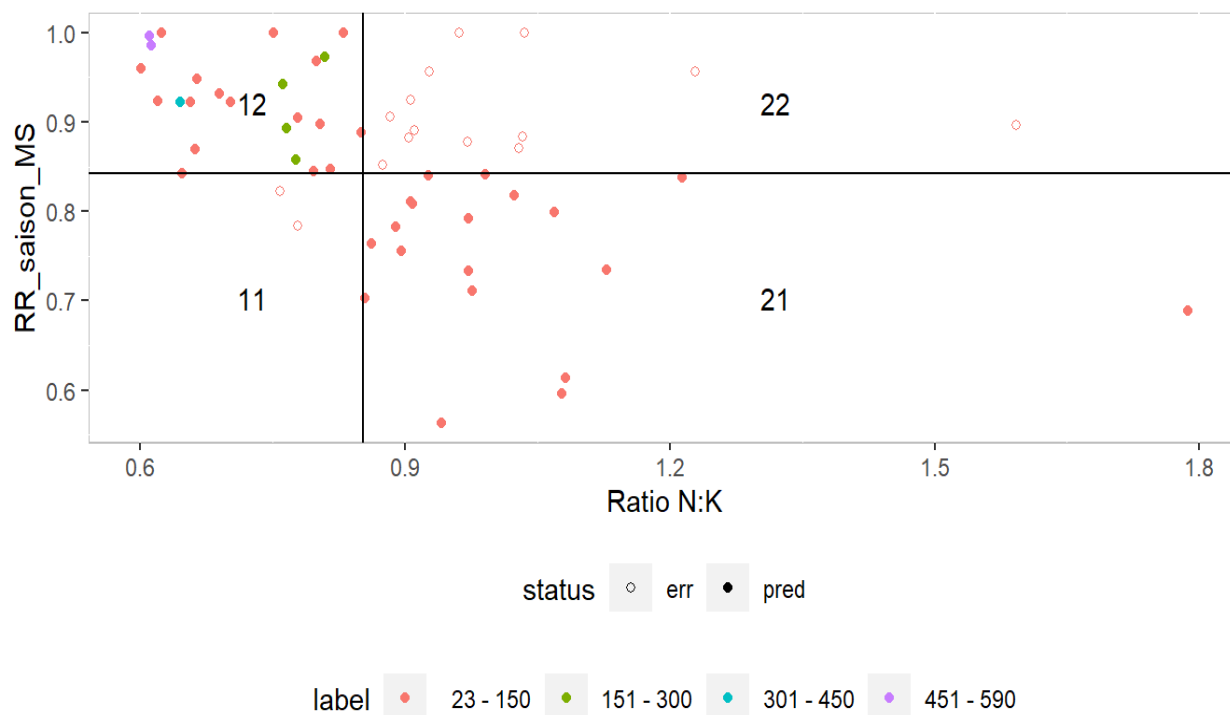
#### 4.2.3 Interaction N et K chez les graminées

Dans la littérature scientifique, plusieurs travaux ont mis en évidence l'importance de la nutrition azotée dans l'obtention d'une réponse aux engrais potassiques (Talibudeen et al. 1976; Robinson, 1985; Lunnan et al., 2018; Simić et al., 2020). En effet, une augmentation du rendement causée par une application de N fait augmenter la demande et la réponse en K (Robinson, 1985). Cette forte interaction entre le N et le K est bien illustrée dans l'étude de Penny et al. (1980) où une dose de 105 kg K<sub>2</sub>O/ha était suffisante pour maximiser les rendements en fourrages lorsqu'elle était combinée à des applications jusqu'à 250 kg N/ha, tandis que la dose optimale s'élevait à 210 kg K<sub>2</sub>O/ha lorsque les apports azotés étaient de 375 N. L'équilibre nutritionnel dans la biomasse se trouve alors influencé par cette interaction et le ratio N:K constitue un indicateur de carence. Avec un test de répartition de Cate-Nelson, un seuil critique de réponse (0,852) a été obtenu pour le ratio N:K à partir duquel ce dernier influence la réponse à la fertilisation potassique (Figure 9). Une valeur critique du rendement relatif de 84 % et une précision de 0,74 ont été associées au seuil N:K calculé (Tableau 29).

**Tableau 29.** Valeur critique du ratio N:K selon le test de Cate-Nelson pour les essais K des prairies de graminées

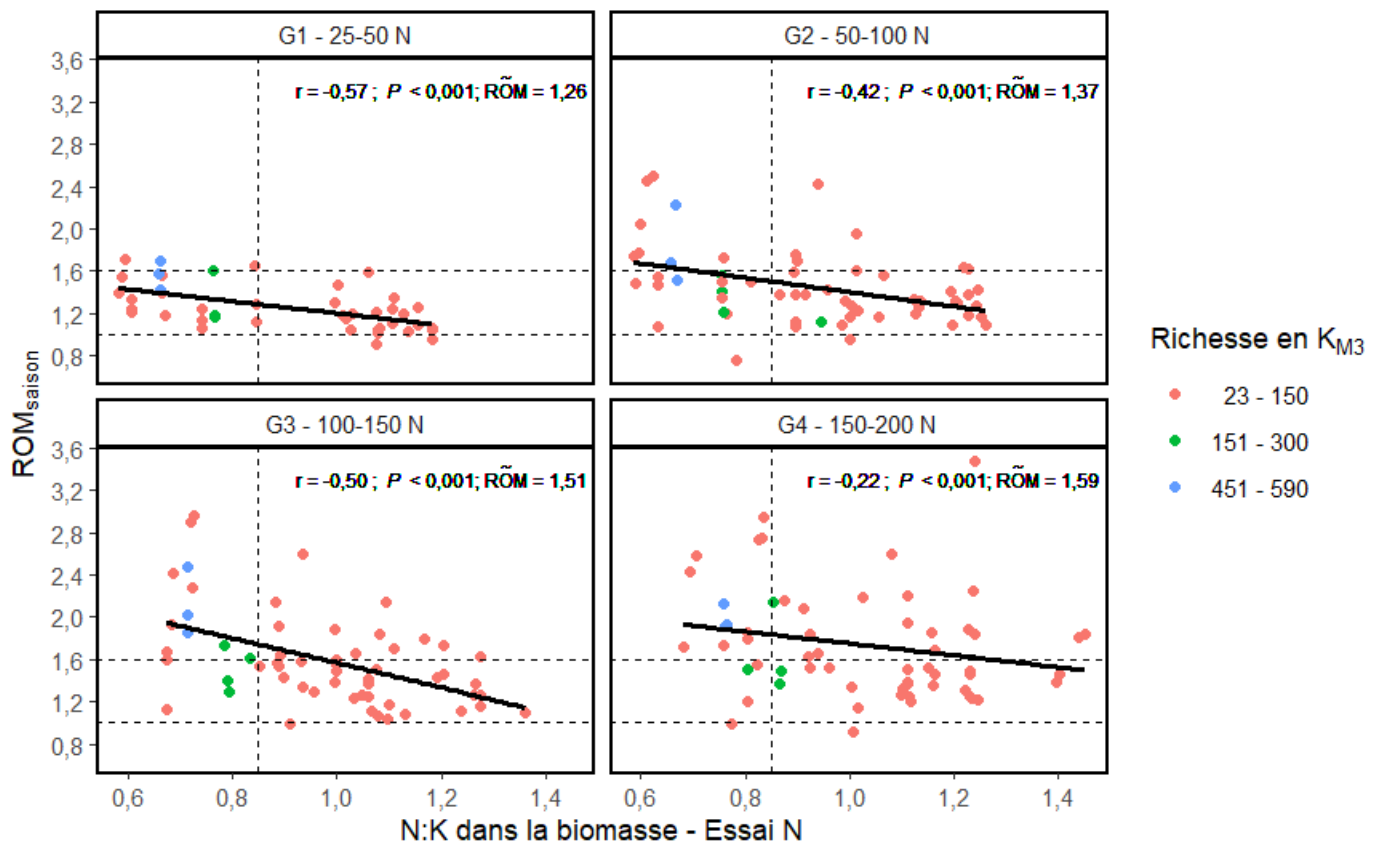
Indicateur	N <sub>obs</sub>	Valeur critique	RRel (%)	Sensitivité	Spécificité	Précision	Valeur de P
Ratio N:K	58	0,852	84	0,65	0,91	0,74	< 0,001

Nobs : nombre d'observations. RRel : Rendement relatif (100 % × rendement du témoin/rendement maximum par bloc).



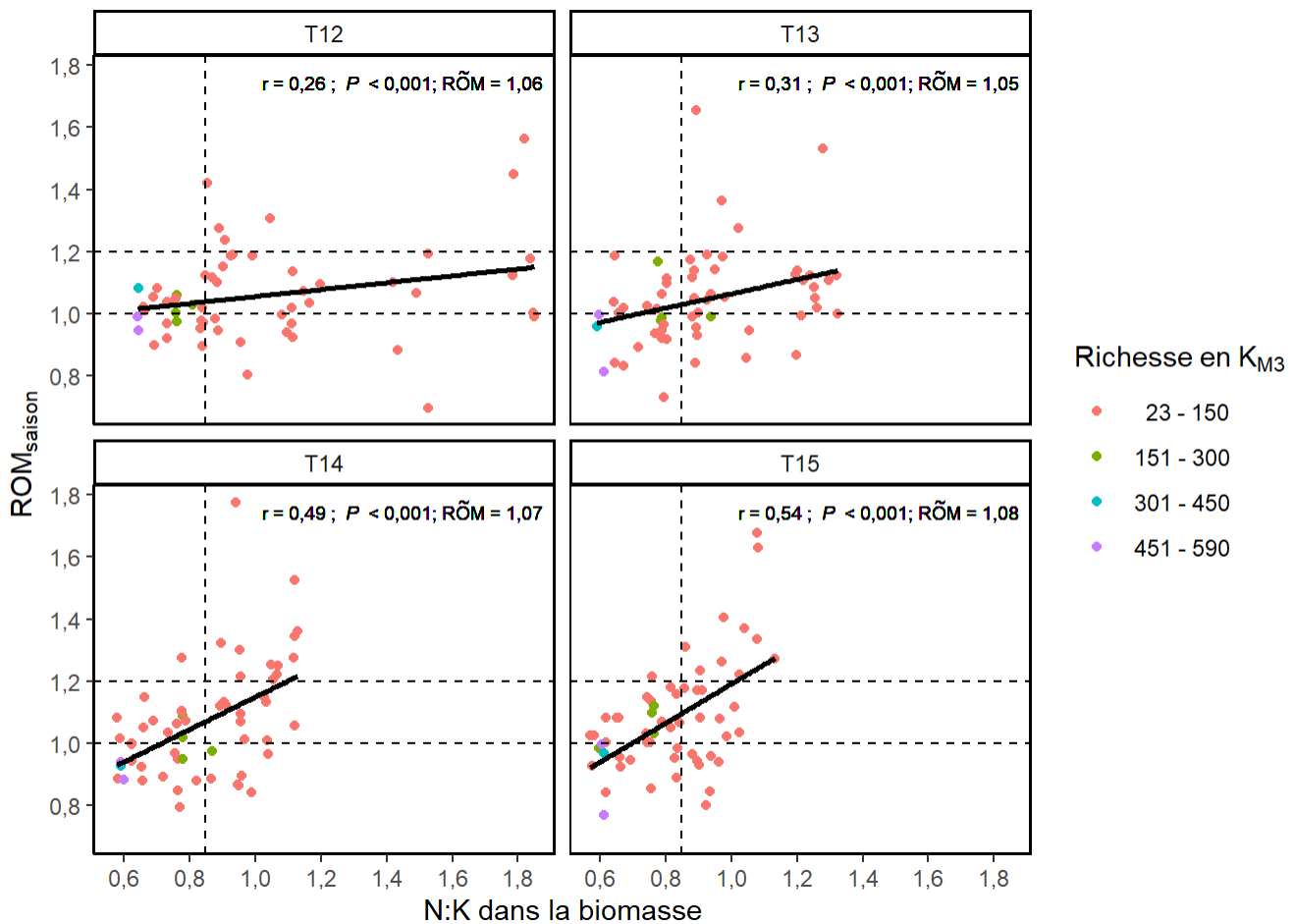
**Figure 9.** Valeur critique du ratio N:K des essais K de prairies de graminées selon le test de Cate-Nelson (1971).

Pour les essais N de cette étude où une dose maximale de 100 kg K<sub>2</sub>O/ha a été appliquée, une relation de décroissance a été observée entre le ROM et le ratio N:K dans la biomasse en fonction de la dose de N (Figure 10). Pour le premier groupe impliquant des doses de N variant de 25 à 50 kg N/ha, un coefficient de corrélation de -0,57 a été calculé et celui-ci diminue à mesure que la dose de N augmente. Toutefois, le nombre de points avec des ROM supérieurs à 1,6 augmente avec la dose de N. En passant d'une dose de 100 kg N/ha à 200 kg N/ha, il a été possible d'obtenir un gain de rendement de 20 % et le ratio N:K reste majoritairement inférieur au seuil critique de 1,3 (Dampney, 1992). Ce qui implique que l'alimentation en potassium était suffisante pour évaluer la réponse à la fertilisation azotée.



**Figure 10.** ROM de la saison en fonction du ratio N:K de la biomasse de récolte et des groupes de doses dans les essais N des prairies de graminées. RÖM : ROM moyen.

Contrairement à l'essai N, une tendance à l'augmentation du gain du rendement a été observée en fonction du ratio N:K comme on peut l'observer sur la Figure 11. Le sens contraire des deux relations s'explique par le fait qu'un ratio N:K faible peut tout aussi influencer négativement le rendement qu'un ratio élevé. Pour les données de l'essai N, la relation entre le ROM et le N:K est positive et devient de plus en plus forte à mesure que la dose de K apportée augmente. Le coefficient de corrélation atteint 0,49 et 0,54 lorsque la dose de K appliquée est respectivement de 150 et 200 kg K<sub>2</sub>O/ha. Le ratio diminue avec l'ajout de K, mais influence relativement peu le ROM d'une dose de K à l'autre. En Norvège, Lunnan et al. (2018) ont également montré une corrélation entre le ratio N:K de la biomasse récoltée et les rendements relatifs liés à la fertilisation en K. Pour des prairies de graminées, le seuil critique du ratio N:K dans la biomasse tourne autour de 1,2 et 1,3 lorsque K est à un niveau suffisant (Lunnan et al., 2018; Dampney, 1992). Un ratio N:K faible pourrait être lié à des apports en N insuffisants tandis qu'un ratio qui dépasse le seuil critique est synonyme d'une carence en K.



**Figure 11.** ROM de la saison en fonction du ratio N:K de la biomasse de récolte et de la dose de  $K_2O$  dans les essais K des prairies de graminées. RÖM : ROM moyen.

En considérant les traitements T14 et T15, la probabilité était plus faible d'obtenir un gain de rendement supérieur à 1,2 en dessous du seuil critique de 0,852 alors qu'au-delà de ce seuil, un grand nombre d'observations avec un ROM > 1,2 a été observé. Parallèlement, une plus grande proportion des observations dont le ROM est inférieur à 1 (pas de réponse) se retrouvait sous ce seuil. Au-delà du seuil de N:K, les sites sont constitués majoritairement de plus de 4 % de  $MO_{PAF}$ . Ainsi, une quantité plus importante de N était susceptible d'être fournie par minéralisation. Ces sites sont également pauvres en K ( $K_{M3} \leq 150$  ppm) et sujets à une réponse positive à la fertilisation potassique.

En considérant uniquement les sites dont le rapport N:K moyen de la biomasse est supérieur ou égal à 0,852, toutes textures confondues, un seuil de réponse critique de  $K_{M3}$  de 92,5 ppm (précision = 0,84; spécificité = 0,89; sensibilité = 0,67;  $P = 0,012$ ) déterminé par la méthode de Cate-Nelson a permis de définir trois classes de fertilité : a)  $\leq 46,25$  ppm  $K_{M3}$ ; b) 46,25-92,5 ppm et c)  $> 92,50$  ppm. Des analyses de régressions ont ensuite été conduites pour chacune des classes (Tableau 30). Avec un effet linéaire significatif, la dose maximale testée (200 kg  $K_2O/ha$ ) a été retenue pour la classe de fertilité  $K_{M3} \leq 46,25$  ppm. Une forte tendance à un effet quadratique de la dose sur le ROM a été observée pour la classe dont les teneurs en  $K_{M3}$  sont comprises entre 46,25 et 92,5 ppm. Pour cette dernière classe de fertilité, une dose optimale de 127 kg  $K_2O/ha$  a été calculée. Aucun effet n'est observé lorsque la teneur en  $K_{M3}$  est supérieure à 92,5 ppm. Les doses optimales proposées sont similaires aux analyses par groupe de textures avec la totalité des données des essais K. Par conséquent, l'alimentation en K des graminées aurait été également limitée par la déficience en N dans les sites plus riches en  $MO_{PAF}$  et pour lesquels le ratio N:K moyen dans la biomasse est supérieur à 0,852. Toutefois, une légère augmentation de rendement (18 à 22 %) a été observée. Des constatations similaires ont été rapportées dans les travaux de Talibudeen

et al. (1976) sur la fertilisation des prairies de graminées soulignant que la réponse à la fertilisation potassique est limitée par la déficience en N. Selon les recommandations de la grille N (Tableau 17, p. 39), des doses variant de 145 à 225 kg N/ha sont requises pour atteindre 95 % du ROM maximal alors que 100 kg N/ha ont été utilisés pour la conduite des essais K (Tableau 3, p. 13). Ainsi, les doses de K<sub>2</sub>O optimales obtenues dans le cadre de ces études pourraient être sous-évaluées en raison de la déficience en N. Une expérience factorielle N et K aurait pu permettre de statuer sur l'interaction entre ces deux éléments. Malgré cela, Avec les données des deux essais réalisés séparément, un maximum d'informations a été analysé en vue d'approcher la relation entre N et K dans la nutrition optimale des graminées.

**Tableau 30.** Résultats des régressions sur la réponse des prairies de graminées ayant un ratio N:K ≥ 0,852 aux doses croissantes de K<sub>2</sub>O.

Groupes de textures (1)	Classe de fertilité K <sub>M3</sub> (ppm) (2)	N <sub>obs</sub> (3)	Paramètres du modèle (4)						Dose maximale testée	Dose de K <sub>2</sub> O			ROM
			a	Erreur-Type	Valeur de P	b	Erreur-Type	Valeur de P		Min*	Max*	Optimale	
<b>Graminées (≤ 30 % de légumineuses)</b>													
	a) ≤ 46,25	85	.	.	.	0,042	0,012	<b>0,004</b>	200	0	1496	200	1,18
G1-G2-G3	b) 46,25-92,5	37	-0,033	0,015	<b>0,069</b>	0,017	0,017	0,351	200	92	162	127	1,22
	c) > 92,50	30	0,007	0,015	0,660	0,006	0,018	0,764	200	0	.	.	.

(1) Groupe de sols en fonction de la texture (G1 : sols à texture fine; G2 : sols à texture moyenne; G3 : sols à texture grossière).

(2) K<sub>M3</sub> : Classe de teneur en potassium extrait au Mehlich-3 (1984).

(3) N<sub>obs</sub> : Nombre d'observations par classe de fertilité et par groupe de textures.

(4) Modèle de type quadratique :  $\log(\text{ROM}) = a \cdot \text{dose}^2 + b \cdot \text{dose} + c$ , excepté pour la classe K<sub>M3</sub> ≤ 46,25 ( $\log(\text{ROM}) = b \cdot \text{dose} + c$ )

\*Min et Max : bornes inférieure et supérieure de l'intervalle de confiance à 95 %.

#### 4.2.4 Cas particulier : fourrage destiné à l'alimentation des vaches en période de transition

La fertilisation K des graminées présente un enjeu sur la santé des vaches laitières en période de transition. En effet, les graminées ont tendance à faire du K une consommation de luxe, d'autant plus lorsque sa biodisponibilité est importante dans le sol. Ceci peut provoquer une augmentation de la différence alimentaire cations-anions dans les fourrages ( $\text{DACA} = (\text{Na}^+ + \text{K}^+) - (\text{Cl}^- + \text{S}^{2-})$ ; Ender et al., 1971). Au-delà de 250 mÉq/kg de MS de DACA, il devient plus difficile de minimiser le risque d'hypocalcémie via le programme alimentaire (Tremblay et al., 2008). Une valeur la plus près possible de 0 est souhaitable. Dans le cadre de cette étude, il aurait donc été pertinent de proposer des recommandations sur la base de la DACA. Toutefois, l'engrais potassique utilisé contenait du chlore, dont la dose d'apport augmentait avec celle du K. De même, les sols et les fertilisants utilisés au Québec contiennent aussi une concentration très variable en Na, Cl et S, qui influence tous la DACA. Ainsi, à défaut de pouvoir proposer une recommandation sur la base de la DACA, la teneur en K de la biomasse, considérée comme l'élément qui influence le plus la DACA (Tremblay et al., 2008), a été retenue pour produire les analyses avec une teneur maximale de 2,3 % MS à ne pas dépasser. Cette valeur critique a été déterminée en considérant les concentrations typiques de Na, Cl et S des graminées au Québec (Berthiaume, 2017), et en calculant la valeur maximale de K que l'on peut obtenir sans dépasser une DACA de 250 mÉq/kg de MS. Une analyse visuelle de répartition et des modèles de régression ont été réalisées en vue de moduler les doses optimales d'apport de K pour les prairies de graminées, de telle sorte qu'elles ne représentent pas un risque pour les vaches en transition. Deux essais incluant du dactyle pelotonné ont été exclus de l'analyse, puisque cette plante absorbe plus de potassium que les autres graminées, et n'est donc pas recommandée dans les mélanges destinés aux vaches en transition (Tremblay et al., 2008). Suivant les analyses, un seuil de 67 ppm K<sub>M3</sub> (150 kg K<sub>M3</sub>/ha, facteur de conversion de 2,24) a été déterminé, de part et d'autre duquel les sites ont été classés. Il est intéressant de constater que ce seuil correspond au seuil habituellement utilisé pour déterminer les sols sur lesquels ne pas produire de fourrages pour les vaches en transition (Tremblay et al., 2008). De plus, cette division correspond plus ou moins à opposer les sols de textures moyennes et grossières (G2-G3) aux sols argileux (G1), naturellement plus riches en K, selon le jeu de données en main.

Le Tableau 31 présente les statistiques de régression linéaire du modèle  $K_{\text{biomasse}} = b \times \text{dose}_K + c$  pour les deux groupes formés. Dans les sols de moins de 67 ppm  $K_{M3}$ , sans aucun apport de  $K_2O$ , la teneur moyenne en K de la biomasse était de  $1,77 \pm 0,11$  %. De plus, pour ces sols, la dose de  $K_2O$  augmentait de façon linéaire la teneur en K de la biomasse de récolte ( $P < 0,001$ ) à un taux moyen de 0,0047 % par kg  $K_2O$  apporté. Dans une optique où une teneur maximale de 2,3 % MS de K dans la biomasse est visée, la dose limite à appliquer serait de 111 kg  $K_2O/ha$  dans ces types de sols. Afin d'éviter les risques de déficience, l'agronome peut utiliser la teneur en K dans la biomasse afin de s'assurer que la plante ait suffisamment de potassium pour offrir un bon rendement. La teneur critique en K varie selon les espèces utilisées (Bruulsema, 2000), ces teneurs sont présentées dans la 2<sup>e</sup> édition du Guide plantes fourragères (CRAAQ, 2022). Dans les sols mieux pourvus en K ( $> 67$  ppm  $K_{M3}$ ), la teneur en K de la biomasse dépassait déjà le seuil limite de 2,3% sans apport de K et les valeurs avaient tendance à augmenter linéairement avec la dose de K apportée. Ainsi, aucune dose de  $K_2O$  ne doit être appliquée. En fait, il ne semble pas souhaitable d'utiliser un champ de cette teneur ou plus en potassium ( $> 67$  ppm  $K_{M3}$ ) pour produire un fourrage destiné aux vaches en transition. Dans tous les cas, il est par la suite essentiel de considérer la DACA réelle du fourrage obtenu au moment d'élaborer le programme alimentaire de vaches en période de transition. Pour plus de détails, voir la section 7.4 traitant de l'effet de la fertilisation potassique sur la valeur nutritive des prairies.

**Tableau 31.** Résultats des régressions linéaires sur la teneur en K (% MS) de la biomasse aux doses croissantes de  $K_2O$  dans les prairies de graminées.

Classe de fertilité du sol	Paramètres du modèle <sup>(4)</sup>				Dose de $K_2O$ limite (kg/ha)	
	b	Erreur-type	Valeur de P	c		Erreur-type
<b>Graminées (<math>\leq 30</math> % de légumineuses)</b>						
a) $\leq 67$ ppm $K_{M3}$ <sup>(1)</sup>	0,0047	0,0006	$< 0,001$	1,77	0,11	111
b) $> 67$ ppm $K_{M3}$	.	.	0,079	2,89	0,11	.

(1)  $K_{M3}$  : Classe de teneur en potassium extrait au Mehlich-3 (1984).

(2)  $N_{\text{obs}}$  : Nombre d'observations par classe de fertilité et par groupe de textures.

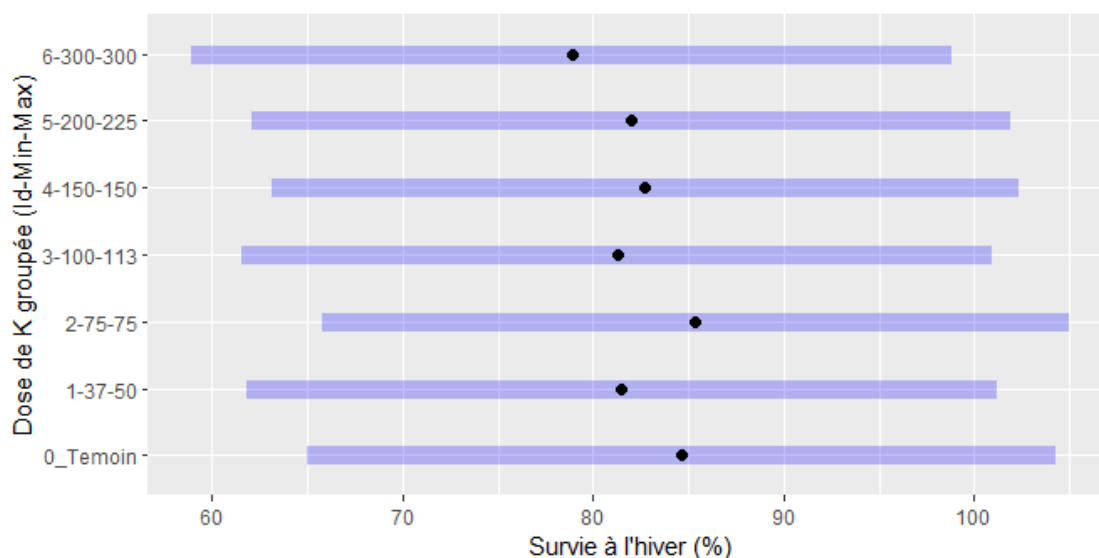
(3) Modèle de type linéaire :  $K_{\text{biomasse}} = b \cdot \text{dose} + c$

(4) Pour les fourrages destinés à l'alimentation des vaches en transition, dose limite de  $K_2O$  pour ne pas dépasser 2,3 % de K dans la biomasse de récolte.

#### 4.2.5 Effets de la dose sur la survie à l'hiver

La survie à l'hiver constitue un enjeu considérable pour la pérennisation et le maintien des hauts niveaux de rendement dans la production des cultures fourragères à forte proportion de légumineuses. La résistance à l'hiver intrinsèque de chaque variété de légumineuses viendra influencer leur taux de survie, ainsi que plusieurs facteurs de régie, telles la régie de coupe et la fertilisation (dose et moment d'apport), de même que le développement racinaire, les conditions de couverture de neige et de drainage. Dans la littérature, la fertilisation en K est bien connue pour avoir un impact positif sur la survie à l'hiver (Lloveras et al., 2012; Lu et al., 2018; Greenberg, 2021). En favorisant le transport des carbohydrates et des protéines vers les racines, la fertilisation potassique permet à la plante d'emmagasiner suffisamment des réserves avant la dormance hivernale et du coup, augmente la probabilité d'une bonne reprise au printemps (Lu et al., 2018; Greenberg, 2021). Toutefois, les analyses réalisées dans le cadre de cette étude n'ont pas permis de faire ressortir un impact de la fertilisation potassique sur la survie à l'hiver des prairies de légumineuses (60 % et plus de légumineuses) mesurée au printemps (Tableau 10). L'analyse des contrastes entre les différents traitements n'a abouti à aucune différence significative au seuil  $P < 0,1$  (données non présentées).





**Figure 12.** Variation de la survie à l'hiver en fonction de la dose de K appliquée dans les prairies avec 60 % et plus de légumineuses. Les doses sont identifiées par les groupes de doses, en kg/ha, formés des valeurs minimales et maximales, respectivement, de chaque groupe.

Globalement, la survie se situait entre 80 et 85 %, indépendamment de la dose de K, pour un taux moyen de survie de 84 %. Il se peut que le bénéfice potentiel des doses plus élevées ait été annulé par le moment choisi pour le fractionnement (au printemps et après la première coupe). La part restante des doses élevées était en effet apportée après la 1<sup>re</sup> coupe, ce qui est relativement tôt en saison. Une application plus tardive, juste après la dernière coupe, serait peut-être reliée à une meilleure survie des prairies. Cette hypothèse est appuyée par l'analyse des taux de survie en fonction de la richesse en  $K_{M3}$  des sols qui permet de voir que les niveaux de survie les plus élevés sont associés à de meilleures teneurs en K des tissus, elles-mêmes mesurées dans les sols les plus riches en K (Tableau 32). Cette constatation plaide également en faveur du maintien d'une certaine richesse en  $K_{M3}$  des sols pour assurer la pérennité de luzernières.

**Tableau 32.** Analyses descriptives pour les prairies de légumineuses du taux de survie à l'hiver et de la teneur en K des biomasses récoltées selon différentes classes de teneurs en  $K_{M3}$  du sol.

Classe de teneur en $K_{M3}$ des VSRF (ppm)	$N_{obs}$	Survie à l'hiver (%)			$K_{biomasse}$ (%)
		Min	Moyenne	Max	
≤ 56	558	26	49	69	2,38
56 - 99	462	2	75	100	2,61
> 99	613	70	98	100	3,47

#### 4.2.6 Diagnostic nutritionnel et exportations

À l'instar des essais précédents (N et P), le diagnostic nutritionnel a été effectué sur la biomasse récoltée. Les concentrations et les exportations en  $K_2O$  par les prairies de graminées et de légumineuses en fonction du diagnostic nutritionnel sont présentées au Tableau 33 et à la Figure 15. Ces calculs ont été effectués sur la partie aérienne de la plante, fauchée à une hauteur de 5 à 7 cm du sol. Seuls les résultats pour la 1<sup>re</sup> coupe et le rendement total de la saison, soit la somme des rendements mesurés pour toutes les coupes, sont présentés.

Pour les prairies à forte proportion de graminées (≤ 30 % légumineuses), pour la 1<sup>re</sup> coupe, la concentration en  $K_2O$  de la population présentant à la fois de hauts rendements et une composition nutritionnelle équilibrée (population de tête) a été en moyenne de  $28,5 \pm 2,8$  kg  $K_2O$ /t de fourrage stabilisés à 6 % d'humidité. Considérant un rendement de 4 575 kg/ha,

les exportations de la 1<sup>re</sup> coupe étaient en moyenne de 132 kg K<sub>2</sub>O/ha. Pour l'ensemble de la saison, la population de tête a eu une concentration moyenne de 31,3 ± 4,8 kg K<sub>2</sub>O/t stabilisée à 7 % d'humidité (Tableau 33), équivalent à 33,7 ± 5,2 kg K<sub>2</sub>O/t sur une base de 100 % de matière sèche (MS). Cette valeur est supérieure aux teneurs référencées dans le guide du CRAAQ (2010), lesquelles sont de 24,1, 27,1 et 29,7 kg K<sub>2</sub>O/t MS en moyenne pour respectivement les coupes 1, 2 et 3 dans les prairies de graminées. Considérant un rendement de 8 294 kg/ha, les exportations de la population de tête représentent une moyenne de 2 568 kg K<sub>2</sub>O/ha, bien qu'elles peuvent atteindre des valeurs jusqu'à 352 kg K<sub>2</sub>O/ha.

Pour les légumineuses, en ne considérant que la 1<sup>re</sup> coupe, la concentration en K<sub>2</sub>O de la population de tête a été en moyenne de 33,5 ± 3,5 kg K<sub>2</sub>O/t de fourrage stabilisés à 6 % d'humidité. Considérant un rendement de 5 525 kg/ha, les exportations de la 1<sup>re</sup> coupe étaient en moyenne de 159 kg K<sub>2</sub>O/ha. Pour l'ensemble de la saison, la population de tête a eu une concentration moyenne de 30,1 ± 5,9 kg K<sub>2</sub>O/t stabilisée à 6 % d'humidité (Tableau 11), équivalant à 32,0 ± 6,3 kg K<sub>2</sub>O /t MS. Cette valeur est similaire à celles mentionnées dans le guide de référence du CRAAQ (2010), lesquelles correspondent en moyenne à 30,6, 32,6 et 34,9 kg K<sub>2</sub>O/t MS pour respectivement les coupes 1, 2 et 3. Considérant un rendement de 11 093 kg/ha, les exportations de la population de tête ont une médiane de 331 kg K<sub>2</sub>O/ha, variant de 189 à plus de 400 kg K<sub>2</sub>O/ha.

Bien que les graminées aient des concentrations en K dans leur biomasse similaires à celles des légumineuses, il convient de mentionner qu'elles ont généralement des concentrations plus faibles (Tremblay et al., 2006). Cependant, les valeurs mesurées dans le cadre des essais cadrent bien parmi celles mentionnées dans la littérature scientifique. Plusieurs études soulignent d'énormes variations dans la teneur en K de l'herbage, lesquelles peuvent être causées par les espèces, la teneur initiale du sol en K ou encore la fertilisation en N et K, entre autres (MAAARO; 2008; Tremblay et al., 2006; Whitehead, 2000). Dans ses travaux, Whitehead (2000) a signalé une étendue de 5 à 62 kg K<sub>2</sub>O/t avec des valeurs normales comprises entre 12 et 42 kg K<sub>2</sub>O/ha. En Pennsylvanie, une étude réalisée sur 352 échantillons de graminées fourragères a observé des concentrations en K variant de 2,4 à 40,4 kg/t MS (Adams, 1975).

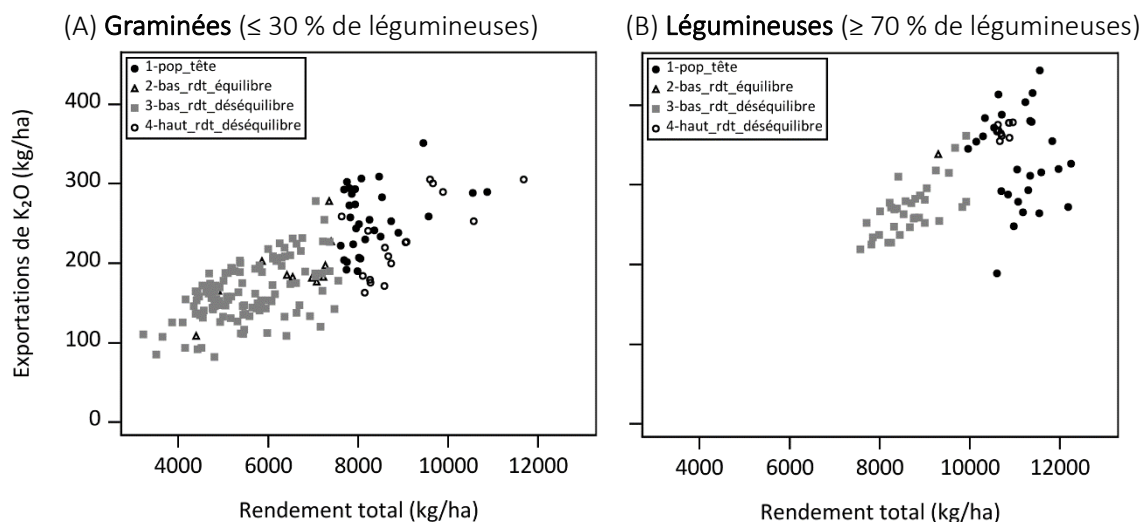
Les données de la Figure 13 montrent que les exportations en K ont augmenté de façon assez linéaire avec les rendements, tant pour les prairies de graminées que de légumineuses. Dans les prairies de graminées, les rendements se sont situés majoritairement entre 4 et 10 t/ha et les exportations ont varié entre 82 et 352 kg K<sub>2</sub>O/ha. Les rendements des prairies de légumineuses étaient généralement plus élevés, variant de 7,5 à 12 t/ha et les exportations ont couvert des plages de valeurs plus élevées, allant de 189 à 444 kg K<sub>2</sub>O/ha. Dans le cadre de cette étude, il n'a pas été possible de produire des valeurs d'exportations détaillées par espèce et encore moins par cultivar, la principale contrainte étant le nombre limité de données disponibles.

**Tableau 33.** Concentrations et exportations en K<sub>2</sub>O des prairies de graminées et de légumineuses selon le diagnostic nutritionnel.

	Humidité <sup>(1)</sup>			Exportations <sup>(2)</sup>			
	(%)	(kg K <sub>2</sub> O/t)		(kg K <sub>2</sub> O/ha)			
		Moy	Éc-T	Moy	Med	Min	Max
<b>Graminées (≤ 30 % de légumineuses)</b>							
<b>1<sup>re</sup> coupe</b>							
Haut rendement et équilibre nutritionnel (« population de tête »)	6	<b>28,5</b>	2,8	<b>132</b>	140	106	162
Faible rendement et équilibre nutritionnel	6	26,6	2,5	98	91	80	129
Faible rendement et déséquilibre nutritionnel	6	29,5	6,0	85	89	30	146
Haut rendement et déséquilibre nutritionnel	7	24,6	3,2	128	126	86	167
<b>Total de la saison</b>							
Haut rendement et équilibre nutritionnel (« population de tête »)	7	<b>31,3</b>	4,8	<b>258</b>	256	190	352
Faible rendement et équilibre nutritionnel	7	29,5	4,4	190	183	109	278
Faible rendement et déséquilibre nutritionnel	6	29,9	5,5	164	159	82	279
Haut rendement et déséquilibre nutritionnel	6	25,6	4,3	230	227	163	306
<b>Légumineuses (≥ 70 % de légumineuses)</b>							
<b>1<sup>re</sup> coupe</b>							
Haut rendement et équilibre nutritionnel (« population de tête »)	6	<b>33,5</b>	3,5	<b>159</b>	147	128	212
Faible rendement et équilibre nutritionnel	7	29,7	6,4	155	155	122	189
Faible rendement et déséquilibre nutritionnel	7	32,1	3,9	129	128	87	188
Haut rendement et déséquilibre nutritionnel	6	27,9	5,5	138	140	102	157
<b>Total de la saison</b>							
Haut rendement et équilibre nutritionnel (« population de tête »)	6	<b>30,1</b>	5,9	<b>331</b>	323	189	444
Faible rendement et équilibre nutritionnel	7	36,5	-	339	339	339	339
Faible rendement et déséquilibre nutritionnel	8	31,1	2,6	270	270	219	362
Haut rendement et déséquilibre nutritionnel	6	34,3	0,8	370	368	355	380

(1) Humidité après séchage à 55 °C pendant au moins 48 h, jusqu'à un poids constant.

(2) Moy : moyenne; Éc-T : Écart-type; Med : médiane; Min : valeur minimale; Max : valeur maximale.



**Figure 13.** Exportations en potassium des prairies de graminées (A) et de légumineuses (B) en fonction des rendements de la saison stabilisés à 6-8% d'humidité, selon le diagnostic nutritionnel.

#### 4.2.7 Fertilisation potassique proposée et comparaison avec les recommandations au Canada et à l'étranger

Les valeurs scientifiques de référence en fertilisation (VSRF) en potassium proposées pour les prairies de graminées et de légumineuses en production sont présentées au Tableau 34. Ces VSRF reposent principalement sur l'effet des doses de K sur le gain de rendement obtenu. Elles tiennent également compte du ratio N:K des graminées, de l'impact du K sur la survie à l'hiver des légumineuses, de la qualité des fourrages, de l'usage du foin, de même que de la littérature scientifique. Ainsi, à la lumière des résultats obtenus suivant l'investigation du rapport N:K, les VSRF finales de prairies de graminées ont été produites en excluant les plants carencés en N ( $N:K < 0,852$ ; section 4.2.3). Par ailleurs, en cas d'absence de données ou de réponse pour une classe de sol, d'autres valeurs (ex. exportations) ou connaissances scientifiques (déséquilibre N:K) ont été exploitées afin de suggérer une dose d'apport. Pour les graminées destinées à l'alimentation des vaches tarées, les doses recommandées sont celles qui permettent d'optimiser le rendement tout en minimisant, en fonction des classes de fertilité en  $K_{M3}$  du sol, les risques d'une teneur trop élevée de K dans la biomasse (section 4.2.4).

Dans les prairies de graminées, des VSRF potassiques ont d'abord été déterminées en considérant l'ensemble des données selon les groupes de textures du sol (G1 et G2-G3) et les teneurs en  $K_{M3}$  du sol (section 4.2.2). Toutefois, l'étude de l'interaction entre le N et le K force à constater que le N était apporté à une dose insuffisante (100 N) dans les essais du PSEF, ce qui a probablement limité l'ampleur de la réponse observée dans les essais K où le sol n'a pas pu compenser le manque de fourniture en N. Par ailleurs, une continuité s'observe dans les classes de fertilité entre les deux grands groupes de textures (G1 et G2-G3) puisque les G2-G3, naturellement moins riches en K, avaient des teneurs majoritairement sous 100 ppm  $K_{M3}$ , tandis que les G1 étaient pratiquement les seuls représentants des sols  $> 100$  ppm  $K_{M3}$  (section 4.1). Par conséquent, il devient possible de regrouper les données des trois groupes de textures, afin de ne produire qu'un seul tableau de VSRF, ce qui permet d'obtenir assez de données pour ne considérer que les plants non carencés (ratio N:K  $> 0,852$ ) dans l'analyse (section 4.2.3). Ainsi, pour toutes textures confondues de sol, une dose de 200 kg  $K_2O/ha$  est recommandée pour les sols dont la teneur en  $K_{M3}$  est inférieure à 50 ppm. Pour les sols de 50 à 100 ppm  $K_{M3}$ , la dose de 127 kg  $K_2O/ha$ , permettant l'atteinte du  $ROM_{max}$ , est retenue (gain de 22 %). Pour les sols de richesse en  $K_{M3}$  élevée (100 à 200 ppm), la dose de potassium n'a pas eu d'impact significatif sur les gains. Toutefois, un intervalle de doses est proposé, délimité par la plus petite dose testée et la moitié (arrondie) de la dose de la classe précédente comme bornes inférieure et supérieure de cet intervalle (25 à 65 kg  $K_2O/ha$ ). Cette décision se base sur des résultats de recherche de la littérature et sur les nouvelles VSRF du N (145-225 kg N/ha), afin de contribuer au maintien d'un ratio N:K adéquat dans la biomasse des graminées. En effet, sachant l'interaction existant entre le N et le K (voir analyse section 4.2.3), un apport en K trop faible pourrait s'avérer insuffisant s'il est combiné aux plus fortes doses de N. L'usage de la dose de 65 kg  $K_2O/ha$  diminue ce risque. Ceci expliquerait pourquoi certaines études sur la fertilisation K des graminées (Lunnan et al., 2018; Øgaard et al., 2002) rapportent qu'une dose de 60 kg  $K_2O/ha$  permettrait de maintenir un bon niveau après la première année de production et produirait des gains de rendement certaines années pour cette teneur médiane en K du sol. Par ailleurs, l'intervalle de doses évite également de créer un écart très important avec la dose de la classe précédente. Lorsque le sol montre une teneur au-delà de 200 ppm  $K_{M3}$ , aucune fertilisation potassique n'est jugée nécessaire, considérant l'absence de réponse et la richesse du sol en K.

Dans le cas spécifique des vaches en transition, un fourrage présentant une faible DACA est essentielle pour prévenir les risques d'hypocalcémie et prioritaire sur l'atteinte de rendement maximal. À défaut d'être modulées selon la DACA, les recommandations en  $K_2O$  ont pris en compte une teneur de K maximale à ne pas dépasser dans les fourrages (section 4.2.4). Ainsi, pour les prairies de graminées, sur des sols ayant un  $K_{M3}$  inférieur à 67 ppm, une dose inférieure ou égale à 110 kg  $K_2O/ha$  est recommandée. Dans les sols mieux pourvus en K ( $> 67$  ppm  $K_{M3}$ ), aucune dose de  $K_2O$  ne doit être appliquée. En fait, même sans apport de K, la teneur en K de la biomasse dépassait déjà le seuil limite de 2,3 %. Ainsi, il ne semble pas souhaitable d'utiliser un champ de cette teneur ou plus en potassium ( $> 67$  ppm  $K_{M3}$ ) pour produire un fourrage destiné aux vaches en transition. Dans tous les cas, il est par la suite essentiel de considérer la DACA réelle du fourrage obtenu au moment d'élaborer le programme alimentaire de vaches en période de transition.

Dans les prairies de légumineuses (70 % et plus), les classes de fertilité ont été établies sur la base de la teneur en  $K_{M3}$  du sol sans distinction du groupe de texture. Comme aucune analyse n'a été possible dans les sols ayant des teneurs inférieures à 47 ppm  $K_{M3}$ , une dose totale de 300 kg  $K_2O/ha$  est proposée en vue de limiter les risques de perte de rendements et favoriser la survie à l'hiver. En effet, il a été mesuré que le taux de survie de la culture augmente fortement lorsque les sols sont davantage pourvus en K (Tableau 32). Dans la littérature, une nutrition potassique adaptée est un facteur de gestion susceptible d'améliorer la résistance à l'hiver de la luzerne (Castonguay et al., 2006). En favorisant une bonne acclimatation de la luzerne au froid (CRAAQ, 2022), une teneur élevée de K dans le sol réduit le stress que pourrait induire une récolte tardive à l'automne (Hanson et al., 1988). En ce sens, l'apport de 300 kg  $K_2O/ha$  permettra de contrer une baisse additionnelle de fertilité des sols déjà très faiblement pourvus en K. Cette dose, en plus de correspondre à la dose actuellement recommandée (CRAAQ, 2010) dans la catégorie de sols la moins pourvue en K pour les prairies de légumineuses, permet en effet de couvrir les exportations de la culture (moyenne de la population de tête de 332 kg  $K_2O/ha$ ). Une étude de Macolino et al. (2013) estime également suffisante une dose de 300 kg  $K_2O/ha$  pour atteindre le maximum de rendement chez la luzerne cultivée en sol limoneux (178 ppm de  $K_{M3}$ ). Dans les deux classes de fertilité suivantes, soit de 43 à 84 ppm  $K_{M3}$ , puis de 84 à 168 ppm  $K_{M3}$ , les doses optimales respectives de 207 et de 115 kg  $K_2O/ha$  obtenues suivant les analyses par régression quadratique sont proposées. Pour un sol entre 168 et 335 ppm  $K_{M3}$ , la plus petite dose testée de 50 kg/ha est suggérée, ce après quoi aucun apport potassique n'est jugé nécessaire en absence de gains par la fertilisation potassique, vu la fertilité du sol en K. Conformément à ce qui a été testé dans les prairies de légumineuses et l'actuelle recommandation du CRAAQ (2010), il est suggéré de fractionner les apports dépassant 150 kg  $K_2O/ha$ . Le cas échéant, le fractionnement proposé consiste en deux apports égaux (50-50 %) apportés au printemps et après la 1<sup>re</sup> coupe.

Dans les prairies mixtes avec des pourcentages de légumineuses allant de 31 à 69 %, des contraintes liées à un nombre réduit de données, la répartition des sites dans les différentes régions du Québec (seulement 3 sites) et les groupes de texture (seulement des sols de G2; Tableau 26) n'ont pas permis de déterminer les VSRF en se basant sur l'analyse statistique du rendement en fonction des doses croissantes de potassium. Une grille mitoyenne entre celle des graminées et celles des légumineuses est cependant proposée en fin de chapitre (p. 71).

**Tableau 34.** Fertilisation potassique des prairies en production – Valeurs scientifiques de référence en fertilisation.

Type de prairies	Groupes de textures du sol <sup>(1)</sup>	Classe de fertilité K Mehlich-3 (ppm)	Période d'application <sup>(2)</sup>	Fractionnement <sup>(2)</sup> (kg K <sub>2</sub> O/ha)	VSRF <sup>(3)</sup> (kg K <sub>2</sub> O/ha)
<b>Graminées</b> <sup>(9,10)</sup> (≤ 30 % de légumineuses)	G1, G2, G3	< 50	Au printemps Après la 1 <sup>re</sup> coupe	100 100	200 <sup>(4)</sup>
		50 – 100			125 <sup>(4)</sup>
		100 – 200	Au printemps	-	25-65 <sup>(5)</sup>
		> 200			0 <sup>(6)</sup>
<b>Mixtes</b> (31- 69 % de légumineuses)			Données en quantité insuffisante <sup>(7)</sup>		
<b>Légumineuses</b> (≥ 70 % de légumineuses)	G1, G2, G3	< 43	Au printemps Après la 1 <sup>re</sup> coupe	150 150	300 <sup>(8)</sup>
		43 – 84	Au printemps Après la 1 <sup>re</sup> coupe	104 103	205 <sup>(4)</sup>
		84 – 168			115 <sup>(4)</sup>
		168 – 335	Au printemps	-	0-50 <sup>(5)</sup>
		> 335			0 <sup>(6)</sup>

(1) G1 : sols à textures fines; G2 : sols à textures moyennes; G3 : sols à textures grossières.

(2) Les périodes de fractionnement sont proposées telles que testées, c'est-à-dire 50-50 % au printemps et après la 1<sup>re</sup> coupe lorsque la dose était supérieure à 150 kg K<sub>2</sub>O/ha. Cependant, pour les prairies de légumineuses (≥ 70% lég.), il est recommandé de faire une application après l'avant-dernière coupe, ou 500 degrés-jours (base de 5°C) avant le dernier gel.

(3) VSRF : Valeurs scientifiques de référence en fertilisation.

(4) Dose optimale proposée (dose visant l'atteinte de 100 % du ROM) arrondie au multiple de 5, le cas échéant.

(5) Intervalle formé de la plus petite dose testée et la moitié de la recommandation supérieure, considérant le peu de réponse dans cette catégorie de sol et l'importance de maintenir un ratio N:K adéquat lors de l'application de VSRF du N plus élevées.

(6) Dose nulle proposée considérant l'absence de réponse et la richesse du sol en K<sub>M3</sub>.

(7) Données en quantité insuffisante dans les prairies mixtes.

(8) En l'absence de données dans cette classe de fertilité du sol, dose proposée en vue de limiter les risques de perte de rendements et de diminution accrue de la fertilité potassique des sols très faiblement pourvus en K. Cette dose couvre les exportations (moyenne de la population de tête de 332 kg K<sub>2</sub>O/ha) de la culture.

(9) Pour les prairies de graminées, une alimentation suffisante en N est nécessaire pour une réponse optimale de la culture à la fertilisation potassique.

(10) Pour les graminées destinées à l'alimentation des vaches en transition, utiliser une dose inférieure ou égale à 110 kg K<sub>2</sub>O/ha dans les sols de < 67 ppm K<sub>M3</sub> afin d'éviter les risques de dépasser la teneur limite en K de la biomasse de 2,3 % MS. Dans les sols ≥ 67 ppm K<sub>M3</sub>, la limite de 2,3 % est atteinte sans aucun apport de K. Ainsi, aucun apport n'est recommandé dans cette situation, et il est souhaitable d'utiliser un champ plus pauvre en potassium afin de produire un fourrage destiné aux vaches en transition. Il est essentiel de considérer la DACA réelle du fourrage obtenu au moment d'élaborer le programme alimentaire pour vaches en période de transition.

L'intervalle des VSRF proposées dans le cadre de cette étude pour la fertilisation potassique des prairies en production est similaire à celui recommandé actuellement au Québec (CRAAQ, 2010). Pour les légumineuses, les doses proposées varient de 0 kg K<sub>2</sub>O/ha dans les sols les plus riches en K<sub>M3</sub> à 300 kg K<sub>2</sub>O/ha dans les sols très pauvres. Toutefois, pour les graminées, les doses du CRAAQ (2010) varient de 0 à 160 kg K<sub>2</sub>O/ha alors que les résultats de la présente étude proposent des doses s'étalant de 0 à 200 kg K<sub>2</sub>O/ha. Une comparaison aux grilles en vigueur dans les autres provinces canadiennes et ailleurs aux États-Unis est présentée au Tableau 35. Les recommandations de la présente étude varient dans le même ordre de grandeur. Cette étude vient aussi confirmer les besoins plus grands en potassium chez les légumineuses en comparaison aux graminées, puisque pour des classes de fertilité comparables, les besoins étaient 1,5 fois environ supérieurs pour les légumineuses par rapport à ceux des graminées.

**Tableau 35.** Comparaison des recommandations en K<sub>2</sub>O pour la production des prairies en production au Canada et aux États-Unis

Provinces/ États	Mode et période d'appli- cation	Fractionnement	Indicateurs		Obj. de rdt (t/ha)	Dose K <sub>2</sub> O (kg/ha)		Source	
			Fertilité du sol	Autres		0-40 % lég.	40-100 % lég.		
Québec (CAN)	-	2 coupes: 50 % après 1 <sup>re</sup> coupe + 50 % après 2 <sup>e</sup> coupe. 3 coupes : Trois apports: au printemps, après 1 <sup>re</sup> coupe et après 2 <sup>e</sup> coupe	0-50 kg K <sub>M3</sub> /ha	Texture du sol	Prairies de 40-100 % lég.: 7-8	0-40 % lég.	40-100 % lég.	CRAAQ (2010)	
			51-100			150-160	270-300		
			101-150			125-145	180-220		
			151-200			110-130	140-170		
			201-250			80-110	100-140		
			251-500			40-80	40-100		
501 et +	0-30	20-50							
Ontario (CAN)	-	-	K du sol (K acétate d'ammonium)	-	-	0 - 480		MAAARO (2017)	
Provinces de l'Atlantique (CAN)	-	60-100 % lég.: 60 K <sub>2</sub> O au printemps + 90- 120 K <sub>2</sub> O après la 1 <sup>re</sup> coupe	-	-	-	0-30 % lég.	30-60 % lég.	60-100 % lég.	Atlantic Forage and Corn Team (2021)
						100	100	150-180	
Minnesota (É-U)	Au printemps	-	K du sol	Objectif de rendement	4,9 – 12,4 et +	Graminées	Mélange lég.+ gram.	University of Minnesota extension (2018)	
						0 - 258	0 - 134		
Vermont (É-U)	-	-	K du sol (K Morgan modifié)	Objectif de rendement	4,9 – 14,8 et +	30-60 % lég.	60-100 % lég.	University of Vermont Extension (2017)	
						0 - 403	0 - 291		
Wisconsin (É-U)	-	-	Texture du sol, K du sol (K <sub>Bray1</sub> )	Texture du sol, objectif de rendement	1,2 – 19,8 et +	0 - 515		Laboski et Peters (2012)	

(1) 0-30 % de légumineuses: 0 kg K<sub>2</sub>O /ha au printemps + 75-100 kg K<sub>2</sub>O /ha après chaque coupe + 60 kg K<sub>2</sub>O /ha après la dernière coupe. 30-60 % de légumineuses: 0 kg K<sub>2</sub>O /ha au printemps + 45 kg K<sub>2</sub>O/ha après la première coupe + 60 kg K<sub>2</sub>O/ha après la dernière coupe. 60-100 % de légumineuses: 110 kg K<sub>2</sub>O /ha au printemps + 100 kg K<sub>2</sub>O/ha après chaque coupe + 100 kg K<sub>2</sub>O/ha après la dernière coupe.

## Insuffisance de données dans les prairies mixtes (31- 69 % de légumineuses)

Pour les prairies mixtes, l'absence de données représentatives et en quantité suffisante n'a pas permis de déterminer des VSRF sur la base des analyses statistiques. En absence d'indicateurs de fertilité et de doses optimales modélisées, une grille moyenne entre celle des graminées et celle des légumineuses devrait permettre de couvrir les besoins en K des prairies mixtes. Considérant les besoins plus importants en K des légumineuses, les classes de fertilité proposées ont été calquées sur ces dernières. Quatre classes ont été retenues : 1) inférieur ou égal à 45 ppm  $K_{M3}$ , 2) entre 45 et 85 ppm, 3) entre 85 et 170 ppm et 4) supérieur à 170 ppm. Toutes textures confondues, des doses moyennes respectives de 250, 170, 85 et 0-50 kg  $K_2O/ha$  pourraient donc être proposées pour les quatre classes de fertilité des sols.

Type de prairies	Groupes de textures du sol	Classe de fertilité K Mehlich-3 (ppm)	Période d'application	Fractionnement (kg $K_2O/ha$ )	VSRF (kg $K_2O/ha$ )
Mixtes (31-69 % de légumineuses)	G1, G2, G3	< 45	Au printemps	125	250
			Après 1 <sup>re</sup> coupe	125	
		45-85	Au printemps	85	170
			Après 1 <sup>re</sup> coupe	85	
85-170		-	85		
> 170	Au printemps	-	0-50		

G1 : sols à textures fines; G2 : sols à textures moyennes; G3 : sols à textures grossières; VSRF : Valeurs scientifiques de référence en fertilisation.



## Survie à l'hiver

Dans les conditions de cette étude, les doses croissantes de potassium n'ont pas permis d'accroître la survie à l'hiver chez les légumineuses. Cependant, les valeurs les plus élevées de survie à l'hiver ont été mesurées pour les plants des essais en sols riches en  $K_{M3}$ . De plus, les moments d'application des engrais K, au plus tard après la 1<sup>re</sup> coupe, ont pu être la cause de la non-réponse à la survie. Dans cette grille, les périodes de fractionnement sont proposées telles qu'elles ont été testées, c'est-à-dire 50-50 % au printemps et après la 1<sup>re</sup> coupe lorsque la dose était supérieure à 150 kg  $K_2O/ha$ . Cependant, pour les prairies de légumineuses ( $\geq 70\%$  lég.), une application immédiatement après l'avant-dernière coupe, ou 500 degrés-jours (base de 5°C) avant le premier gel pourrait être intéressante pour améliorer la survie à l'hiver.

## Interaction N et K

Dans les essais de fertilisation K du PSEF, les apports en N se sont limités à 100 kg N/ha, ce qui apparaît insuffisant considérant les VSRF azotées obtenues dans les essais N (VSRF de 145-225 kg N/ha; Tableau 17). Sachant l'interaction existant entre le N et le K (voir analyse section 4.2.3), il en ressort que les essais K ont été réalisés dans des conditions de fertilisation N limitantes. Cet état de fait peut occasionner une sous-estimation de la dose de K nécessaire si elle était combinée à de plus fortes doses de N, bien que des analyses supplémentaires aient été produites en éliminant les données les plus susceptibles d'être carencées en N (ratio N:K < 0.852, section 4.2.3). Par conséquent, une analyse des foins est suggérée pour vérifier que le K ne soit pas déficient (un rapport N:K dans la biomasse  $\leq 1,3$  est recherché pour maximiser le rendement). Toutefois, pour du foin de graminées destiné à l'alimentation des vaches en transition, l'analyse de la DACA doit être prioritairement prise en compte.



### **Utilisation des coefficients d'efficacité des engrais**

Une part significative des prairies fait l'objet d'une fertilisation organique. Cependant, les engrais utilisés lors des essais étaient sous forme minérale avec un coefficient d'efficacité considéré par défaut à 100 %. Dans le cas où les engrais seraient apportés sous une forme organique, il revient à l'agronome d'utiliser les bons coefficients d'efficacité et les bons facteurs de perte, de même que d'informer le producteur sur les bonnes pratiques d'épandage afin d'éviter tout apport excessif et de minimiser les pertes.

## 5 FERTILISATION SOUFRÉE

### 5.1 Portrait et représentativité des données d'analyse de sol

Le Tableau 36 donne un résumé de la répartition des blocs en fonction des différents paramètres de sol pouvant avoir un effet sur la disponibilité et l'utilisation du soufre par les prairies. Le principal facteur qui limite la biodisponibilité du soufre est l'acidité du sol. En effet, dans les sols acides, les hydroxydes de fer et d'aluminium ont la capacité de fixer les sulfates du sol (Oenema et Postma, 2003), réduisant leur disponibilité pour les plantes. Toutefois, la majeure partie des sulfates du sol se trouvent en solution à pH > 6 (Erikson, 2009). Dans le cadre des essais de cette présente étude, le pH était à un seuil suffisant pour limiter l'impact de l'acidité du sol sur le soufre. En moyenne, moins de 30 % environ des données de pH étaient inférieures à 6. Pour les prairies de graminées, le pourcentage des blocs dans la plage optimale de pH (6 – 7; CRAAQ, 2022) était de 64 %. Pour les prairies de légumineuses, la plage de pH optimal est plutôt de 6,2 à 7,0 (CRAAQ, 2022). Un total de 74 % des blocs se trouve à l'intérieur de cette plage. La disponibilité du soufre est aussi liée au processus de minéralisation de la matière organique (MO) du sol, laquelle fournit de 95 % à l'alimentation en soufre (Haupt et al., 2015). Tous types de prairies confondus, plus de 95 % des blocs ont une teneur en MO supérieure à 3,5 %, seuil en dessous duquel de meilleures réponses du rendement à la fertilisation soufrée sont attendues (Jeschke et al., 2017). De manière générale, le pourcentage en N total du sol était inférieur à 0,5 %. Pour les prairies de graminées et les prairies mixtes, la teneur en S<sub>M3</sub> dépassait le seuil de 8 ppm sous lequel le rendement est grandement influencé par la teneur en S du sol (Ketterings et al., 2012), tandis que pour les légumineuses, 27 % des blocs se trouvaient sous cette limite de 8 ppm.

**Tableau 36.** Répartition des blocs pour l'analyse de S des prairies en production selon différentes classes de propriétés de sol après la validation des données.

pH <sub>eau</sub> <sup>(1)</sup>	Blocs (%)	MO <sub>PAF</sub> (%) <sup>(2)</sup>	Blocs (%)	Azote total (%) <sup>(3)</sup>	Blocs (%)	S <sub>M3</sub> (ppm) <sup>(4)</sup>	Blocs (%)
<b>Graminées (≤ 30 % de légumineuses)</b>							
≤ 5,5	5	≤ 2	0	≤ 0,5	91	≤ 8	2
5,5 – 6,0	25	2 – 3,5	4	0,5 – 1	9	8 – 16	61
6,0 – 6,5	30	3,5 – 5	39	1 – 5	0	16 – 24	31
6,5 – 7,0	34	5 – 6	19	> 5	0	> 24	7
> 7,0	6	> 6	38	-	-	-	-
<b>Mixtes (31 à 69 % de légumineuses)</b>							
≤ 5,5	0	≤ 2	0	≤ 0,5	100	≤ 8	0
5,5 – 6,0	11	2 – 3,5	0	0,5 – 1	0	8 – 16	78
6,0 – 6,5	47	3,5 – 5	9	1 – 5	0	16 – 24	22
6,5 – 7,0	42	5 – 6	33	> 5	0	> 24	0
> 7,0	0	> 6	58	-	-	-	-
<b>Légumineuses (≥ 70 % de légumineuses)</b>							
≤ 5,5	0	≤ 2	0	≤ 0,5	86	≤ 8	27
5,5 – 6,1	26	2 – 3,5	3	0,5 – 1	5	8 – 16	62
6,2 – 6,5	51	3,5 – 5	61	1 – 5	0	16 – 24	11
6,5 – 7,0	23	5 – 6	10	> 5	9	> 24	0
> 7,0	0	> 6	26	-	-	-	-

(1) Le pH optimal est de 6,0 à 7,0 pour les prairies de graminées et de 6,2 (G1, G2) ou 6,5 (G3) à 7,0 pour la luzerne (CRAAQ, 2022)

(2) Matière organique déterminée par la méthode par perte au feu.

(3) Azote total mesuré dans la couche 0-20 cm par combustion.

(4) S<sub>M3</sub> : K extrait par la méthode Mehlich-3 (1984).

\* Prairie de graminées : 17 sites (50 blocs); prairies mixtes : 3 sites (9 blocs); prairies de légumineuses : 13 sites (39 blocs).

## 5.2 Statistiques descriptives des analyses de la biomasse

Pour les prairies de graminées, l'analyse descriptive des données de la teneur en S dans la biomasse des fourrages a permis de constater que les plages de valeurs étaient similaires avec ou sans ajout de S (Tableau 37). Ainsi, en absence de fertilisation soufrée, les teneurs en S mesurées dans les tissus de la plante ont varié entre 0,14 à 0,34 %, avec une moyenne de 0,21 %. Dans les parcelles fertilisées, ces valeurs variaient entre 0,14 et 0,37 % (moyenne de 0,22 %). Pour ce qui est du rapport N:S, il a diminué comme attendu avec l'ajout de S, passant de 11,5 à 11,0 en moyenne.

Pour les prairies mixtes et de légumineuses, l'ajout de S semble avoir une influence plus marquée. Ainsi, dans les parcelles fertilisées en S, les teneurs moyennes en S des tissus ont majoritairement dépassé la valeur de 0,25 % (seuil de carence de la luzerne; Schulte and Kelling, 1992; Haupt et al., 2015) qui sert de valeur repère puisqu'il n'y a pas de seuil rapporté de carence pour les prairies mixtes et de graminées, en comparaison au témoin (Tableau 37). Bien que des valeurs maximales étaient plus grandes chez les légumineuses, la teneur moyenne a été de 0,29 % pour les deux types de prairies. Par contre, pour les prairies mixtes, l'ajout du S a fait passer le rapport N:S en dessous du seuil de 12 (Gierus et al., 2005), tandis que pour les légumineuses, ce rapport, bien que diminué, a été maintenu entre 12 et 16. La capacité des légumineuses à fixer de l'azote pourrait expliquer la baisse moins importante du ratio N:S suivant la fertilisation soufrée, en comparaison des graminées.

**Tableau 37.** Statistiques descriptives de la teneur en S et du rapport N:S dans la biomasse pour les différents types de prairies en production en fonction des traitements appliqués.

Dose de S (kg/ha)	S (%) <sup>(1)</sup>			Proportion (%) ≥ 0,25 % S	N:S		
	Min	Moyenne	Max		Min	Moyenne	Max
<b>Graminées (≤ 30 % de légumineuses)</b>							
0	0,14	0,21	0,34	9,7	6,6	11,5	16,7
25	0,14	0,22	0,37	25,0	6,1	11,0	15,9
<b>Mixtes (31 à 69 % de légumineuses)</b>							
0	0,20	0,24	0,30	22,2	9,6	13,0	17,9
25	0,25	0,29	0,31	100,0	10,0	10,1	11,5
<b>Légumineuses (≥ 70 % de légumineuses)</b>							
0	0,15	0,23	0,38	24,7	11,0	14,9	19,6
25	0,22	0,29	0,43	59,46	9,2	12,5	14,7

(1) Proportion des données de part et d'autre du seuil de carence de 0,25 % de la luzerne (Schulte and Kelling, 1992; Haupt et al., 2015)

## 5.3 Effet de la dose de soufre sur la nutrition et les rendements

Dans la littérature scientifique, la réponse des cultures fourragères à la fertilisation en S est de plus en plus étudiée. À la fois pour les graminées et les légumineuses, ces études démontrent l'importance de l'ajout de S dans l'augmentation de la qualité et du rendement des prairies (Gierus et al., 2005; Malhi et al., 2005; Ketterings et al., 2012; Haupt et al., 2015; Aspel et al., 2021). Les résultats de la présente étude vont dans le même sens. Les prochaines sections traitent de l'effet de l'ajout de soufre sur la teneur en S des tissus (5.3.1), sur la teneur en protéines brutes (5.3.2) et sur le rendement en matière sèche (5.3.3).

### 5.3.1 Effet de la dose de soufre sur la teneur en S des tissus

Une augmentation significative de la teneur en S dans la biomasse a été observée pour tous les types de prairies à la suite de l'ajout de 25 kg S/ha (Tableau 38.) La réponse a été plus importante pour les prairies ayant plus de 30 % de légumineuses. En effet, la probabilité que l'apport en S entraîne une augmentation de la teneur en S dans la biomasse des

tissus est de 34 et 28 %, pour les prairies de légumineuses et mixtes, respectivement, et diminue à 9 % pour les prairies de graminées.

Pour les prairies mixtes et de légumineuses, les valeurs moyennes estimées de la teneur en S dans la biomasse dépassaient le seuil de 0,25 % pour les parcelles fertilisées (traitement T<sub>s</sub>). Les résultats d'une étude de Gunes et al. (2009) sur la luzerne corroborent ce résultat et démontrent que la teneur en S dans la luzerne augmente par rapport au témoin pour des apports de S légèrement plus élevés variant de 160 à 240 kg/ha de gypse (94% CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O), soit environ 35 à 55 kg S/ha. En plus de permettre une meilleure utilisation de l'azote via le processus de fabrication des protéines à base de soufre, le soufre favorise l'absorption par la luzerne de la plupart des éléments nutritifs nécessaires au bon fonctionnement de la plante (Gunes et al., 2009). Pour les graminées, l'impact de la carence en S sur les rendements et la qualité est moins bien connu. Dans le cadre des essais du PSEF, les traitements recevant 25 kg S/ha ont eu une teneur moyenne de 0,214 % de S dans la biomasse, ce qui est bien en deçà de la valeur de 0,36 % obtenue par Mathot et al. (2008). Ces derniers avaient cependant testé des doses de S beaucoup plus importantes, variant entre 40 à 60 kg S/ha. Néanmoins, les résultats concordent, soit que la fertilisation soufrée a augmenté la teneur en S de la biomasse chez les graminées au seuil  $P < 0,05$ . Cependant, cela a fait diminuer significativement le rapport N:S qui était déjà sous la valeur limite de 12 (Gierus et al., 2005). Le rapport N:S est en effet passé de 11,7 à 11 pour les graminées. Cette variation est cependant légère. Ceci indique, soit que la culture a déjà accès à suffisamment de S ou que la dose d'apport testée n'était pas suffisante. Considérant les nouvelles VSRF du N établies dans la présente étude, ce résultat est probablement dû à un manque de fertilisation azotée. Ainsi, dans les prairies de graminées, lorsque le N est limitant, l'ajout du soufre semble faire augmenter le prélèvement en S sans avoir un réel avantage sur la production.

**Tableau 38.** Résultats de la modélisation de la teneur en S dans la biomasse en fonction des types de prairies et de la dose de S appliquée

Dose de S (kg/ha)	Moyenne (%)	Erreur-type	odds.ratio <sup>(1)</sup> (T <sub>s</sub> /T <sub>0</sub> )	Valeur de P
<b>Graminées (≤ 30 % de légumineuses)</b>				
0	0,20	0,01	1,09	0,001
25	0,21	0,01		
<b>Mixtes (31 à 69 % de légumineuses)</b>				
0	0,24	0,03	1,28	< 0,001
25	0,29	0,03		
<b>Légumineuses (≥ 70 % de légumineuses)</b>				
0	0,23	0,01	1,34	< 0,001
25	0,29	0,02		

(1) odds.ratio : Probabilité qu'un traitement entraîne une variation par rapport au témoin. Une valeur supérieure à 1 exprime une augmentation de la chance et dans le cas contraire, une diminution.

### 5.3.2 Effet de la dose de soufre sur la teneur en protéines brutes

Le soufre (S) est un élément nutritif essentiel pour les prairies et participe à la constitution de certains acides aminés (Gunes et al., 2009). La cystéine, la cystine et la méthionine sont les principaux acides aminés soufrés des protéines. Ils jouent un rôle prépondérant dans la formation de certaines hormones et enzymes. Une déficience en S entraîne une diminution des composés soufrés des tissus végétaux et affecte négativement la qualité et le rendement des cultures (Oenema et Postma, 2003). Des études réalisées au début des années 2000 (Scherer, 2001; Gierus et al., 2005; Tallec et al., 2008) traitent du lien étroit entre l'azote et le soufre. Selon leurs travaux, une déficience en S peut provoquer une diminution de la teneur en protéines de la plante et une augmentation des composés azotés non protéiques tels que des nitrates, des acides aminés libres et des amides.

Dans le cadre des essais S, la fertilisation en soufre a principalement permis d'augmenter la teneur en protéines brutes des prairies de légumineuses (Tableau 39). Pour ces dernières, une augmentation significative d'environ un point de pourcentage (0,83 %) a été obtenue pour atteindre en moyenne une teneur de 21,7 % suivant des apports de S. Pour les prairies mixtes, seule une tendance d'augmentation de la teneur en protéines à  $P = 0,088$  équivalent à 0,32 % a été mesurée. Ainsi, une valeur moyenne tous traitements confondus de 19,7 % peut être retenue. Enfin, aucune différence n'a été observée pour les prairies de graminées, avec une teneur moyenne en protéines beaucoup plus basse, de 13,31 % (tous traitements confondus). Ceci concorde avec le fait que les prairies de graminées sont reconnues pour présenter en général des teneurs en protéines brutes moins élevées que les prairies de légumineuses (Bélanger et al., 2019) pour lesquelles des valeurs entre 18-20 % sont recherchées dans le cadre de l'alimentation des vaches laitières (J.P. Laroche, comm. personnelle). Dans cette étude, ces pourcentages (18 - 20 %) se retrouvent d'ailleurs dans les moyennes obtenues pour les prairies mixtes et de légumineuses fertilisées ou non en S.

**Tableau 39.** Résultats de la modélisation de la teneur en protéine brute dans la biomasse en fonction des types de prairies et de la dose de S appliquée

Dose de S (kg/ha)	Protéine brute (% MS)			
	Moyenne	Erreur-type	$T_s - T_0^{(1)}$	Valeur de P
Graminées ( $\leq 30$ % de légumineuses)				
0	13,33	1,25	-0,05	0,574
25	13,284	1,25		
Mixtes (31 à 69 % de légumineuses)				
0	19,50	1,70	0,33	0,088
25	19,82	1,70		
Légumineuses ( $\geq 70$ % de légumineuses)				
0	20,89	1,18	0,83	< 0,001
25	21,71	1,17		

(1)  $T_s - T_0$ : Différence entre les traitements fertilisés et les traitements non fertilisés au soufre.

### 5.3.3 Effet de la dose de soufre sur le rendement en matière sèche

L'impact de la fertilisation soufrée a varié selon le pourcentage de légumineuses (Tableau 40). Les résultats présentés au Tableau 40 montrent que les augmentations de rendements étaient inexistantes suivant l'apport de S, par rapport aux traitements témoins ( $T_0$ ), pour les prairies de graminées ( $P = 0,802$ ) et mixtes ( $P = 0,565$ ). Par contre, le rendement des prairies de légumineuses a très significativement augmenté. Ce gain de rendement a été de 4,2 %, ce qui signifie non seulement 390 kg/ha de plus de fourrages, mais d'une teneur 3,9 % plus élevée en protéines, en comparaison du témoin  $T_0$ . Une analyse plus approfondie qui tenait compte des teneurs en S des tissus, a cependant permis de constater que l'ajout de S dans les prairies de légumineuse n'est en fait bénéfique qu'en cas de carence en S. Comme le montre le Tableau 41 lorsque les données sont divisées en fonction du seuil de 0,25 % (seuil de carence de la luzerne), une augmentation significative du rendement d'environ 8 % a été obtenue pour les prairies carencées, tandis qu'aucun effet n'a été observé pour les non carencées. Ainsi, l'effet est deux fois plus important que lorsque tous les sites sont considérés. En d'autres mots, l'apport de S sur les prairies carencées a augmenté les rendements de 747 kg/ha et le taux de protéines de 3 %.

Nos résultats sont corroborés par d'autres études. Ainsi, Haupt et al. (2015) rapportent également une réponse significative des prairies de légumineuses aux apports de S pour 5 sites sur 8 réalisés (augmentation moyenne de 13.25 % du rendement avec l'apport de 5-40 kg S/ha). Par ailleurs, l'effet du soufre sur le rendement des graminées est rapporté en général pour être moindre, comparativement aux légumineuses. À partir de trois années d'expérimentation réalisées

par Mathot et al. (2008) sur les prairies de graminées, seulement 7 coupes sur 51 ont abouti à une augmentation significative du rendement à la suite de la fertilisation en soufre (25 kg S/ha). Cependant, une étude plus récente a abouti à des conclusions différentes. Selon la littérature scientifique, l'apport de S aurait une interaction positive sur l'assimilation du N dans les prairies expliquant les augmentations de rendement. Par exemple, des essais réalisés en bacs lysimétriques ont montré une relation de synergie entre N et S aboutissant à une augmentation de rendement et une diminution des pertes en nitrates du sol (Aspel et al., 2021).

**Tableau 40.** Impact de l'apport de S sur le rendement en fonction des types de prairies

Dose de S (kg/ha)	Rendement (kg/ha)			
	Moyenne	Erreur-Type	T <sub>s</sub> /T <sub>0</sub> <sup>(1)</sup>	Valeur de P
<b>Graminées (≤ 30 % de légumineuses)</b>				
0	6 979	409	1,005	0,802
25	7 013	418		
<b>Mixtes (31 à 69 % de légumineuses)</b>				
0	8 280	498	1,022	0,565
25	8 458	525		
<b>Légumineuses (≥ 70 % de légumineuses)</b>				
0	9 210	540	1,042	<b>0,006</b>
25	9 600	569		

(1) T<sub>s</sub>/T<sub>0</sub> : Rapport de rendement entre les traitements fertilisés et les traitements non fertilisés au soufre.

**Tableau 41.** Impact de l'apport de S selon le statut de carence en S des plants sur le rendement des prairies de légumineuses

Dose de S (kg/ha)	Rendement (kg/ha)			
	Moyenne	Erreur-Type	T <sub>s</sub> /T <sub>0</sub> <sup>(1)</sup>	Valeur de P
<b>Légumineuses non carencées (≥ 70 % de légumineuses et ≥ 0,25 % S)</b>				
0	9 961	535	0,990	0,691
25	9 865	509		
<b>Légumineuses carencées (≥ 70 % de légumineuses et &lt; 0,25 % S)</b>				
0	9 440	478	<b>1,079</b>	<b>&lt; 0,001</b>
25	10 187	546		

(1) T<sub>s</sub>/T<sub>0</sub> : Rapport de rendement entre les traitements fertilisés et les traitements non fertilisés au soufre.

#### 5.4 Diagnostic nutritionnel et exportations en soufre

Les valeurs d'humidité, de concentrations et d'exportations en soufre des prairies (de graminées et de légumineuses, en fonction du diagnostic nutritionnel) sont présentées au Tableau 42. Ces calculs ont été effectués sur la partie aérienne de la plante, fauchée à une hauteur de 5 à 7 cm du sol. Seuls les résultats pour la 1<sup>re</sup> coupe et le rendement total de la saison, soit la somme des rendements mesurés pour toutes les coupes, sont présentés.

Pour les prairies de graminées, pour la 1<sup>re</sup> coupe, la concentration en S de la population de tête (hauts rendements et composition nutritionnelle équilibrée) a été en moyenne de 2,1 ± 0,4 kg S/t stabilisée à 6 % d'humidité. Considérant un rendement de 4 575 kg/ha, les exportations de la 1<sup>re</sup> coupe étaient en moyenne de 10 kg S/ha. Pour l'ensemble de la

saison, une concentration en soufre de  $2,0 \pm 0,3$  kg S/t (0,20 %) a été calculée pour la population de tête en équilibre nutritionnel et à haut rendement (7 898 kg/ha stabilisé à 7 % d'humidité, Tableau 42). Pour ce groupe, les exportations en S étaient estimées en moyenne à 15 kg S/ha avec des valeurs minimale et maximale de 10 et 26 kg S/ha respectivement. Pour le groupe à faible rendement (5 449 kg/ha) et en équilibre nutritionnel, la concentration en soufre ( $1,7 \pm 0,3$  kg S/t) et les exportations (9 kg S/ha avec des variations de 6 à 14 kg S/ha) étaient les plus faibles. Une telle concentration en S est inférieure aux valeurs critiques (0,18-0,25 %) proposées pour les graminées (Smith et al. cités dans Whitehead, 2000).

Pour les prairies de légumineuses, pour la 1<sup>re</sup> coupe, la concentration en S de la population de tête a été en moyenne de  $2,7 \pm 0,3$  kg S/t stabilisée à 6 % d'humidité. Considérant un rendement de 5 525 kg/ha, les exportations de la 1<sup>re</sup> coupe étaient en moyenne de 11 kg S/ha. Pour l'ensemble de la saison, considérant la population de tête caractérisée à la fois par un haut niveau de rendement (11 015 kg/ha en moyenne pour cette étude) et un équilibre nutritionnel, la concentration en soufre a atteint  $2,1 \pm 0,3$  kg S/t. Pour le groupe équilibré à faible rendement, (9 048 kg/ha) tel qu'attendu, la concentration moyenne en S était similaire à celle de la population de tête (2,1 kg S/t). Les exportations de la population de tête étaient en moyenne de 23 kg S/ha et ont varié entre 16 et 30 kg S/ha tandis que celles du groupe équilibré à faible rendement sont de 15 à 24 kg S/ha, avec une moyenne de 19 kg S/ha. Ces valeurs sont proches de celles obtenues dans la littérature (20 à 25 kg S/ha; Haupt et al., 2015).

**Tableau 42.** Concentrations et exportations en S des prairies de légumineuses selon le diagnostic nutritionnel.

	Humidité <sup>(1)</sup>			Exportations <sup>(2)</sup>			
	(%)	(kg S/t)		(kg S/ha)			
		Moy	Éc-T	Moy	Med	Min	Max
<b>Graminées (≤ 30 % de légumineuses)</b>							
<b>1<sup>re</sup> coupe</b>							
Haut rendement et équilibre nutritionnel (« population de tête »)	6	<b>2,1</b>	0,4	<b>10</b>	9	7	13
Faible rendement et équilibre nutritionnel	6	2,0	0,2	7	7	7	8
Faible rendement et déséquilibre nutritionnel	6	2,0	0,6	5	5	2	9
Haut rendement et déséquilibre nutritionnel	7	1,9	0,4	9	9	7	12
<b>Total de la saison</b>							
Haut rendement et équilibre nutritionnel (« population de tête »)	7	<b>2,0</b>	0,3	<b>15</b>	16	10	26
Faible rendement et équilibre nutritionnel	7	1,7	0,3	9	9	6	14
Faible rendement et déséquilibre nutritionnel	6	2,1	0,6	11	11	5	19
Haut rendement et déséquilibre nutritionnel	6	2,0	0,5	16	15	10	23
<b>Légumineuses (≥ 70 % de légumineuses)</b>							
<b>1<sup>re</sup> coupe</b>							
Haut rendement et équilibre nutritionnel (« population de tête »)	6	<b>2,7</b>	0,3	<b>11</b>	11	9	15
Faible rendement et équilibre nutritionnel	7	2,7	-	12	12	9	14
Faible rendement et déséquilibre nutritionnel	7	2,2	0,5	9	8	6	13
Haut rendement et déséquilibre nutritionnel	6	2,4	0,4	11	11	10	11
<b>Total de la saison</b>							
Haut rendement et équilibre nutritionnel (« population de tête »)	6	<b>2,1</b>	0,3	<b>23</b>	24	16	30
Faible rendement et équilibre nutritionnel	7	2,1	0,4	19	19	15	24
Faible rendement et déséquilibre nutritionnel	8	2,4	0,6	21	23	12	27
Haut rendement et déséquilibre nutritionnel	6	1,8	-	19	19	19	19

(1) Humidité après séchage à 55 °C pendant au moins 48 h, jusqu'à un poids constant.

(2) Moy : moyenne; Éc-T : Écart-type; Med : médiane; Min : valeur minimale; Max : valeur maximale.

## 5.5 Fertilisation soufrée proposée en cas de carence chez les légumineuses

Avec la diminution des pluies acides et la teneur quasi-nulle en soufre des engrais minéraux ainsi que les pesticides couramment utilisés, les sols en Europe et en Amérique du Nord deviennent de moins en moins riches en S. Selon Mathot et al. (2009), la réduction des dépositions atmosphériques soufrées en Europe induit des carences chez les plantes fourragères depuis le début des années 80. D'autres études antérieures réalisées au Québec et en Ontario ont montré qu'en cas de carence en soufre, le rendement et la qualité de la luzerne pourraient être négativement affectés (Haupt et al., 2015; Lajeunesse, 2019). Dans le même ordre d'idées, les résultats de cette étude montrent que la fertilisation en soufre a un effet significatif à la fois sur le rendement et la qualité des prairies de légumineuses. Avec un apport de 25 kg S/ha, les gains de rendement pour ce type de prairies par rapport au témoin varient de 4,2 % (toutes données confondues) à 7,9 % en cas de prairies de légumineuses carencées en S et la teneur en protéine augmente jusqu'à 3,9 % celle du témoin.

**Une dose de 25 kg S/ha est donc recommandée pour les prairies de légumineuses carencées** pour éviter les pertes de rendement et de qualité fourragères. En termes d'exportations des prairies de légumineuses estimées à 23 kg S/ha, cette dose sera suffisante pour les couvrir dans leur totalité. Des doses similaires ont été proposées antérieurement, soient 22 kg S/ha par Haupt et al. (2015) et 28 kg S/ha par Lajeunesse (2019). Ainsi, la dose proposée dans le cadre de cette étude coïncide avec la moyenne des recommandations précédemment citées.



### Prairies de graminées et mixtes

Pour les prairies de graminées et mixtes, aucune recommandation n'a été possible. Des études avec des doses croissantes de N et S sont une avenue prometteuse à explorer dans le futur pour de meilleures recommandations en fertilisation soufrée chez les prairies.



## 6 AUTRES ÉLÉMENTS NUTRITIFS IMPORTANTS (CA, MG, B, MO)

En plus des éléments majeurs NPK+S, d'autres éléments nutritifs tels que le B, le Mg, le Ca et le Mo peuvent avoir un effet marqué sur les cultures fourragères soit en limitant la production, soit en provoquant des carences ou des excès nuisibles pour les animaux (Gupta et al., 2001). Dans les régions du nord-est du Canada, le Mo et le B sont probablement les éléments mineurs les plus importants à prendre en compte dans la production des légumineuses (Gupta, 1993). Au Québec, les carences et les excès sont moins courants pour ces microéléments.

### 6.1 Bore (B)

Le B joue un rôle important dans la croissance et le développement de la plante. Chez la luzerne, il a été démontré dans un sol acide qu'une déficience en B diminue la qualité fourragère en agissant sur la teneur en protéines brutes (Rouquette et al., 2001). Dans une étude plus récente, réalisée sur substrat sableux avec une concentration en B d'environ 0,15 ppm, la fertilisation en B n'a exercé aucune influence significative sur la biomasse totale et la qualité fourragère de la luzerne (Dhassi et al., 2021). Dans les pratiques québécoises, en présence de signe visible de carence en B, un apport ponctuel d'engrais minéral contenant du bore est appliqué par les producteurs. En fonction du pH et de la teneur en B du sol, des doses de B variant de 0,5 à 2 kg B/ha sont recommandées au Québec pour la luzerne (Duval, 1995). Dans le cadre des essais de cette étude, pour éliminer tout risque de carence en cet élément, les prairies de légumineuses ont été fertilisées en B à une dose de 2 kg/ha.

Bien qu'aucune analyse de la teneur en B de la biomasse n'ait été réalisée dans le cadre de la présente étude, l'apparition de symptômes visuels de carence en B n'a pas été signalée lors de la réalisation des essais. Pour les sites d'essais dont l'analyse de sols indique une teneur faible en éléments mineurs (hormis le soufre), une dose de l'élément en carence est recommandée uniquement en début de saison. En ce sens, aucune problématique liée au Mo n'a non plus été observée.

### 6.2 Calcium (Ca) et magnésium (Mg)

Le calcium et le magnésium sont également deux éléments nutritifs à prendre en compte pour s'assurer d'une bonne qualité des prairies. Le calcium est un élément essentiel du lait chez la vache et participe à la formation des os. La concentration sanguine en Ca d'une vache adulte doit être maintenue entre 2,1 et 2,5 mmol/L (Goff, 2006). En début de période de lactation, la vache laitière nécessite des aliments ayant une teneur suffisante de Ca pour maintenir son équilibre en Ca. En cas de sous-alimentation en Ca, l'équilibre du Ca sanguin sera assuré par le calcium contenu dans les os. Cela pourrait potentiellement avoir des effets néfastes sur le squelette de l'animal (Goff, 2006). Alors, le chaulage serait une pratique à utiliser dans le cadre de la production des fourrages destinés à l'alimentation des vaches laitières dans les limites de pH inférieur à 7 considéré comme optimal. Toutefois, il convient de considérer sa relation antagonique avec le magnésium (Sun et al., 2018). Ce dernier est un nutriment essentiel dans le maintien d'un bon état de santé des animaux. Une carence en magnésium peut se manifester par des signes cliniques tels que la tétanie d'herbage ou la parésie (Schonewille, 2013). Entre Ca et Mg, une trop grande disponibilité de l'un limite l'absorption de l'autre. Une concentration en Mg inférieure à 0,2 % de la matière sèche se traduit par un déséquilibre entre K, Ca et Mg chez les graminées (Aydin et Uzun, 2008). Dans la solution du sol, les  $K^+$ ,  $Ca^{++}$  et  $Mg^{++}$  se déplacent suivant des phénomènes de transfert préférentiels. Pour le  $K^+$ , le déplacement se fait principalement par diffusion tandis qu'il se fait par flux massique pour les divalents,  $Ca^{++}$  et  $Mg^{++}$  (Whitehead, 2000). Cependant, les concentrations absolues et relatives des ions en solutions influencent les quantités relatives absorbées de chacun d'eux. Ainsi, une concentration trop élevée de K dans la solution du sol impliquerait une limitation dans l'absorption des ions  $Ca^{++}$  et  $Mg^{++}$  (Whitehead, 2000). Il convient de planifier l'apport de ces éléments en lien avec la fertilisation potassique et maintenir un ratio  $K/(Ca + Mg)$  dans un fourrage inférieur à 2,2 nécessaire pour réduire les risques de tétanie (Jefferson et al., 2001; Aydin et Uzun, 2008, Gao et al., 2016).

### 6.3 Exportations

Dans le cadre des essais du PSEF, les teneurs en Mg et en Ca des biomasses ont été évaluées et leurs exportations ont été calculées selon le diagnostic nutritionnel des tissus de la plante. Dans le Tableau 43, les concentrations et les exportations sont présentées pour chacun des éléments en fonction des types de prairies, à l'exception des prairies mixtes pour lesquelles les données étaient en quantité insuffisante pour conduire les analyses.

Pour le calcium, les résultats montrent qu'avec des taux d'humidité similaires (6-7 %), les prairies de graminées accusent des concentrations et des exportations environ deux fois moins élevées pour les groupes équilibrés comparativement aux légumineuses (Tableau 43). Pour la population de tête chez les graminées, la concentration et l'exportation moyennes étaient, respectivement, de  $8,0 \pm 1,5$  kg Ca/t et de 66 kg Ca/ha. Ces valeurs passent respectivement à  $12,8 \pm 1,0$  kg Ca/t et 141 kg Ca/ha pour les populations de têtes des légumineuses. Pour le groupe équilibré à faible rendement, les légumineuses ont présenté des valeurs également plus élevées que les graminées. Cependant, pour les deux types de prairies, les concentrations étaient sensiblement plus élevées ( $< 1$  kg Ca/ha) pour le groupe à faible rendement. Dans le cadre de cette étude, les résultats sont globalement supérieurs aux concentrations obtenues par Aydin et Uzun (2008) (1,84 - 2,24 g/kg et 4,43 - 5,42 g/kg) respectivement, pour les graminées et les légumineuses). Toutefois, de plus grandes valeurs ont été également observées pour les légumineuses avec un facteur d'environ 2 par rapport aux graminées.

Pour le Magnésium, les concentrations et les exportations pour les groupes équilibrés étaient similaires pour les types de prairies analysées (Tableau 43). Pour la population de tête chez les graminées, la concentration et l'exportation étaient respectivement de  $2,5 \pm 0,7$  kg Mg/t et de 21 kg Mg/ha en moyenne. Pour la population de tête constituée par les légumineuses, la concentration et l'exportation variaient légèrement par rapport aux graminées. De faibles augmentations de l'exportation (22 kg Mg/ha) et diminution de la concentration ( $2,0 \pm 0,2$  kg Mg/t) ont été observées entre les deux types prairies. Comparativement au Ca, les concentrations en Mg étaient faibles. Elles sont cependant plus proches de celles obtenues par Aydin et Uzun (2008) (1,46–1,72 g/kg et 2,21–2.63 g/kg respectivement pour les graminées et les légumineuses). Le ratio Ca:Mg était de 3,2 et de 6,4 pour les graminées et les légumineuses respectivement. Ces valeurs sont similaires à celles obtenues par Sun et al. (2018) où une valeur Ca:Mg avoisinant 6 pour le traitement témoin (0 Mg) a permis de maximiser la teneur en protéines brutes dans la biomasse. Pour ce qui est du ratio  $K/(Ca + Mg)$ , avec la population de tête, un risque de tétanie a été observé chez les graminées (2,97) tandis que pour les légumineuses, une valeur de 2,04 en dessous du seuil critique a été observée. Tout compte fait, la gestion des éléments mineurs doit occuper une place importante dans la régie de fertilisation chez les prairies pour assurer des niveaux de rendement élevés et une bonne qualité fourragère. Le chaulage et l'apport d'éléments mineurs en cas de carence sont fortement recommandés.

**Tableau 43.** Concentrations et exportations en Ca et Mg des prairies de graminées et de légumineuses selon le diagnostic nutritionnel.

Calcium	Humidité		Exportations <sup>(1)</sup>				
	(%)	(kg Ca/t)		(kg Ca/ha)			
		Moy	Éc-T	Moy	Med	Min	Max
<b>Graminées (≤ 30 % de légumineuses)</b>							
Haut rendement et équilibre nutritionnel (« population de tête »)	7	<b>8,0</b>	1,5	<b>66</b>	64	43	113
Faible rendement et équilibre nutritionnel	7	8,4	2,1	54	54	34	98
Faible rendement et déséquilibre nutritionnel	6	5,5	1,1	30	28	14	78
Haut rendement et déséquilibre nutritionnel	6	5,2	1,4	46	43	24	69
<b>Légumineuses (≥ 70 % de légumineuses)</b>							
Haut rendement et équilibre nutritionnel (« population de tête »)	6	<b>12,8</b>	1,0	<b>141</b>	141	125	161
Faible rendement et équilibre nutritionnel	7	13,4	-	124	124	124	124
Faible rendement et déséquilibre nutritionnel	8	18,5	1,5	160	155	136	197
Haut rendement et déséquilibre nutritionnel	6	15,3	0,4	165	164	157	177
Magnésium	Humidité		Exportations <sup>(1)</sup>				
	(%)	(kg Mg/t)		(kg Mg/ha)			
		Moy	Éc-T	Moy	Med	Min	Max
<b>Graminées (≤ 30 % de légumineuses)</b>							
Haut rendement et équilibre nutritionnel (« population de tête »)	7	<b>2,5</b>	0,7	<b>21</b>	18	14	35
Faible rendement et équilibre nutritionnel	7	2,6	0,7	17	16	9	26
Faible rendement et déséquilibre nutritionnel	6	2,0	0,6	11	10	4	26
Haut rendement et déséquilibre nutritionnel	6	2,0	0,8	18	17	7	31
<b>Légumineuses (≥ 70 % de légumineuses)</b>							
Haut rendement et équilibre nutritionnel (« population de tête »)	6	<b>2,0</b>	0,2	<b>22</b>	22	18	26
Faible rendement et équilibre nutritionnel	7	2,1	-	19	19	19	19
Faible rendement et déséquilibre nutritionnel	8	2,6	0,2	23	22	18	26
Haut rendement et déséquilibre nutritionnel	6	2,5	0,1	26	27	25	28

(1) Moy : moyenne; Éc-T : Écart-type; Med : médiane; Min : valeur minimale; Max : valeur maximale.

## 7 IMPACT DE LA FERTILISATION DES PRAIRIES SUR LA VALEUR NUTRITIVE DES FOURRAGES

Par Jean-Philippe Laroche, agr., M. Sc.

Expert en production laitière – Nutrition et fourrages

Lactanet

### 7.1 Introduction

Les plantes fourragères représentent généralement le principal aliment consommé par les herbivores. La valeur nutritive des fourrages est une information essentielle pour les agronomes qui réalisent des programmes alimentaires, puisqu'elle influence le choix et la proportion des autres aliments ajoutés à la ration. Des fourrages de meilleure qualité peuvent être inclus en plus grande proportion dans la ration, ce qui est avantageux puisque le coût des fourrages est généralement inférieur à celui des concentrés. De plus, chaque kilogramme de matière sèche d'un fourrage de meilleure qualité contient plus de nutriments. Par conséquent, la valeur nutritive des fourrages influence le coût d'alimentation, ainsi que la performance des animaux.

La qualité des fourrages peut varier en fonction d'une multitude de facteurs comme la maturité, l'espèce fourragère, la méthode de conservation, et bien entendu la fertilisation. La présente partie du rapport détaille comment la valeur nutritive des fourrages a pu être influencée par la fertilisation en azote (N), phosphore (P), potassium (K) et en soufre (S). L'impact de ces résultats a ensuite été analysé pour vérifier si des ajustements aux nouvelles valeurs scientifiques de référence en fertilisation (VSRF) devraient être faits.

La liste des paramètres associés à la valeur nutritive des fourrages qui a été considérée dans le rapport est présentée au Tableau 44. La grande majorité de ces paramètres ont été analysés exclusivement à partir des essais du PSEF, exception faite pour les teneurs en N, P et K de la biomasse de récolte pour lesquelles des données supplémentaires ont été ajoutées. L'impact de la dose des divers éléments fertilisants a été analysé par ANOVA sur la moyenne saisonnière de ces paramètres, pondérée par coupe. Lorsque l'ANOVA indiquait un effet significatif ( $P < 0,05$ ), des tests de Student (test  $t$ ) ont été réalisés afin de faire les comparaisons multiples des moyennes des traitements. Enfin, les paramètres n'ayant pas été affectés de manière significative par la fertilisation n'ont pas été considérés dans l'interprétation des résultats.

Ces paramètres ont été choisis parce qu'ils sont considérés comme des informations importantes pour l'élaboration de programmes alimentaires pour herbivores. L'ammoniaque, les sucres solubles à l'eau, et les acides gras individuels auraient pu être également considérés, mais ces informations n'étaient pas disponibles dans les résultats des différents essais.

**Tableau 44.** Liste des paramètres évalués lors de l'analyse de l'impact de la fertilisation sur la valeur nutritive des fourrages

Paramètre	Unité
Protéine brute (PB)	% MS
Protéine soluble	% PB
PB-ADF	% PB
PB-NDF	% PB
ADF	% MS
aNDFom	% MS
Lignine	% MS
NDFDom30	% aNDFom
NDFDom240	% aNDFom
Glucides non fibreux (GNF)	% MS
Amidon	% MS
Gras brut	% MS
Acides gras totaux	% MS
Unités nutritives totales (UNT)	% MS
Calcium (Ca)	% MS
Phosphore (P)	% MS
Magnésium (Mg)	% MS
Potassium (K)	% MS
Soufre (S)	% MS
Sodium (Na)	% MS
Chlore (Cl)	% MS
Cuivre (Cu)	% MS
Fer (Fe)	% MS
Manganèse (Mn)	% MS
Zinc (Zn)	% MS
Différence alimentaire cations anions (DACA)	mÉq/kg MS
Cendres	% MS
Indice de nutrition azotée (INA), azote uniquement	% [N] critique

L'inclusion de la valeur nutritive des fourrages dans l'élaboration des nouvelles VSRF est une première au Québec. Les informations compilées dans cette partie du rapport pourront contribuer à une meilleure compréhension de l'impact de la fertilisation sur les plantes fourragères pérennes. Elles ont également contribué à l'élaboration des nouvelles VSRF.

## 7.2 Azote (N)

L'impact de la fertilisation azotée sur la qualité fourragère des prairies de légumineuses (70% et plus de légumineuses), mixtes (31 - 69 % légumineuses), et de graminées (30% et moins de légumineuses) est présenté dans les sections suivantes.

### 7.2.1 Effet sur la teneur en protéine brute

#### Contexte

L'azote est un élément essentiel pour la fabrication des protéines présentes dans les plantes fourragères. On estime la teneur en protéine brute des fourrages en analysant le pourcentage d'azote, que l'on multiplie ensuite par une constante de 6,25.

La protéine brute est un nutriment important pour l'alimentation des herbivores, puisqu'elle est essentielle pour fournir l'azote aux microorganismes du rumen, et pour ultimement fournir des acides aminés digestibles à l'animal. Étant donné le coût élevé des protéines dans les aliments, une teneur élevée en protéine brute dans les fourrages est souhaitable. La protéine brute est composée de plusieurs fractions, certaines étant plus dégradables que d'autres dans le rumen.

Puisque les légumineuses ont la capacité de fixer l'azote atmosphérique, nous n'anticipons pas d'augmentation de la teneur en protéine brute à la suite d'une fertilisation azotée des mélanges fourragers à base de légumineuses. Dans les mélanges mixtes, on ne s'attend pas non plus à un effet, puisque les légumineuses sont en mesure de fournir de l'azote aux graminées grâce aux exsudats racinaires et à la décomposition de résidus végétaux. Pour ce qui est des graminées, des essais québécois ont démontré que la fertilisation azotée pouvait augmenter la teneur en protéine brute de ces plantes (Parent et al., 2018).

### Observations et discussions

Les résultats de l'ANOVA par type de prairies démontrent que la fertilisation en azote a un impact significatif sur la teneur en protéine brute des mélanges à base de graminées, mais pas des mélanges mixtes ou à base de légumineuses. Afin de raffiner l'interprétation des résultats, l'effet a été analysé par catégories de mélange correspondant aux nouvelles VSRF. Seuls les mélanges mixtes n'ont pas pu être analysés en sous-catégories (31-50 % lég. vs 51-69 % lég.) étant donné un manque de données. Par ailleurs, une étude québécoise a démontré que la zone agroclimatique n'a pas eu d'effet significatif sur la teneur en protéine brute des légumineuses ou des graminées pour une fertilisation en azote équivalente (Lauzon et al., 2019). Par conséquent, dans la présente analyse, les données n'ont pas été séparées par zones de degrés-jours afin d'augmenter la puissance statistique. Les résultats sont présentés à la Figure 14.

Dans les mélanges pratiquement purs de graminées (0-10 % légumineuses), l'augmentation de la dose d'azote a permis d'augmenter la teneur en protéine brute des fourrages de manière significative. Le niveau maximal de protéine brute a été atteint avec une dose de 200-225 kg N/ha (+25,4 % comparativement au témoin). Dès que la proportion de légumineuses augmente dans le mélange (11-30 %), l'effet de la fertilisation azotée sur le niveau de protéine brute est plus faible. Dans ce type de mélange, le niveau maximal de protéine brute a été atteint avec une dose de 150-180 kg N/ha (+10,4 % comparativement au témoin). Pour les mélanges ayant une proportion plus élevée de légumineuses (31 % et plus), la fertilisation azotée n'a pas eu d'effet significatif sur la teneur en protéine brute. Étant donné le peu de sites dans chacun des groupes, la dose précise d'azote permettant de maximiser la teneur en protéine brute n'a pas pu être déterminée par des analyses de régression.

En suivant les nouvelles VSRF, la teneur en protéine brute est maximisée pour les mélanges de graminées dans les régions ayant plus de 2450 degrés-jours base 0. Pour les régions plus fraîches, les doses proposées ne permettent pas de maximiser la teneur en protéine brute. Il pourrait être pertinent d'évaluer si le gain en protéine brute (sans gain de rendement) peut justifier d'augmenter la dose d'azote des mélanges de graminées dans les régions plus fraîches. Davantage de données dans ces régions, incluant la teneur en nitrate, seraient nécessaires pour prendre une décision éclairée.

En ce qui concerne les fractions protéiques, il n'y a pas eu d'impact significatif de la fertilisation azotée chez les mélanges à base de légumineuses. Pour ce qui est des mélanges à base de graminées, un niveau plus faible de PB-ADF était obtenu avec une dose d'azote de 200-225 kg/ha (-11,0 % comparativement au témoin). Une fertilisation de plus de 150 kg/ha a également permis d'augmenter la PB-NDF de 4,8 à 5,9 % comparativement au témoin. Ces effets sont bénéfiques, car la PB-ADF est indisponible pour l'animal, tandis que la différence entre la PB-NDF et la PB-ADF est constituée de protéines peu dégradables, un type de protéines recherchées en alimentation des herbivores.

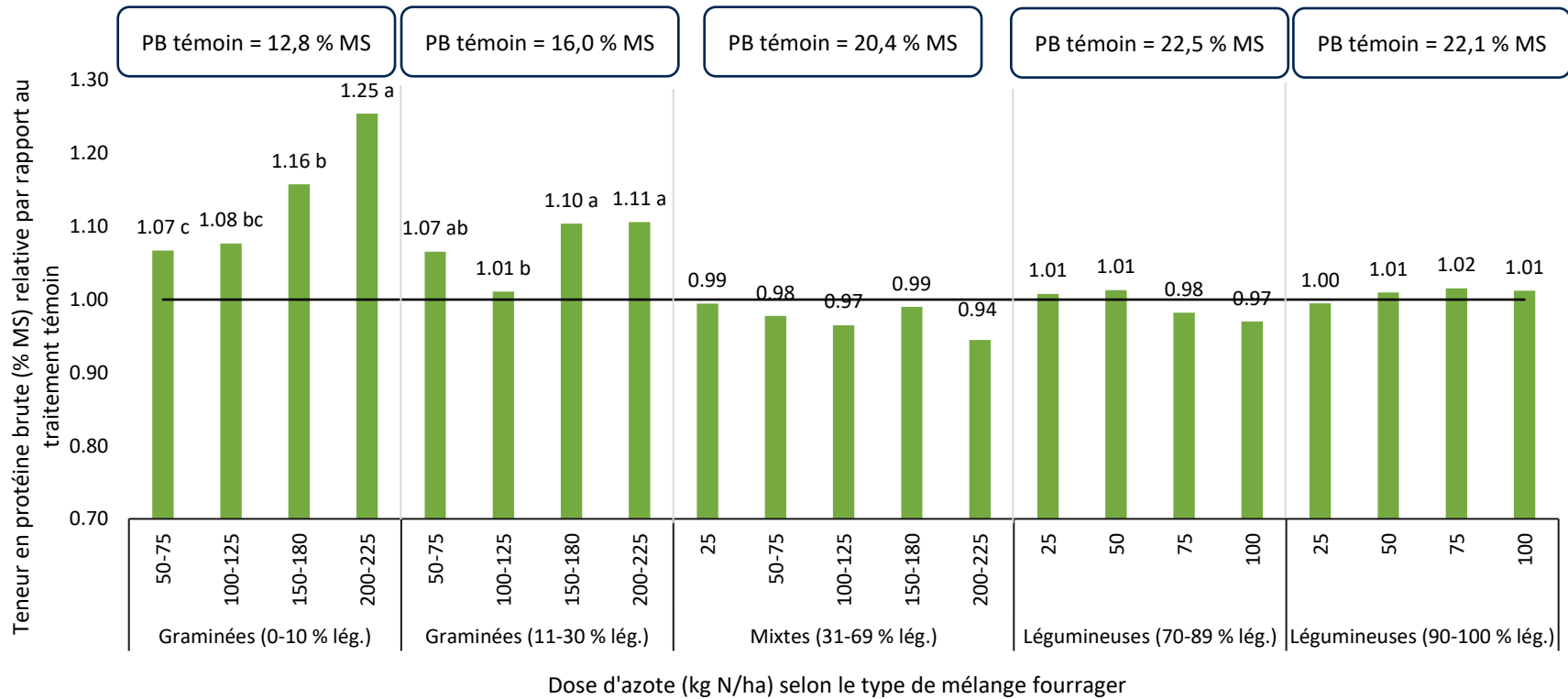


Figure 14. Effet relatif au traitement témoin de la dose d'azote (kg N/ha) sur la teneur en protéine brute (% MS) de différents mélanges fourragers.

## 7.2.2 Effet sur le risque d'accumulation de nitrates

### Contexte

La présence excessive de nitrate dans l'alimentation des herbivores peut être toxique pour ces animaux. La fertilisation azotée peut augmenter la teneur en nitrate des fourrages, surtout lorsque les plantes vivent un stress et ne sont pas en mesure de convertir les nitrates extraits du sol en protéines. Ce phénomène est plus fréquent dans les graminées, et certaines espèces sont plus à risque que d'autres.

### Observations et discussions

L'analyse du niveau de nitrates des fourrages n'est pas effectuée de façon routinière, et nous n'avons pas accès à ces données dans les essais réalisés. Toutefois, il est possible d'évaluer le risque d'accumulation excessive de nitrates en calculant l'indice de nutrition azotée (INA). Cet indice évalue la teneur en azote des plantes par rapport à la teneur critique en azote nécessaire pour une croissance maximale. Un INA supérieur à 100 % indique une situation d'apport excessif en azote, facteur de risque pour l'accumulation de nitrates dans la plante. L'équation est présentée ci-dessous :

$$\text{INA} = (([\text{N}] \text{ mesuré} / (4,8 \times \text{biomasse aérienne}^{-0,32})) \times 100) - 0,7 \times \% \text{ légumineuses}$$

Les doses d'azote recommandées n'ont pas résulté en des INA supérieurs à 100 chez les mélanges à base de graminées (Tableau 42). Au Québec, on a observé que le niveau de nitrate dans les plantes augmente surtout lorsque l'INA dépasse 90 % (Tremblay et al., 2005). En moyenne, les INA observés avec les VSRF ne dépassent pas 90 %, mais certaines parcelles ont obtenu une valeur située entre 90 et 100 %.

**Tableau 45.** Indice de nutrition azotée (INA; %) pour la saison des mélanges à base de graminées lorsque les VSRF sont suivies.

Proportion de légumineuses	Zone	Dose d'azote (kg N/ha)	INA pour la saison (%)		
			Moyen	Minimum	Maximum
0-10 % légumineuses	Périphérique	150-180	59,95	59,95	59,95
	Intermédiaire	200-225	74,47	62,29	92,15
	Centrale-sud	200-225	76,64	63,68	91,89
11-30 % légumineuses	Périphérique*	100-125	62,99	56,06	76,08
		150-180	69,11	66,80	71,25
	Intermédiaire*	150-180	61,60	59,08	64,12
		200-225	61,96	60,50	63,41
Centrale-sud	200-225	ND	ND	ND	

ND = données non disponibles.

\*Pour les groupes 11-30 % de légumineuses des zones périphérique et intermédiaire, les VSRF calculées ne correspondent pas à une dose testée au protocole. Par conséquent, les valeurs d'INA devraient se trouver entre celles des deux groupes de doses présentés.

Une étude québécoise a évalué l'effet de la dose d'azote sur la teneur en nitrates de la Fléole des prés (Tremblay et al., 2005). Lorsque récolté au stade recommandé, une dose unique au printemps de 180 kg N/ha avait entraîné un niveau de nitrates considéré comme potentiellement problématique pour les animaux ( $\geq 0,17$  % N-NO<sub>3</sub>; CRAAQ, 2005). Ce niveau a été observé dans le fourrage récolté à Normandin en 1999, mais pas pour celui récolté à Lévis en 1999 ou en 2000. Il est important de noter que : 1) le 180 kg N/ha a été appliqué en une seule dose au printemps, et une seule coupe au stade recommandé a été récoltée par site; 2) la hauteur de coupe était de 5 cm alors que la recommandation actuelle est de 10 cm (les nitrates s'accumulent surtout à la base des plantes); 3) l'indice de nutrition azoté était légèrement supérieur à



100 % dans l'échantillon ayant un niveau potentiellement problématique de nitrates; 4) la graminée à Normandin était en léger déficit hydrique, une condition pouvant favoriser l'accumulation de nitrates.

Dans le guide de production fourragère de l'Ontario, on recommande de ne pas dépasser 170 kg N/ha pour une application d'azote afin d'éviter les risques de toxicité par les nitrates (MAAARO, 2022). En suivant les VSRF, l'application la plus élevée d'azote correspondrait à 140 kg N/ha au printemps (100 % de la dose totale), pour une prairie ayant 31-50 % de graminées en zone intermédiaire.

En considérant l'ensemble de ces données, les doses d'azote recommandées sont jugées probablement sécuritaires en ce qui a trait au niveau de nitrates des plantes. Il faut toutefois se rappeler que d'autres facteurs peuvent avoir une influence sur la teneur en nitrate du fourrage (espèces, stade de développement, partie de la plante, conditions de croissance, méthode de conservation).

### 7.2.3 Effet sur la teneur en fibres aNDFom et sa digestibilité ruminale

#### Contexte

L'aNDFom est un indicateur de la teneur en fibres des fourrages. Les fibres aNDFom sont entre autres associées à l'encombrement du rumen et la rumination. Ce nutriment est également une source d'énergie pour les microorganismes du rumen et pour l'animal. La contribution énergétique de l'aNDFom dépend de sa digestibilité dans le rumen. On peut mesurer la digestibilité ruminale des fibres après un temps donné (typiquement 30, 120 et 240 heures). Des valeurs élevées indiquent une valeur énergétique élevée pour les microorganismes du rumen et pour l'animal. La lignine et l'ADF sont des indicateurs des parties moins digestibles des fibres : des valeurs faibles sont souhaitables. Malgré l'importance des fibres pour les herbivores, une teneur en fibre aNDFom faible est souhaitable, car elle est associée à une maturité plus faible, et donc une valeur nutritive plus élevée.

Dans la littérature, certaines études ont démontré qu'une carence en azote dans les graminées pouvait diminuer la teneur en fibres des fourrages (Bélanger et McQueen, 1998). Cet effet serait principalement attribuable à un ratio feuilles/tiges plus élevé lorsque les plantes sont en carence azotée.

#### Observations et discussions

Les mélanges à base de graminées recevant une dose d'azote supérieure à 100 kg/ha avaient une teneur en fibre aNDFom maximale (+5,3 à +6,8 % comparativement au témoin). Bien qu'une teneur en fibres plus faible puisse être un avantage au niveau de l'alimentation, l'amplitude de variation de la qualité est relativement faible, et ne justifie pas de diminuer significativement le rendement des graminées en ne répondant pas à leurs besoins en azote.

La dose d'azote n'a pas eu d'effet significatif sur la teneur en fibres aNDFom des mélanges fourragers majoritairement composés de légumineuses ou mixtes.

La digestibilité ruminale des fibres aNDFom (30 et 240 heures), la teneur en ADF ainsi qu'en lignine n'ont pas été affectées par la dose d'azote, peu importe le type de mélange (légumineuses, mixtes, graminées).

### 7.2.4 Effet sur la teneur en glucides non fibreux (GNF)

#### Contexte

Les glucides non fibreux (GNF) représentent une source d'énergie pour les microorganismes du rumen et l'animal. Ils sont également importants pour favoriser la bonne fermentation des ensilages. Ceux-ci incluent entre autres les sucres solubles à l'eau, l'amidon, ainsi que les fibres solubles.

Dans la littérature, il est connu qu'une augmentation de la dose d'azote peut entraîner une diminution des GNF chez les graminées (Tremblay et al., 2005). Cet effet serait expliqué par une croissance accrue, ce qui résulte en une diminution des GNF accumulés dans la plante.

### Observations et discussions

Les mélanges à base de graminées recevant une dose d'azote supérieure à 150 kg/ha avaient les niveaux les plus faibles de GNF (-13,3 à -13,8 % comparativement au témoin). Les graminées recevant plus de 100 kg/ha d'azote contenaient également moins d'amidon (-9,7 à -11,9 % comparativement au témoin). Les mélanges mixtes recevant une dose d'azote supérieure à 100 kg/ha pouvaient contenir moins de GNF (-9,7 à -19,7 % comparativement au témoin), tandis que pour l'amidon, une dose de 200-225 kg/ha était nécessaire pour avoir un impact négatif (-22,0 % comparativement au témoin).

Bien qu'une teneur en GNF plus élevée soit souhaitable, l'amplitude de variation de la qualité est relativement faible, et ne justifie pas de diminuer significativement le rendement des graminées en ne répondant pas à leurs besoins en azote.

La dose d'azote n'a pas eu d'effet significatif sur la teneur en GNF des mélanges fourragers majoritairement composés de légumineuses.

## 7.2.5 Effet sur la valeur énergétique

### Contexte

La valeur énergétique d'un fourrage peut être estimée grâce au pourcentage d'unités nutritives totales (UNT), qui représentent la somme de la contribution énergétique de toutes les fractions organiques digestibles du fourrage (fibres, GNF, gras brut, protéines).

### Observations et discussions

La dose d'azote n'a pas eu d'effet significatif sur la teneur en unités nutritives totales du mélange fourrager, peu importe le type de mélange (légumineuses, mixtes, graminées). Cela confirme que les effets observés sur les nutriments ayant une valeur énergétique sont relativement faibles, et ne devraient pas influencer les VSRF.

### Autres effets observés

La fertilisation azotée a également eu des effets sur quelques minéraux (DACA dans les mélanges à base de légumineuse; Zn dans les mélanges mixtes; Ca, P, Mg et Na dans les mélanges à base de graminées). L'augmentation de la teneur en Mg pourrait être expliquée par la présence de cet élément dans le fertilisant (nitrate d'ammonium calcique, 27-0-0) plutôt que par la fertilisation en azote.

Pour le Ca, P et le Mg chez les graminées, l'ampleur de ces effets est jugée négligeable du point de vue de la valeur nutritive des fourrages (Ca : 0,63 à 0,78 % MS; P : 0,32 à 0,33 % MS; Mg : 0,21 à 0,25 % MS), et les valeurs se situent dans ce qui est généralement observé au Québec (Berthiaume, 2017). De plus les apports de la ration en ces éléments sont ajustés en fonction de l'analyse de la valeur nutritive des fourrages, ce qui assure que les animaux auront une ration contenant tous les minéraux dont ils ont besoin.

Le Na et le Zn ne sont pas analysés de façon routinière dans les fourrages. Toutefois, l'amplitude de la variation de ces éléments est jugée négligeable (Na graminées : 0,06 à 0,08 % MS; Zn mixtes : 29 à 30 ppm), et les valeurs correspondent à ce qui est régulièrement observé dans les fourrages au Québec (Berthiaume, 2017).

Concernant l'effet sur DACA chez les légumineuses, cela n'aura pas ou peu d'impact au niveau de l'alimentation puisque ce type de mélange n'est généralement pas servi aux vaches en transition, et que la DACA est surtout importante pour cette catégorie d'animaux.

### 7.3 Phosphore (P)

L'impact de la fertilisation phosphatée sur la qualité fourragère des prairies de légumineuses (70 % et plus de légumineuses) et de graminées (30 % et moins de légumineuses) est présenté dans les sections suivantes, les données pour les mélanges mixtes n'étant pas suffisantes pour émettre un avis à ce sujet.

#### 7.3.1 Effet sur la teneur en P

##### Contexte

Le phosphore est un minéral important pour les herbivores, puisqu'il est impliqué dans plusieurs fonctions biologiques essentielles comme la formation des os et des dents, ainsi que le métabolisme énergétique.

Il est connu que le niveau de phosphore des sols ainsi que la fertilisation en phosphore ont un impact sur le niveau de ce minéral dans les fourrages. Le phosphore est analysé de façon routinière dans les fourrages afin de s'assurer que la ration des animaux réponde à leurs besoins, sans toutefois générer des surplus nuisibles pour l'environnement.

##### Observations et discussions

Tel qu'attendu, la fertilisation en phosphore a augmenté le niveau de phosphore dans les mélanges à base de légumineuses (+3,0 à +7,5 % comparativement au témoin) et les mélanges à base de graminées (+5,4 à +14,6 % comparativement au témoin). L'augmentation du niveau de phosphore avec la fertilisation en phosphore n'est pas problématique, puisque cet élément est analysé de façon routinière dans les fourrages, et que le niveau total de phosphore de la ration est ajusté en conséquence. En suivant les nouvelles VSRF, les pourcentages de phosphore des fourrages (0,31 à 0,41 % MS) correspondent à ce qui est généralement observé au Québec (Berthiaume, 2017).

Il est important toutefois de noter qu'en moyenne pour les traitements témoins sans fertilisation en P, le niveau de phosphore des fourrages était déjà au-delà du seuil de déficience en cet élément selon les valeurs cibles proposées par Bruulsema (2000). Des plants carencés en P pourraient avoir une valeur nutritive légèrement améliorée, cependant il est économiquement préférable de fertiliser afin d'optimiser les rendements (Lissbrant et al., 2009).

#### 7.3.2 Autres paramètres mesurés

Le niveau de fertilisation en phosphore n'a pas eu d'impact significatif sur les autres paramètres de valeur nutritive mesurée pour ce qui est des mélanges à base de légumineuses ou à base de graminées.

### 7.4 Potassium (K)

L'impact de la fertilisation en potassium sur la qualité fourragère des prairies de légumineuses (70 % et plus de légumineuses) et de graminées (30 % et moins de légumineuses) est présenté dans les sections suivantes, les données pour les mélanges mixtes n'étant pas suffisantes pour émettre un avis à ce sujet.

#### 7.4.1 Effet sur la teneur en K et la différence alimentaire cations anions (DACA)

##### Contexte

Le potassium est un minéral requis par les herbivores puisqu'il est impliqué dans plusieurs fonctions biologiques essentielles comme le maintien de la pression osmotique et la transmission des signaux nerveux. Cependant, pour les vaches en période de transition, une ration trop riche en potassium est néfaste. La période de transition des vaches laitières est généralement définie comme les trois dernières semaines de gestation et les trois premières semaines de lactation. C'est toutefois lors des trois dernières semaines de gestation que le niveau de potassium peut être problématique. Pour ces animaux, on souhaite offrir une ration ayant une faible différence alimentaire cations anions

(DACA). La DACA représente la différence entre la somme des principaux cations ( $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$ ), et la somme des principaux anions ( $\text{Cl}^-$  et  $\text{S}^{2-}$ ). Le potassium est le minéral ayant l'impact le plus important sur la valeur de la DACA. Plus le potassium est élevé, plus la DACA augmente. Les rations ayant une faible DACA aident les vaches en période de transition à se préparer au vêlage en facilitant la mobilisation du calcium provenant des os, ce qui diminue le risque d'hypocalcémie. La DACA est surtout utilisé en alimentation des bovins laitiers.

Il est bien établi que le niveau de potassium des sols ainsi que la fertilisation en potassium ont un impact sur le niveau de ce minéral dans les fourrages. Le potassium est analysé de façon routinière dans les fourrages afin de s'assurer que la ration des animaux réponde à leurs besoins.

#### Observations et discussions

Tel qu'attendu, la fertilisation en potassium a augmenté le niveau de potassium dans les mélanges à base de légumineuses (+8,5 à +45,8 % comparativement au témoin) et les mélanges à base de graminées (+5,0 à +37,3 % comparativement au témoin). L'effet sur la DACA ne peut être considéré, car le fertilisant utilisé dans les essais contient du chlore (muriate de potassium, 0-0-60 : KCl) et qu'habituellement, la fertilisation en potassium dans les prairies est effectuée avec des engrais organiques qui contiennent peu de chlore.

Il est suggéré de viser une valeur maximale de DACA de 250 mEq/kg de matière sèche (MS) dans les fourrages pour faciliter l'élaboration d'une ration à faible DACA destinée aux vaches en transition. Pour arriver à cet objectif, les recommandations actuelles sont principalement : 1) d'utiliser des mélanges à base de graminées incluant des espèces qui contiennent peu de potassium (comme la fléole des prés); 2) de choisir des champs ayant entre 50 et 150 kg K/ha; 3) de limiter la fertilisation en potassium (Tremblay et al., 2008).

Des analyses supplémentaires ont été réalisées afin de proposer un ajustement des VSRF pour la fertilisation en potassium des mélanges de graminées destinés aux vaches en transition (voir la section 4.2.4).

Pour les autres catégories d'animaux, l'augmentation du niveau de potassium avec la fertilisation en cet élément n'est pas problématique. En suivant les nouvelles VSRF, les pourcentages de potassium des fourrages (2,16 à 3,67 % MS) correspondent généralement à ce qui est observé au Québec (Berthiaume, 2017). Les valeurs plus élevées sont associées aux légumineuses cultivées sur des sols riches en potassium. Il est toutefois connu que les bovins peuvent tolérer de hauts niveaux de potassium dans les fourrages et dans la ration (NASEM, 2021). De plus, cet élément est analysé de façon routinière dans les fourrages, et le niveau total de potassium de la ration peut être ajusté en conséquence.

### 7.4.2 Effet sur la qualité des fibres aNDFom

#### Contexte

L'aNDFom est un indicateur de la teneur en fibres des fourrages. Les fibres aNDFom sont entre autres associées à l'encombrement du rumen et la rumination. Ce nutriment est également une source d'énergie pour les microorganismes du rumen et pour l'animal. La contribution énergétique de l'aNDFom dépend de sa digestibilité dans le rumen. On peut mesurer la digestibilité ruminale des fibres après un temps donné (typiquement 30, 120 et 240 heures). Des valeurs élevées indiquent une valeur énergétique élevée pour les microorganismes du rumen et pour l'animal. La lignine et l'ADF sont des indicateurs des parties moins digestibles des fibres : des valeurs faibles sont souhaitables.

#### Observations et discussions

Dans les mélanges à base de graminées, l'augmentation des doses de potassium pouvait être associée avec une NDFDom 240h plus élevée. Les valeurs les plus élevées ont été atteintes avec une fertilisation de plus de 150 kg  $\text{K}_2\text{O}$ /ha (+4,8 à +5,1 % comparativement au témoin). La teneur en lignine a aussi diminué en fonction des doses de potassium; les teneurs plus faibles ont également été atteintes avec une fertilisation de plus de 150 kg  $\text{K}_2\text{O}$ /ha (-5,4 à -7,9 % comparativement au

témoin). Ces améliorations de la qualité sont toutefois relativement modestes. Aucun effet n'a été observé au niveau de la NDFDom 30h et la teneur en ADF. Ces résultats sont difficiles à expliquer, puisque dans la littérature, les doses de potassium n'ont pas eu d'effets sur plusieurs caractéristiques associées aux fibres, comme la proportion de feuilles, de tiges, ou d'épis, la NDF, l'ADF, et la digestibilité totale *in vitro* (Calder et MacLeod, 1968; Malhi et al., 2005). Il pourrait être pertinent d'investiguer ces résultats avec plus de recherches, afin de déterminer dans quelles conditions et pourquoi le potassium peut avoir un effet positif sur la qualité des fibres des graminées fourragères.

Dans les mélanges à base de légumineuses, la qualité des fibres n'a pas été affectée de façon significative par la fertilisation en potassium.

#### 7.4.3 Effet sur la teneur en glucides non fibreux (GNF)

##### Contexte

Les glucides non fibreux (GNF) représentent une source d'énergie pour les microorganismes du rumen et l'animal. Ils sont également importants pour favoriser la bonne fermentation des ensilages. Ceux-ci incluent entre autres les sucres solubles à l'eau, l'amidon, ainsi que les fibres solubles. Dans la littérature, il a été rapporté que l'augmentation des apports en potassium pouvait diminuer la teneur en GNF chez les graminées (Wang et al., 2014).

##### Observations et discussions

La teneur en GNF des mélanges à base de graminées a été affectée par la fertilisation en potassium. Les niveaux de GNF les plus faibles ont été atteints à une dose de plus de 150 kg/ha (-10,1 à -11,2 % comparativement au témoin), tandis que la teneur en amidon est restée inchangée. Pour les mélanges à base de légumineuses, les GNF et l'amidon n'ont pas été affectés de façon significative.

L'amplitude de variation de la qualité est faible, et ne justifie pas de diminuer significativement le rendement des graminées en ne répondant pas à leurs besoins en potassium.

#### 7.4.4 Effet sur la teneur en gras brut (extrait à l'éther)

##### Contexte

L'extrait à l'éther, aussi appelé « gras brut », est une analyse qui inclue les acides gras et tout ce qui est soluble dans l'éther (pigments végétaux, esters, aldéhydes, etc.). Le gras brut présent dans les fourrages est riche en énergie. Une valeur élevée est souhaitable, sans toutefois dépasser certains seuils d'acides gras particuliers, qui sont nuisibles pour la santé du rumen.

##### Observations et discussions

La dose de potassium peut affecter la teneur en gras brut des mélanges à base de légumineuses. Le niveau de gras brut le plus élevé a été atteint avec une dose de potassium de 37-50 kg K<sub>2</sub>O/ha (+9,3 % comparativement au témoin). En contraste, la dose de potassium n'a eu aucun effet significatif sur la teneur en acides gras totaux des légumineuses. Les doses testées n'ont pas eu d'impact au niveau des mélanges à base de graminées, tant au niveau du gras brut que des acides gras totaux.

Pour les mélanges à base de légumineuses, les résultats obtenus sont difficiles à expliquer puisque dans la littérature, les doses de potassium ne sont pas reconnues pour avoir des effets sur le gras brut dans la luzerne (Macolino et al., 2013). Il pourrait être pertinent d'investiguer ces résultats avec plus de recherches, afin de déterminer dans quelles conditions et pourquoi le potassium peut avoir un effet sur la quantité de gras brut des légumineuses fourragères.

L'amplitude de la variation de la qualité est faible, et ne justifie pas de diminuer significativement le rendement des légumineuses en ne répondant pas à leurs besoins en potassium.

#### 7.4.5 Effet sur la teneur en cendres

##### Contexte

La teneur en cendres des fourrages représente le total des minéraux présents dans le fourrage. Une teneur élevée en cendres diminue la proportion des nutriments ayant une valeur nutritive élevée pour les animaux. Il est donc souhaitable que la teneur en cendres soit la plus faible possible. Le potassium est l'un des minéraux les plus abondants dans les cendres des fourrages, et des études ont démontré que la fertilisation en potassium pouvait influencer la teneur en cendres des fourrages (Macolino et al., 2013).

##### Observations et discussions

L'augmentation des doses de potassium a augmenté la teneur en cendre des mélanges à base de légumineuses (+2,7 à +11,1 % comparativement au témoin) et à base de graminées (+1,8 à +12,8 % comparativement au témoin).

Sur l'ensemble des doses testées, l'amplitude de la variation du niveau de cendre est faible, et ne justifie pas de diminuer significativement le rendement des légumineuses ou des graminées en ne répondant pas à leurs besoins en potassium.

#### 7.4.6 Effet sur la valeur énergétique

##### Contexte

La valeur énergétique d'un fourrage peut être estimée grâce au pourcentage d'unités nutritives totales (UNT), qui représentent la somme de la contribution énergétique de toutes les fractions organiques digestibles du fourrage (fibres, GNF, gras brut, protéines).

##### Observations et discussions

La dose de potassium n'a pas eu d'effet significatif sur la teneur en unités nutritives totales du mélange fourrager, peu importe le type de mélange (légumineuses, graminées). Cela confirme que les effets observés sur les nutriments ayant une valeur énergétique sont relativement faibles, et ne devraient pas influencer les VSRF.

#### 7.4.7 Effet sur les minéraux autres que le potassium

La fertilisation en potassium a eu des effets sur quelques minéraux, soit le Mg, Cl, Mn, dans les mélanges à base de légumineuses et de graminées.

La diminution du niveau de Mg avec la fertilisation en potassium n'est pas problématique, puisque cet élément est analysé de façon routinière dans les fourrages, et que le niveau total de Mg de la ration est ajusté en conséquence. En suivant les nouvelles VSRF, les pourcentages de Mg des fourrages (0,08 à 0,29 % MS) correspondent pour la plupart à ce qui est observé au Québec (Berthiaume, 2017). Dans certains cas, des niveaux plus faibles que la normale ont été observés, mais ils étaient associés aux caractéristiques des sols plutôt qu'à la fertilisation en potassium, puisque les doses ont eu peu d'impact sur la teneur en Mg dans les essais ayant une faible teneur en Mg.

Le niveau de Cl a augmenté en fonction de la fertilisation en potassium étant donné que le fertilisant utilisé dans les essais contenait du Cl (muriate de potassium, 0-0-60 : KCl). Le Cl n'est pas analysé de façon routinière dans les fourrages. En suivant les nouvelles VSRF, il est possible que le niveau de Cl du fourrage (0,14 à 1,48 % MS) soit plus faible ou élevé que ce qui est généralement observé au Québec (Berthiaume, 2017). Les niveaux plus faibles étaient associés aux caractéristiques des sols plutôt qu'à la fertilisation en potassium, puisque ceux-ci ont été observés dans les traitements

témoins sans fertilisation en muriate de potassium. Les niveaux maximums de Cl observés dans les essais en suivant les recommandations ne sont pas problématiques pour les animaux. Aucun niveau maximum de chlore dans les rations n'a été établi pour les animaux ou les bovins laitiers (NRC, 2005; NASEM, 2021). Le niveau de Cl peut toutefois être problématique s'il entraîne un déséquilibre de l'équilibre acido-basique de l'animal (NRC, 2005). Toutefois, étant donné que le fertilisant utilisé contenait également un cation (K+), l'effet sur l'équilibre acido-basique est négligeable. De plus, la fertilisation en potassium des fourrages comprend souvent des engrais organiques, qui sont moins riches en Cl que le fertilisant utilisé dans les essais. Il est donc probable que les niveaux de Cl observés en réalité soient plus faibles que ce qui a été observé dans parcelles fertilisées au muriate de potassium.

Le Mn n'est pas analysé de façon routinière dans les fourrages. Toutefois, en suivant les nouvelles VSRF, les teneurs en Mn des fourrages (17 à 59 ppm) correspondent à ce qui est régulièrement observé au Québec (Berthiaume, 2017).

## 7.5 Soufre (S)

### 7.5.1 Effet sur la teneur en protéine brute et en soufre

#### Contexte

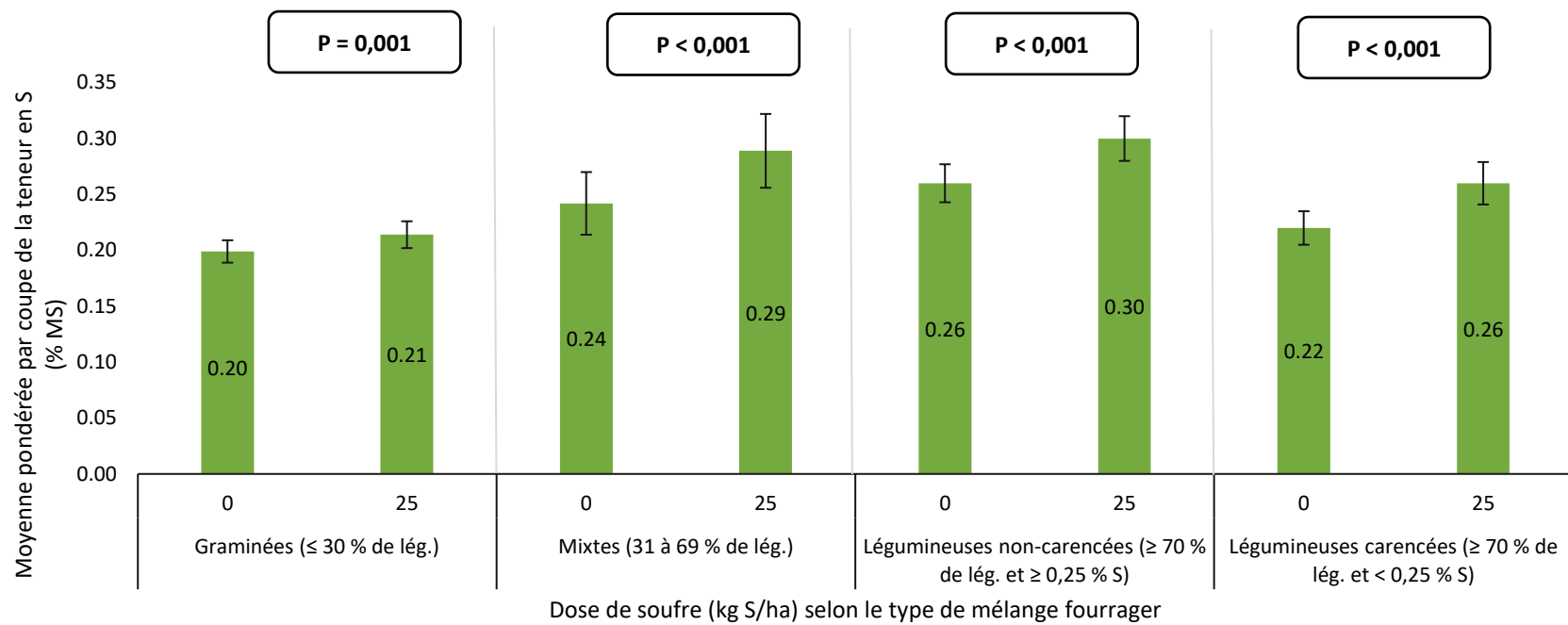
Dans les années 1990, à cause de la pollution de l'air par le soufre, les sols bénéficiaient d'un apport atmosphérique relativement élevé en cet élément, ce qui rendait les carences généralement peu communes. Toutefois, étant donné la forte diminution de la pollution atmosphérique par cet élément, les apports sont aujourd'hui beaucoup moins importants qu'avant. Le soufre est requis pour la production de plusieurs acides aminés soufrés dans la plante, et donc pour la production des protéines. La luzerne, ayant des besoins particulièrement élevés en cet élément, est donc plus à risque de souffrir d'une carence. Il a été rapporté que la fertilisation soufrée d'une luzernière carencée en soufre entraînait une hausse significative de la teneur en protéines brutes et de la teneur en soufre (Lajeunesse, 2019; MAAARO, 2022). La valeur critique de soufre dans la luzerne a été établie à 0,25 % de la matière sèche (Camberato et al., 2012).

En plus de l'avantage d'une teneur plus élevée en protéine, une augmentation de la teneur en soufre du fourrage est aussi souhaitable. Le soufre est particulièrement important dans les rations, entre autres pour optimiser la synthèse de protéines microbiennes dans le rumen.

#### Observations

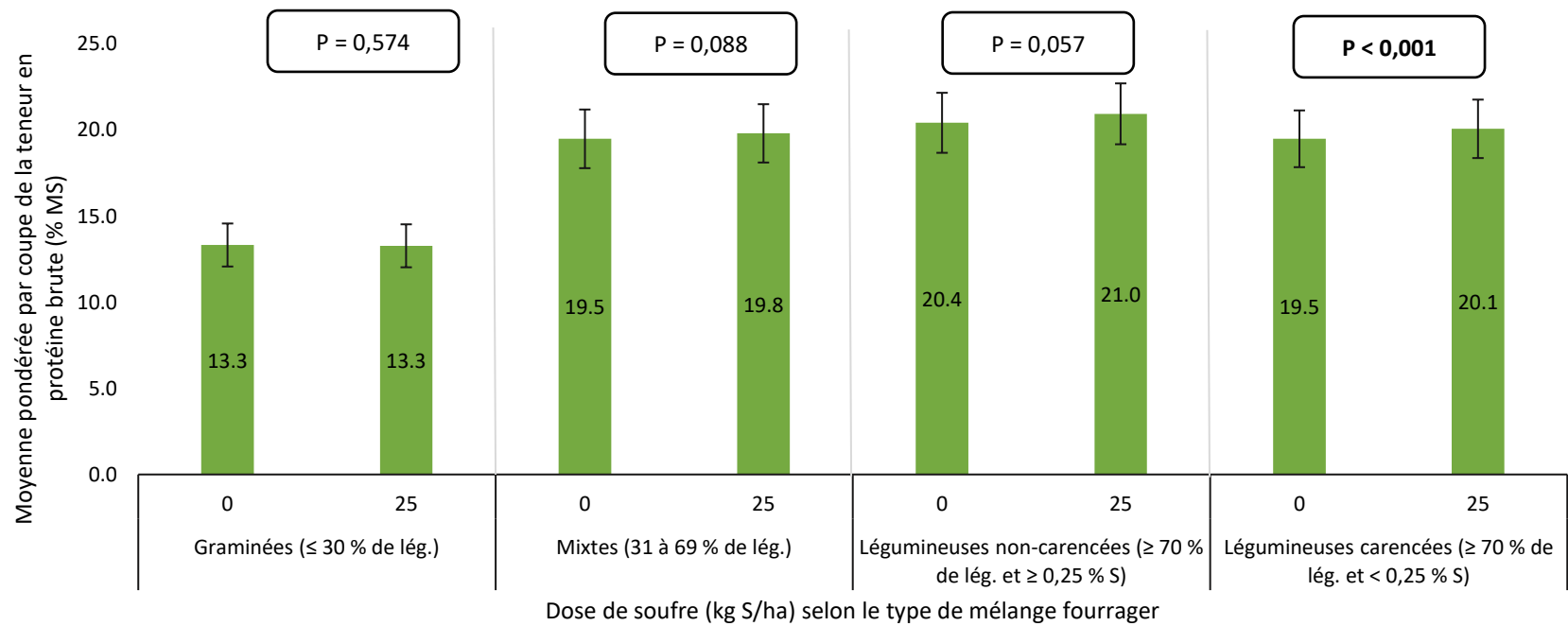
L'application de 25 kg/ha de soufre a eu un effet positif sur la teneur en soufre des mélanges de graminées, des mélanges mixtes, ainsi que des mélanges de légumineuses carencées et non carencées (Figure 2). Dans les mélanges à base de légumineuses, l'application de soufre a permis d'augmenter significativement la teneur en protéines brutes (+0,58 unité de %; Figure 3). La fertilisation en soufre des légumineuses carencées a permis de rétablir le niveau de soufre au-dessus de la valeur critique. Il est important de noter que les mélanges à base de légumineuses étaient majoritairement (60 à 100 %) composés de luzerne.

L'application de soufre n'a pas eu d'effet significatif sur la teneur en protéine brute des mélanges à base de légumineuses non carencées, des mélanges mixtes ou des mélanges à base de graminées. L'effet du soufre a été mesuré avec les doses médianes d'azote, de phosphore et de potassium des essais. Or, selon les nouvelles VSRF, les doses utilisées n'ont pas permis de maximiser le rendement et la teneur en protéine des mélanges à base de graminées. Il serait intéressant de vérifier l'effet du soufre chez des graminées recevant une dose d'azote répondant à leur besoin.



**Figure 15.** Effet d'une application de soufre (25 kg S/ha) sur la moyenne pondérée par coupe de la teneur en soufre (% MS) de différents mélanges fourragers.





**Figure 16.** Effet d'une application de soufre (25 kg S/ha) sur la moyenne pondérée par coupe de la teneur en protéine brute (% MS) de différents mélanges fourragers

## 7.6 Conclusion et recommandations

Au niveau de l'azote, les résultats indiquent que le niveau de fertilisation est important dans les mélanges à base de graminées afin de maximiser le niveau de protéine brute des fourrages. Pour les mélanges pratiquement purs de graminées (0-10 % légumineuses), une dose de 200-225 kg N/ha est nécessaire pour obtenir une valeur de protéine brute maximale. Dans les mélanges contenant de 11 à 30 % de graminées, une dose de 150-180 kg N/ha était suffisante pour atteindre une valeur de protéine brute maximale. Les recommandations proposées ne devraient probablement pas mener à une accumulation excessive de nitrates pour des conditions de croissance normales, selon les INA calculés. Les doses proposées peuvent légèrement augmenter la quantité de fibres aNDFom dans les mélanges à base de graminées, et légèrement diminuer la quantité de GNF dans les mélanges mixtes ou à base de graminées. Ces effets sont toutefois minimes, et n'ont pas influencé la valeur énergétique des fourrages. Il n'est donc pas justifié de diminuer significativement le rendement des graminées en ne répondant pas à leurs besoins en azote. Des effets ont également été observés sur certains minéraux dans les mélanges de légumineuses (DACA), mixtes (Zn), ou de graminées (CA, P, Mg, Na). Toutefois, ceux-ci n'auront pas d'impact négatif au niveau de l'alimentation des animaux. Les VSRF pour l'azote sont ainsi considérées comme étant adéquates du point de vue de la valeur nutritive. Cependant, dans les régions plus fraîches (< 2450 degrés-jours base 0 °C), la dose d'azote ne permet pas de maximiser la teneur en protéine brute des mélanges de graminées. Il pourrait être pertinent d'évaluer si le gain en protéine brute (sans gain de rendement) peut justifier d'augmenter la dose d'azote des mélanges de graminées dans les régions plus fraîches. Davantage de données dans ces régions, incluant la teneur en nitrate, seraient nécessaires pour prendre une décision éclairée.

En ce qui a trait au phosphore, le niveau de fertilisation en cet élément a permis d'augmenter la quantité de phosphore dans les mélanges à base de légumineuses ou de graminées, mais n'a eu aucun autre impact sur la valeur nutritive des fourrages. Les niveaux de phosphores observés ne sont pas problématiques pour les animaux. Les VSRF proposées sont donc considérées comme étant adéquates du point de vue de la valeur nutritive. Les données pour les mélanges mixtes ne sont pas en quantité suffisante pour émettre un avis à ce sujet.

Pour ce qui est du potassium, chez les mélanges à base de graminées, une augmentation de la dose a augmenté la concentration de potassium et la qualité des fibres (+NDFDom 240 h, -lignine). Toutefois, quelques légers impacts négatifs ont été notés comme l'augmentation de la teneur en cendres et la diminution des GNF. Chez les mélanges à base de légumineuses, l'augmentation de la dose de potassium a augmenté la teneur en potassium des fourrages, mais a eu comme impact négatif d'augmenter légèrement les cendres. Des effets ont également été observés au niveau de la teneur en gras brut et en certains minéraux (Mg, Cl, Mn). Cependant, en considérant la faible amplitude des effets négatifs observés, et le fait que la valeur énergétique des fourrages n'a pas été affectée par la fertilisation en potassium, les VSRF proposées sont considérées adéquates du point de vue de la valeur nutritive. Une exception doit toutefois être prise en compte : les mélanges à base de graminées destinés aux animaux en transition. Pour cette catégorie d'animaux, une teneur élevée en potassium est néfaste, et il est recommandé de diminuer la fertilisation en potassium pour ne pas dépasser une DACA de 250 mEq/kg de MS. Les données pour les mélanges mixtes ne sont pas en quantité suffisante pour émettre un avis à ce sujet.

Finalement, les résultats des essais réalisés démontrent l'importance de fertiliser en soufre la luzerne lorsque celle-ci est en situation de carence ( $S < 0,25$  % MS), afin d'optimiser la teneur en protéine brute tout en rétablissant un niveau de soufre optimal. La fertilisation soufrée n'a pas permis d'augmenter la teneur en protéine brute des mélanges de légumineuses non carencées, des mélanges mixtes ou à base de graminées.

## 7.7 Autres éléments fertilisants non évalués dans les essais

### 7.7.1 Fertilisation en bore (B) de la luzerne pour optimiser le rendement et la qualité

La luzerne est une culture exigeante en bore, et une déficience peut avoir des effets néfastes, tant sur le rendement que sur la qualité (Duval, 1995). Les seuils de bore soluble à l'eau chaude rapportés dans la deuxième édition du guide de référence en fertilisation sont approximativement de 0,5 mg B/kg en sols sableux, et de 0,8 mg B/kg en sols argileux. Une grille de référence en fertilisation pour le bore a été proposée dans ce guide (Parent et Gagné, 2010).

### 7.7.2 Fertilisation en chlore (Cl) pour diminuer la différence alimentaire cation anion (DACA) des fourrages destinés aux vaches en transition

Des recherches québécoises ont démontré qu'il est possible de fertiliser en chlore afin d'augmenter la teneur en chlore des fourrages, ce qui permet de diminuer la DACA. Des applications de 100 kg Cl/ha au printemps et/ou de 65 kg Cl/ha après la première coupe sont recommandées pour produire des fourrages à faible DACA (Tremblay et al., 2008). Cette pratique peut s'avérer économiquement intéressante lorsqu'on la compare à l'utilisation de sels anioniques dans la ration.

Il est important de s'assurer de l'uniformité d'application du produit dans le champ pour offrir des fourrages ayant une DACA uniforme aux animaux. Les produits fertilisants utilisés sont habituellement le chlorure de calcium ( $\text{CaCl}_2$ ) ou le chlorure d'ammonium ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ). Des précautions particulières doivent être prises lors de l'application de ces produits, car ceux-ci sont très hygroscopiques.

Lorsque de tels fourrages sont utilisés, un suivi rigoureux de l'alimentation doit être fait afin de s'assurer de l'efficacité de la stratégie. L'analyse des minéraux impliqués dans la DACA (Na, K, Cl et S) en chimie humide ainsi que le suivi du pH urinaire des vaches sont des pratiques particulièrement importantes.

## 8 CONCLUSION

Les travaux réalisés par l'IRDA dans le cadre du Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation 2020-2023 (MIRVRF) ont permis de générer de nouvelles connaissances centrales pour la fertilisation des prairies en production, en plus de mettre à jour les classes de fertilité et doses optimales d'apports des éléments N, P, K et S pour ces cultures. Ces recommandations reposent sur l'analyse des données validées d'expérimentations scientifiques québécoises réalisées au champ, appuyée de l'expertise agronomique et de principes scientifiques reconnus dans le domaine de la nutrition des cultures. Tel qu'attendu pour les prairies de graminées, l'azote a été l'élément principal qui a déterminé le niveau de rendement où des augmentations variant de 34 à 74 % ont été calculées. La fertilisation P et K a aussi permis des gains de rendement, surtout en sols peu pourvus. Les augmentations de rendement les plus élevées étaient respectivement de 7 % et 15 % pour les essais P et K. Dans l'ensemble, les doses optimales proposées sont similaires ou inférieures à celles des grilles actuelles (CRAAQ, 2010) à l'exception des VSRF azotées des prairies de graminées où la révision à la hausse des doses de N permet d'optimiser les rendements par zone climatique sans compromettre la qualité des fourrages. En effet, l'étude de l'effet des fertilisations en N, P, K et S sur la valeur nutritive des plantes fourragères pérennes a été minutieusement réalisée en tenant compte de 25 paramètres de qualité d'intérêt, choisis en raison de leur importance dans l'élaboration de programmes alimentaires des animaux d'élevage. L'inclusion de la valeur nutritive des fourrages dans l'élaboration des nouvelles VSRF constitue une première au Québec et les résultats de cette étude apporteront des informations importantes tant aux producteurs animaliers qu'aux producteurs de grandes cultures, et aux conseillers en nutrition animales.

Pour chaque élément nutritif testé, trois types de prairies ont été distingués en fonction du pourcentage de légumineuses : i) les prairies de graminées ( $\leq 30$  % de légumineuses), ii) les prairies mixtes (31- 69 % de légumineuses), et iii) les prairies de légumineuses ( $\geq 70$  % de légumineuses). Pour la grille N où l'influence de la teneur en légumineuses a été plus marquée sur la réponse de la culture, chaque type de prairies a été subdivisé en deux sous-catégories. Cette subdivision apportera un niveau de précision supplémentaire au niveau de la fertilisation des prairies en comparaison au seuil unique de 40 % de légumineuses actuellement utilisé au Québec. Pour les recommandations en azote, l'accumulation de degrés-jours (base 0 °C) a également été considérée dans le cadre du calcul des VSRF en raison de l'impact significatif de la zone climatique sur les besoins de la culture. Cette considération permettra aussi de tenir compte des différences de productivité des prairies à travers les grandes zones climatiques de la province. Ainsi, pour cet élément, un total de 18 VSRF (six sous-types de prairies (0-10; 11-30 ; 30-50; 50-70; 70-90; 90-100 % de légumineuses)  $\times$  trois zones climatiques) ont été retenues avec des valeurs variant entre 0 et 225 kg N/ha. Ces VSRF azotées permettront d'atteindre 95 % du ROM<sub>max</sub> en plus d'augmenter significativement la teneur en protéines des graminées et réduire le risque de dépassement du seuil de toxicité de 0,15 % MS en azote nitrique. Contrairement à l'azote, aucun effet du climat n'a été observé sur la réponse des prairies en production aux fertilisations phosphatée et potassique. La fertilisation phosphatée est précisée par types de prairies et selon le niveau de saturation en P (ISP<sub>1</sub>) du sol. La texture du sol n'a pas influencé significativement la réponse de la culture à l'apport de P. Toutefois, dans le but de faire une considération environnementale, les seuils critiques environnementaux du REA, tenant compte de la texture du sol, conformément à la réglementation en vigueur, ont été intégrés dans les recommandations de l'IRDA. Quant au potassium, en plus des types de prairies, les VSRF sont modulées sur la base d'un double indicateur qui considère le groupe de textures et la teneur en potassium du sol. Une analyse supplémentaire sur le ratio N:K dans la biomasse a permis d'étudier l'influence de l'alimentation en N sur la réponse à la fertilisation potassique. Enfin, un biais important a été corrigé pour l'indicateur de fertilité du sol par l'usage de la concentration du sol en ppm de K<sub>M3</sub> telle que mesurée au niveau du laboratoire, plutôt que la valeur convertie en kg/ha obtenue par calcul en utilisant le facteur de conversion unique de 2,241.

Outre les éléments nutritifs majeurs, la présente étude apporte des précisions supplémentaires concernant la fertilisation soufrée des prairies de légumineuses en production, afin d'éviter les pertes de rendement et la diminution de la qualité fourragère. La réalisation d'essais supplémentaires sur la fertilisation en soufre serait toutefois requise, particulièrement pour les prairies de graminées et mixtes, afin de déterminer les recommandations en cet élément. Les travaux de l'IRDA permettront aux acteurs du milieu agricole de bénéficier de recommandations propres aux sols et au climat québécois, permettant de mieux concilier la productivité et la conservation des ressources.

## 9 REMERCIEMENTS

*L'équipe de l'IRDA tient à remercier chaleureusement les nombreux clubs-conseils en agroenvironnement, intervenants et spécialistes qui ont participé à toutes les étapes du projet. Votre implication et nos fructueux échanges ont contribué à l'obtention d'un travail de qualité, et ont fait de ce document une précieuse preuve de collaboration entre les différents acteurs du milieu. Nos gratitudeles plus sincères vous sont adressées, sans quoi ce travail n'aurait pas été une telle réussite.*

## 10 PRAIRIES EN PRODUCTION – VALEURS SCIENTIFIQUES DE RÉFÉRENCE EN FERTILISATION

AZOTE					
Proportion des légumineuses (%)	Période d'application	Fractionnement <sup>(1)</sup> (% de la dose totale)	VSRF (kg N/ha)		
			Zone périphérique <sup>(9)</sup>	Zone intermédiaire <sup>(9)</sup>	Zone centrale-sud <sup>(9)</sup>
<b>Graminées (≤ 30 % de légumineuses) <sup>(11)</sup></b>					
0 – 10	Au printemps et après les coupes	2 apports : 60-40 %	180 <sup>(2,10)</sup>	210 <sup>(2,10)</sup>	225 <sup>(2,10)</sup>
11 – 30		3 apports : 40-30-30 %	145 <sup>(2)</sup>	190 <sup>(2,10)</sup>	210 <sup>(2,10)</sup>
<b>Mixtes (31- 69 % de légumineuses)</b>					
31 – 50	Au printemps et après les coupes	1 apport : 100 %	110 <sup>(3)</sup>	140 <sup>(2)</sup>	170 <sup>(2,10)</sup>
50 – 69		2 apports : 60-40 % 3 apports : 40-30-30 %	25-50 <sup>(4,8)</sup>	25-100 <sup>(4,8)</sup>	50-125 <sup>(5,8)</sup>
<b>Légumineuses (≥ 70 % de légumineuses) <sup>(12)</sup></b>					
70 – 89	Au printemps	1 apport : 100 %	0-25 <sup>(6,8)</sup>	0-25 <sup>(7,8)</sup>	0-50 <sup>(7,8)</sup>
90 – 100			0 <sup>(7,8)</sup>	0 <sup>(7,8)</sup>	0 <sup>(7,8)</sup>

DJ<sub>0</sub>: degrés-jours en base 0°C

- (1) Dans le cadre des essais de graminées du PSEF, les doses supérieures ou égales à 100 N étaient fractionnées en deux apports à proportion égale (50-50 %), au printemps et après la 1<sup>re</sup> coupe. Les fractionnements proposés dans ce tableau tiennent compte de la pratique habituellement recommandée sur le terrain.
- (2) Dose correspondant à la borne inférieure de l'intervalle de confiance (95 % du ROM maximal).
- (3) Dose moyenne de l'intervalle Min-Moy (95 % du ROM maximal). La borne inférieure de l'intervalle de confiance (80 N) est jugée trop faible.
- (4) Correspond à la plus petite dose testée et la dose moyenne (95 % du ROM maximal), arrondie au 5 supérieur.
- (5) Correspond à la borne inférieure de l'intervalle de confiance et à la dose moyenne (95 % du ROM maximal), arrondies au 5 supérieur.
- (6) Correspond à la borne inférieure (95 % du ROM maximal) et la plus petite dose testée.
- (7) Correspond aux bornes inférieures et supérieures de l'intervalle de confiance (95 % du ROM maximal).
- (8) Considérer l'historique du champ et le potentiel de fixation symbiotique des légumineuses.
- (9) Se référer à la carte des zones du présent document (Figure 4, page 25).
- (10) Les doses de 150 kg N/ha et plus doivent être fractionnées en deux ou trois apports (au printemps et après les coupes) afin d'éviter les risques de toxicité au nitrate et de favoriser un meilleur synchronisme avec les besoins de la plante.
- (11) Dans l'éventualité où les doses les plus élevées de N sont appliquées, une attention particulière doit être portée à la nutrition K, surtout en sols moins bien pourvus en K.
- (12) Pour les prairies de légumineuses, en cas de carence en S (teneur dans la biomasse de récolte inférieure à 0,25 % MS), une dose de 25 kg S/ha de est recommandée pour optimiser le rendement et la qualité nutritive des fourrages.

PHOSPHORE				
Type de prairies	Groupe de textures de sol <sup>(1)</sup>	Classe de fertilité ISP <sub>1</sub> (%) <sup>(2)</sup>	Période d'application	VSRF <sup>(3)</sup> (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)
Graminées (≤ 30% de légumineuses)	G1	≤ 4,8	Au printemps	70 <sup>(4)</sup>
		4,8- 7,6		35 <sup>(5)</sup>
		7,7- 9,6		0-25 <sup>(6,7)</sup>
		> 9,6		0 <sup>(7)</sup>
	G2-G3	≤ 4,8	Au printemps	70 <sup>(4)</sup>
		4,8- 9,6		35 <sup>(5)</sup>
		9,7-13,1		25 <sup>(6)</sup>
		> 13,1		0 <sup>(7)</sup>
Mixtes (31- 69 % de légumineuses)	G1	≤ 5,3	Au printemps	85 <sup>(8)</sup>
		5,4 – 7,6		45 <sup>(8)</sup>
		7,7-10,5		0-25 <sup>(7,8)</sup>
		> 10,5		0 <sup>(8)</sup>
	G2-G3	≤ 5,3	Au printemps	85 <sup>(8)</sup>
		5,4 – 10,5		45 <sup>(8)</sup>
		10,6-13,1		25 <sup>(8)</sup>
		> 13,1		0 <sup>(8)</sup>
Légumineuses (≥ 70 % de légumineuses)	G1	≤ 5,3	Au printemps	100 <sup>(4)</sup>
		5,4 – 7,6		50 <sup>(4)</sup>
		7,7-10,5		0-25 <sup>(6,7)</sup>
		> 10,5		0 <sup>(7)</sup>
	G2-G3	≤ 5,3	Au printemps	100 <sup>(4)</sup>
		5,4 – 10,5		50 <sup>(4)</sup>
		10,6-13,1		25 <sup>(6)</sup>
		> 13,1		0 <sup>(7)</sup>

(1) G1 : sols à textures fines; G2 : sols à textures moyennes; G3 : sols à textures grossières.

(2) ISP<sub>1</sub> : saturation en P du sol =  $[P_{M3}/Al_{M3}] \times 100$ , éléments extraits au Mehlich-3 (Mehlich, 1984) et dosés par spectroscopie d'émission au plasma (SEP ou ICP : *Inductively coupled plasma*).

(3) VSRF : Valeurs scientifiques de référence en fertilisation.

(4) Dose optimale dans cette catégorie de sols, arrondie au multiple de 5, le cas échéant.

(5) En absence de dose optimale unique dans cette catégorie de sols, la borne inférieure est retenue, arrondie au multiple de 5.

(6) Proposition de la plus petite dose testée pour cette catégorie de sol étant donnée l'absence de différence significative entre les ROM.

(7) Proposition d'un apport nul, considérant l'absence probable de gain par la fertilisation dans cette catégorie de sols saturés en P.

(8) En l'absence de données dans ce type de prairies, dose suggérée considérant l'ensemble des résultats des autres analyses.

POTASSIUM					
Type de prairies	Groupes de textures du sol <sup>(1)</sup>	Classe de fertilité K Mehlich-3 (ppm)	Période d'application <sup>(2)</sup>	Fractionnement <sup>(2)</sup> (kg K <sub>2</sub> O/ha)	VSRF <sup>(3)</sup> (kg K <sub>2</sub> O/ha)
<b>Graminées</b> <sup>(9,10)</sup> (≤ 30 % de légumineuses)	G1, G2, G3	< 50	Au printemps	100	200 <sup>(4)</sup>
		50- 100	Après la 1 <sup>re</sup> coupe	100	125 <sup>(4)</sup>
		100- 200	Au printemps	-	25-65 <sup>(5)</sup>
		> 200			0 <sup>(6)</sup>
<b>Mixtes</b> (31- 69 % de légumineuses)	G1, G2, G3	< 45	Au printemps	125	250 <sup>(7)</sup>
		45-85	Après la 1 <sup>re</sup> coupe	125	170 <sup>(7)</sup>
		85-170	Au printemps	-	85 <sup>(7)</sup>
		> 170			0-50 <sup>(7)</sup>
<b>Légumineuses</b> (≥ 70 % de légumineuses)	G1, G2, G3	< 43	Au printemps	150	300 <sup>(8)</sup>
		43 – 84	Après la 1 <sup>re</sup> coupe	150	205 <sup>(4)</sup>
		84 – 168	Au printemps	104	115 <sup>(4)</sup>
		168 – 335	Après la 1 <sup>re</sup> coupe	103	0-50 <sup>(5)</sup>
		> 335	Au printemps	-	0 <sup>(6)</sup>

(1) G1 : sols à textures fines; G2 : sols à textures moyennes; G3 : sols à textures grossières.

(2) Les périodes de fractionnement sont proposées telles qu'elles ont été testées, c'est-à-dire 50-50 % au printemps et après la 1<sup>re</sup> coupe lorsque la dose était supérieure à 150 kg K<sub>2</sub>O/ha. Cependant, pour les prairies de légumineuses (≥ 70% lég.), il est recommandé de faire une application après l'avant-dernière coupe, ou 500 degrés-jours (base de 5°C) avant le dernier gel.

(3) VSRF : Valeurs scientifiques de référence en fertilisation.

(4) Dose optimale proposée (dose visant l'atteinte de 100 % du ROMmax), arrondie au multiple de 5, le cas échéant.

(5) Intervalle formé de la plus petite dose testée et la moitié de la recommandation supérieure, considérant le peu de réponse dans cette catégorie de sol et l'importance de maintenir un ratio N:K adéquat suivant l'apport des VSRF plus élevées du N.

(6) Dose nulle proposée considérant l'absence de réponse et la richesse du sol en K<sub>M3</sub>.

(7) En l'absence de données dans ce type de prairies, dose suggérée considérant l'ensemble des résultats des autres analyses.

(8) En l'absence de données dans cette catégorie de sols, dose proposée en vue de limiter les risques de perte de rendements et de diminution accrue de la fertilité potassique des sols très faiblement pourvus en K. Cette dose couvre les exportations (moyenne de la population de tête de 332 kg K<sub>2</sub>O/ha) de la culture.

(9) Pour les prairies de graminées, une alimentation suffisante en N est nécessaire pour une réponse optimale de la culture à la fertilisation potassique.

(10) Pour les graminées destinées à l'alimentation des vaches en transition, utiliser une dose inférieure ou égale à 110 kg K<sub>2</sub>O/ha dans les sols de moins de 67 ppm K<sub>M3</sub> afin d'éviter les risques de dépasser la teneur limite en K de la biomasse de 2,3 % MS. Dans les sols de plus de 67 ppm K<sub>M3</sub>, la limite de 2,3 % est atteinte sans aucun apport de K. Ainsi, aucun apport n'est recommandé dans cette situation et il est souhaitable d'utiliser un champ plus pauvre en potassium afin de produire un fourrage destiné aux vaches en transition. Il est essentiel de considérer la DACA réelle du fourrage obtenu au moment d'élaborer le programme alimentaire pour vaches en période de transition.



## 11 RÉFÉRENCES

- Abdi, D., Cade-Menun, B. J., Ziadi, N., Shi, Y., Bélanger, G., Lajeunesse, J., et Lafond, J. 2019. A31P-NMR spectroscopic study of phosphorus forms in two phosphorus-fertilized grassland soils in eastern Canada. *Canadian Journal of Soil Science*, 99(2), 161-172.
- Agriculture, Food, and Rural Development. 2004. *Alberta fertilizer guide*. Alberta government. <https://open.alberta.ca/dataset/2909624>. [en ligne] (dernière consultation le 8 juillet 2023)
- Atlantic Forage and Corn Team (AFACT), 2021. Atlantic Forage Guide. <https://www.yumpu.com/en/document/read/27312041/atlantic-forage-guide-perennia>. [en ligne] (dernière consultation le 8 juillet 2023)
- Bélanger, G. et R. E. McQueen. 1998. Analysis of the nutritive value of timothy grown with varying N nutrition. *Grass and Forage Science* 53:109–119. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2494.1998.5320109.x>.
- Bélanger, G., et Gastal, F. 2000. Nitrogen utilization by forage grasses. *Canadian Journal of Plant Science*, 80(1), 11-20.
- Bélanger, G., et Richards, J. E. 2000. Dynamics of biomass and N accumulation of alfalfa under three N fertilization rates. *Plant and Soil*, 219(1-2), 177-185.
- Bélanger, G., Tremblay, G. F., et Mongrain, D. 2008. Yield and nutritive value of the spring growth of an ageing timothy sward. *Canadian journal of plant science*, 88(3), 457-464.
- Bélanger, G., et Ziadi, N. 2008. Phosphorus and nitrogen relationships during spring growth of an aging timothy sward. *Agronomy journal*, 100(6), 1757-1762.
- Bélanger, G., Tremblay, G. F., Bertrand, A., Mongrain, D., Parent, G., Savoie, P., Gilbert, Massé, D., Y. et Babineau, D. 2016. Reed canarygrass crop biomass and silage as affected by harvest date and nitrogen fertilization. *Canadian Journal of Plant Science*, 96(3), 413-422.
- Bélanger, G., Ziadi, N., Lajeunesse, J., Jouany, C., Virkajarvi, P., Sinaj, S., et Nyiraneza, J. 2017. Shoot growth and phosphorus–nitrogen relationship of grassland swards in response to mineral phosphorus fertilization. *Field Crops Research*, 204, 31-41.
- Bélanger, G., A. Claessens, M.-N. Thivierge, et G. Tremblay (Éditeurs scientifiques). 2022. Guide de production – Plantes fourragères. 2e édition. Volume 1. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec. 273 p.
- Benjannet, R., Nyiraneza, J., Khiari, L., Fuller, K., Bizimungu, B., Savoie, D., Jiang, Y., Rodd, V., Mills, A. 2018. An Agro-Environmental Phosphorus Model for Potato in the Canadian Maritime Provinces. *Agronomy Journal*, 110(6):2566–2575.
- Berg, W.K., S.M. Cunningham, S.M. Brouder, B.C. Joern, K.D. Johnson, J. Santini, and J.J. Volenec. 2005. Influence of phosphorus and potassium on alfalfa yield and yield components. *Crop Sci.* 45:297–304.
- Berg, W.K., S.M. Cunningham, S.M. Brouder, B.C. Joern, K.D. Johnson, J. Santini, and J.J. Volenec. 2007. The long-term impact of phosphorus and potassium on alfalfa yield and yield components. *Crop Sci.* 47:2198–2209.
- Berthiaume, R. 2017. Guide sur l'interprétation des analyses d'ensilages. Lactanet. <https://lactanet.ca/guide-sur-linterpretation-des-analyses-densilages/> (page consultée le 6 juillet 2023).
- Brooks, M. E., Kasper Kristensen, Koen J. van Benthem, Arni Magnusson, Casper W. Berg, Anders Nielsen, Hans J. Skaug, Martin Maechler et Benjamin M. Bolker. 2017. glmmTMB Balances Speed and Flexibility Among Packages for Zero-inflated Generalized Linear Mixed Modeling. *The R Journal*, 9(2), 378-400. doi: 10.32614/RJ-2017-066.
- Brown, D. 1945. The growth and composition of the tops of peach trees in sand culture in relation to nutrient-element balance. *West Va. Agr. Exp. Sta. Bui*, 322:1–72.
- Bruningfann, C.S.; Kaneene, J.B. 1993a. The effects of Nitrate, nitrite and N-nitroso compounds on animal health. *Veterinary and Human Toxicology* 35: 237-253
- Bruningfann, C.S.; Kaneene, J.B. 1993b. The effects of Nitrate, nitrite and N-nitroso compounds on human health – a review. *Veterinary and Human Toxicology* 35: 521-538.
- Brulsema, T. W. 2000. Managing P and K fertility for forages. News and Views – July 2000. Phosphate and Potash Institute of Canada.

- Calder, F. W. et L. B. MacLeod. 1968. In vitro digestibility of forage species as affected by fertilizer application. Stage of development and harvest dates. *Canadian Journal of Plant Science* 48:17–24. <https://doi.org/10.4141/cjps68-003>.
- Camberato, J., S. Maloney, S. Casteel et K. Johnson. 2012. Sulfur deficiency in alfalfa. Soil fertility update. *Purdue University Department of Agronomy*. <https://ioccop.com/wp-content/uploads/2020/04/Alfalfa.pdf> (page consultée le 6 juillet 2023).
- Carlsson et Huss-Danell, 2003. Nitrogen fixation in perennial forage legumes in the field. *Plant and soil*, 253, 353-372.
- Castonguay, Y., Laberge, S., Brummer, E. C., et Volenec, J. J. 2006. Alfalfa winter hardiness: a research retrospective and integrated perspective. *Advances in agronomy*, 90, 203-265.
- Cate, R. et Nelson, L. 1971. A Simple Statistical Procedure for Partitioning Soil Test Correlation Data Into Two Classes. *Soil Science Society of America Journal*, 35(4), 658-660.
- Centre de Référence en Agriculture et Agroalimentaire du Québec (CRAAQ). 2010. Guide de référence en fertilisation. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (2e éd.). Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec, Commission chimie et fertilité des sols Québec, Canada.
- Centre de Référence en Agriculture et Agroalimentaire du Québec (CRAAQ). 2022. Guide de production – Plantes fourragères. 2e éd., Vol. 1. Bélanger, G. A. Claessens, M.-N. Thivierge et G. Tremblay (Éd.sc.) Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec. ISBN 978-2-7649-0636-1.
- Cescas, M. P. 1978. Table interprétative de la mesure du pH des sols du Québec par quatre méthodes différentes. *Naturaliste canadien*, 105, 259-63.
- Comifer 2011. Groupe Azote. Calcul de la fertilisation azotée. Guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales. Chapitre 6 : Calcul d'un bilan prévisionnel sur prairie. [https://agro-transfert-bretagne.univ-rennes1.fr/territ\\_eau/diagnostic/nitrates/brochure\\_azote\\_comifer\\_2011.pdf](https://agro-transfert-bretagne.univ-rennes1.fr/territ_eau/diagnostic/nitrates/brochure_azote_comifer_2011.pdf)
- Culman, S., Fulford, A., Camberato, J., Steinke, K., Lindsey, L., LaBarge, G., et Warncke, D. 2020. *Tri-state fertilizer recommendations for corn, soybeans, wheat, and alfalfa*. Bulletin, 974.
- Dampney, P. M. R. 1992. The effect of timing and rate of potash application on the yield and herbage composition of grass grown for silage. *Grass and Forage Science*, 47(3), 280-289.
- Defra, A. 2010. Fertiliser manual (RB209). Department of the Environment, Food and Rural Affairs, TSO (The Stationary Office), London.
- Drewnoski, M., Anderson, B. E., Kononoff, P. J. et Reynolds, M.B. 2019. Nitrates in livestock feeding. <https://extensionpubs.unl.edu/publication/9000016365158/nitrates-in-livestock-feeding/>
- Duval, J. 1995. La luzerne et le bore. Agri-Réseau. [https://www.agrireseau.net/documents/63520/la-luzerne-et-le-bore\\_?a=1&r=luzerne+bore](https://www.agrireseau.net/documents/63520/la-luzerne-et-le-bore_?a=1&r=luzerne+bore).
- Eardly, B. D., Hannaway, D. B., et Bottomley, P. J. 1985. Nitrogen nutrition and yield of seedling alfalfa as affected by ammonium nitrate fertilization. *Agronomy Journal*, 77(1), 57-62.
- Ender, F., I. W. Dishington, et A. Helgebostad. 1971. Calcium balance studies in dairy cows under experimental induction and prevention of hypocalcaemic paresis puerperalis. *Z. Tierphysiol. Tierernahr. Futtermittelkd.* 28:233–256.
- FADQ. 2021. Rendements de référence 2021 en assurance récolte. La Financière agricole du Québec. <https://www.fadq.qc.ca/fileadmin/fr/statistiques/assurance-recolte/rendements-references-2021.pdf>
- Geurink, J. H.; Malestein, A.; Kemp, A.; Vantklooster, A.T. 1979. Nitrate poisoning in cattle. 3. Relationship between nitrate intake with hay or fresh roughage and the speed of intake on the formation of methemoglobin. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 27: 268-276.
- Greenberg, A. E. 2021. Potassium Fertilization and Its Impact on Yield, Nutritive Value, Root Reserves, and Winter Hardiness of Alfalfa (Doctoral dissertation, North Dakota State University).

- Giroux, M. et Lemieux, M. 2000. 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. *Agrosol*, vol. 11, no. 1, 8 pages.
- Giroux, M., Cantin, J., Rivest, R. et Tremblay, G. 2002. Évolution des teneurs en phosphore de sols selon la fertilisation, les rotations de cultures et les types de sols. (p. 19).
- Glunk, E., Olson-Rutz, K., et Jones, M. S. U. 2015. Nitrate toxicity of Montana forages. Montana State University Extension MT 200205AG Revised, 3, 15.
- Grant, E.A. et MacLean, A.A. 1966. Effect of nitrogen, phosphorus, and potassium on yield, persistence, and nutrient content of timothy. *Can. J. Plant Sci.* 46:577–582.
- Guertin S. P., St-Pierre J. C., et Gervais, P. 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.
- Hanson, A. A., D. K. Barnes et R. R. Hill Jr. 1988. Alfalfa and Alfalfa Improvement. Agronomy Monographs. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America. DOI:10.2134/agronmonogr29.
- Haupt, G., Lauzon, J., et Hall, B. 2015. Sulfur fertilization: improving alfalfa yield and quality. *Crops & Soils*, 48(4), 26-30.
- Institut de la statistique du Québec. 2023. *Superficie des grandes cultures, rendement à l'hectare et production, par regroupement de régions administratives, Québec, 2007-2023* [en ligne] [statistique.quebec.ca/fr/produit/tableau/3786](https://statistique.quebec.ca/fr/produit/tableau/3786) (consulté le 3 juillet 2023).
- IRDA. 2020a. Package « catenelson ». Institut de recherche et développement en agroenvironnement. [en ligne] <https://github.com/irda-rd/catenelson>
- IRDA. 2020b. Package « cnd ». Institut de recherche et développement en agroenvironnement. [en ligne] <https://github.com/irda-rd/cnd>
- Jeschke, M., Diedrick, K. et Clover M., 2017. Fertilisation en soufre des cultures. [en ligne] [https://www.pioneer.com/content/dam/dpagco/pioneer/na/ca/fr/files/DF-Fertilisation-en-soufre-des-cultures-NA\\_CA\\_FR\\_V1.pdf](https://www.pioneer.com/content/dam/dpagco/pioneer/na/ca/fr/files/DF-Fertilisation-en-soufre-des-cultures-NA_CA_FR_V1.pdf) (consulté le 30 août 2023).
- Jordbruksverket, 2023. Rekommendationer och strategier för gödsling. [en ligne] <https://jordbruksverket.se/vaxter/odling/vaxtnaring/rekommendationer-och-strategier-for-godsling> (consulté le 7 septembre 2023).
- Khiari, L., Parent, L., Pellerin, A., Alimi, A. R. A., Tremblay, C., Simard, R. R. et Fortin, J. 2000. An Agri-Environmental Phosphorus Saturation Index for Acid Coarse-Textured Soils. *Journal of Environmental Quality*, 29(5), 1561-1567.
- Khiari, L., Parent, L. et Tremblay, N. 2001a. Critical Compositional Nutrient Indexes for Sweet Corn at Early Growth Stage. *Agronomy Journal*, 93(4), 809-814.
- Khiari, L., Parent, L. et Tremblay, N. 2001b. Selecting the High-Yield Subpopulation for Diagnosing Nutrient Imbalance in Crops. *Agronomy Journal*, 93(4), 802-808.
- Khiari, L. et Parent, L. 2005. Phosphorus transformations in acid light-textured soils treated with dry swine manure. *Canadian Journal of Soil Science*, 85(1), 75-87.
- Lajeunesse, J. 2019. Effet de l'ajout de sulfate sur la productivité de la luzerne. Journée d'information scientifique – Bovins laitiers et Plantes fourragères. 26 février, Drummondville, Québec, Canada.
- Landry, C., C.-A. Joseph, S. Houde, J. Forest-D., et M. Grenier. 2021. Fertilisation du blé de printemps, de l'orge et de l'avoine. Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation du Québec (2020- 2023). Fascicule 04. Présenté au ministère de l'agriculture et des pêcheries. 122 pages. <https://irda.qc.ca/fr/publications/?r=1745&t=1411#documents>.
- Landry, C., C.-A. Joseph, S. Houde et J. Forest-D. 2022. Fertilisation du rutabaga en sol minéral. Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation du Québec (2020-2023). Fascicule 08. Présenté au ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation. 91 pages.
- Lauzon, J., G. F. Tremblay, G. Bélanger, P. Séguin, J. Lajeunesse et R. Gervais. 2019. Alfalfa and Timothy Nutritive Value in Contrasting Agroclimatic Regions. *Agronomy Journal* 111:1371–1380. <https://doi.org/10.2134/agronj2018.10.0634>.

- Lenth R. 2023. *\_emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means\_*. R package version 1.8.5, <https://CRAN.R-project.org/package=emmeans>.
- Lissbrant, S., S. Stratton, S. M. Cunningham, S. M. Brouder, et J. J. Volenec. 2009. Impact of Long-Term Phosphorus and Potassium Fertilization on Alfalfa Nutritive Value–Yield Relationships. *Crop Science* 49:1116–1124. <https://doi.org/10.2135/cropsci2008.06.0333>.
- Lloveras, J., Chocarro, C., Torres, L., Viladrich, D., Costafreda, R., et Santiveri, F. 2012. Alfalfa yield components and soil potassium depletion as affected by potassium fertilization. *Agronomy Journal*, 104(3), 729-734.
- Logan, T., Aoun, A., Bourgault, P., Dupuis, É., Huard, D., Lavoie, J., Rondeau-Genesse, G., Smith, T. J., Alegre, R., Barnes, C., Biner, S., Caron, D., Ehbrecht, C., Fyke, J., Keel, T., Labonté, M.-P., Lierhammer, L., Low, J.-F., Quinn, J., ... Whelan, C. 2023. Ouranosinc/xclim: v0.41.0 (v0.41.0). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7685495>
- Lu, X., Ji, S., Hou, C., Qu, H., Li, P., et Shen, Y. 2018. Impact of root C and N reserves on shoot regrowth of defoliated alfalfa cultivars differing in fall dormancy. *Grassland science*, 64(2), 83-90.
- Lunnan, T., Øgaard, A. F., et Krogstad, T. 2018. Potassium fertilization of timothy-based cut grassland—Effects on herbage yield, mineral composition and critical K concentration on soils with different K status. *Grass and Forage Science*, 73(2), 500-509.
- Macolino, S., L. M. Lauriault, F. Rimi et U. Ziliotto. 2013. Phosphorus and Potassium Fertilizer Effects on Alfalfa and Soil in a Non-Limited Soil. *Agronomy Journal* 105:1613–1618. <https://doi.org/10.2134/agronj2013.0054>.
- Malhi, S. S., H. Loeppky, B. Coulman, K. S. Gill, P. Curry et T. Plews. 2005. Fertilizer Nitrogen, Phosphorus, Potassium, and Sulphur Effects on Forage Yield and Quality of Timothy Hay in the Parkland Region of Saskatchewan, Canada. *Journal of Plant Nutrition* 27:1341–1360. <https://doi.org/10.1081/PLN-200025834>.
- Mathot, M., Théliier-Huché, L., et Lambert, R. 2009. Sulphur and nitrogen content as sulphur deficiency indicator for grasses. *European journal of agronomy*, 30(3), 172-176.
- Maynard, D.N.; Baker, A.V.; Minotti, P.L.; Peck, N.H. 1976. Nitrate accumulation in vegetables. *Advances in Agronomy* 28: 71-118.
- McKenney, D. W., Hutchinson, M. F., Papadopol, P., Lawrence, K., Pedlar, J., Campbell, K., Milewska, E., Hopkinson, R. F., Price, D. et Owen, T. 2011. Customized Spatial Climate Models for North America, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(12), 1611-1622.
- McMaster, G. S. et Wilhelm, W. W. 1997. Growing degree-days: one equation, two interpretations. *Agricultural and forest meteorology*, 87(4), 291-300.
- Mehlich, A. 1984. Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. *Communications in soil science and plant analysis*, 15(12), 1409-1416.
- Menon, R. G. et Chien, S. H. 1995. Soil testing for available phosphorus in soils where phosphate rock-based fertilizers are used. *Fertilizer research*, 41(3), 179-187.
- Messiga, A. J., Ziadi, N., Bélanger, G., et Morel, C. 2014. Relationship between soil phosphorus and phosphorus budget in grass sward with varying nitrogen applications. *Soil Science Society of America Journal*, 78(4), 1481-1488.
- Metz, F. et Nass, D. 2015. Fertilisation des grandes cultures, Guide technique. Chambre d’agriculture région Alsace. [en ligne] [https://grandest.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user\\_upload/National/FAL\\_commun/publications/Grand-Est/Alsace\\_fertilisation\\_grandes\\_cultures\\_guide\\_Alsace.pdf](https://grandest.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/Grand-Est/Alsace_fertilisation_grandes_cultures_guide_Alsace.pdf) (dernière consultation 1 novembre 2022)
- Ministère de l’Agriculture, de l’Alimentation et des Affaires rurales de l’Ontario (MAAARO). 2022. Guide de production fourragère. Publication 811. <https://www.ontario.ca/fr/page/guide-de-production-fourragere>. Version anglaise également consultée : <https://www.ontario.ca/page/agronomy-guide-field-crops>
- Ministère de l’Agriculture, de l’Alimentation et des Affaires rurales de l’Ontario (MAAARO). 2022. Effet du soufre sur les fourrages. [en ligne] <https://www.ontario.ca/fr/page/effet-du-soufre-sur-les-fourrages> (page consultée le 6 juillet 2023).

- Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAARO). 2023. Nitrate dans l'ensilage. [en ligne] <http://omaf.gov.on.ca/french/livestock/beef/news/vbn1119a2.htm> (page consultée le 30 août 2023).
- Munroe, J., Brown, C., Kessel, C., Verhallen, A., Lauzon, J., O'Halloran, I., Bruulsema, T. et Cowan, D. 2017. Manuel sur la fertilité du sol. *Publication 611F*, 239.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (NASEM). 2021. Nutrient Requirements of Dairy Cattle: Eight Revised Edition. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/25806> (page consultée le 6 juillet 2023).
- National Research Council (NRC). 2005. *Mineral Tolerance of Animals: Second Revised Edition, 2005*. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/11309>.
- RNC, 2020. Ressources Naturelles Canada. Modélisation du climat à l'échelle régionale, nationale et internationale. [en ligne] <https://cfs.nrcan.gc.ca/projets/3> (dernière consultation : 6 juin 2023).
- Nyfeler, D., Huguenin-Elie, O., Suter, M., Frossard, E., Connolly, J., et Lüscher, A. 2009. Strong mixture effects among four species in fertilized agricultural grassland led to persistent and consistent transgressive overyielding. *Journal of Applied Ecology*, 46(3), 683-691.
- Øgaard, A. F., T. Krogstad et T. Lunnan. 2000. Ability of some norwegian soils to supply grass with potassium. *On soil and crops*, p. 77.
- Parent, L., Dafir, M. 1992. A Theoretical Concept of Compositional Nutrient Diagnosis. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 117(2):239–242.
- Parent, G., Simard, R., Lafond, J., et Lafrenière C. 1997. Évaluation des besoins en azote (N), phosphore (P) et potassium (K) dans la production de fourrages en Abitibi-Témiscamingue. Entente auxiliaire Canada-Québec. Rapport final AE-081. 67 pages.
- Parent, L., Natale, W., Ziadi, N. 2009. Compositional nutrient diagnosis of corn using the Mahalanobis distance as nutrient imbalance index. *Canadian Journal of Soil Science*, 89(4):383–390.
- Parent, G., I. Breune et S. Durand. 2018. Est-ce que nos prairies de graminées fourragères sont sous-fertilisées en azote au Québec? Colloque sur les plantes fourragères. 22 février, Drummondville, Québec, Canada.
- Penny, A., et Widdowson, F. V. 1980. An experiment begun in 1958 measuring effects of N, P and K fertilizers on yield and N, P and K contents of grass: 2. Residual effects on arable crops, 1968–76. *The Journal of Agricultural Science*, 95(3), 583-595.
- R Core Team. 2023. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Reid, J. B., et Morton, J. D. 2019. *Nutrient management for vegetable crops in New Zealand*. Wellington: Horticulture New Zealand.
- Reinprecht, Y., Schram, L., Marsolais, F., Smith, T. H., Hill, B., & Pauls, K. P. 2020. Effects of nitrogen application on nitrogen fixation in common bean production. *Frontiers in plant science*, 11, 1172.
- Robinson, D. L. 1985. Potassium nutrition of forage grasses. *Potassium in agriculture*, 895-914.
- RStudio Team. 2019. RStudio: Integrated Development for R. RStudio, Inc., Boston, MA URL <http://www.rstudio.com/>.
- Saito A, Tanabata S, Tanabata T, Tajima S, Ueno M, Ishikawa S, Ohtake N, Sueyoshi K, Ohshima T. 2014. Effect of nitrate on nodule and root growth of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.). *International journal of molecular sciences*, 15(3), 4464-4480.
- Salvagiotti, F., Specht, J. E., Cassman, K. G., Walters, D. T., Weiss, A., & Dobermann, A. 2009. Growth and nitrogen fixation in high-yielding soybean: Impact of nitrogen fertilization. *Agronomy Journal*, 101(4), 958-970.
- SAS Institute Inc. 2013. SAS/ACCESS® 9.4 Interface to ADABAS: Reference. Cary, NC: SAS Institute Inc.
- Schipanski, M. E., Drinkwater, L. E., & Russelle, M. P. 2010. Understanding the variability in soybean nitrogen fixation across agroecosystems. *Plant and Soil*, 329, 379-397.
- Schulte, E. et Kelling, K. 1992. Soil and applied sulfur. Understanding plant nutrients: Soil and applied sulfur. University of Wisconsin-Extension Publication No. 2525.

- Sheppard, S.C., S. Bittman, and T.W. Bruulsema. 2010. *Monthly ammonia emissions from fertilizers in 12 Canadian Ecoregions*. *Can. J. Soil Sci.* 90:113–127
- Simić, A., Mandić, V., Vučković, S., Bijelić, Z., Stanisavljević, R., Štrbanović, R., et Sokolović, D. 2020. Assessment of yield, quality and nitrogen index of *Agrostietum capillaris* grassland as affected by fertilizations. *Biotechnology in Animal Husbandry*, 36(1), 101-113.
- Simons, R.G., C.A. Grant, et L.D. Bailey. 1995. Effect of fertilizer placement on yield of established alfalfa stands. *Can. J. Plant Sci.* 75:883–887.
- Soares, J.R., H. Cantarella, and M.L. de Campos Menegale. 2012. *Ammonia volatilization losses from surface-applied urea with urease and nitrification inhibitors*. *Soil Biol. Biochem.* 52:82–89
- Sullivan, D., Peachey, R., Heinrich, A. et Brewer, L. 2017. Nutrient management for sustainable vegetable cropping systems in Western Oregon. *Oregon State University Extension*, (May), EM 9165. [https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/main/%0Ahttps://catalog.extension.oregonstate.edu/sites/catalog/files/project/pdf/em9165\\_0.pdf](https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/main/%0Ahttps://catalog.extension.oregonstate.edu/sites/catalog/files/project/pdf/em9165_0.pdf)
- Talibudeen, O., Page, M. B., et Nair, P. R. 1976. The interaction of nitrogen and potassium nutrition on dry matter and nitrogen yields of the Graminae: Spring Wheat. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 27(12), 1179-1189.
- Tremblay, G. F., G. Bélanger et R. Drapeau. 2005. Nitrogen fertilizer application and developmental stage affect silage quality of timothy (*Phleum pratense* L.). *Grass and Forage Science* 60:337–355. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.2005.00483.x>.
- Tremblay, G. F., G. Bélanger, S. Pelletier, É. Charbonneau, M. Oba, D. Pellerin et G. Allard. 2008. Fourrages pour vaches en période de transition. *Agriculture et Agroalimentaire Canada*. [https://publications.gc.ca/collections/collection\\_2009/agr/A52-107-2008F.pdf](https://publications.gc.ca/collections/collection_2009/agr/A52-107-2008F.pdf) (page consultée le 5 juillet 2023).
- Vézina, L., D. Carrier, M. Giroux et M. Rompré. 2000. Proposition de regroupement des sols du Québec selon leur capacité de fixation du phosphore en relation avec leurs caractéristiques pédologiques. *Agrosol* 11 (1) : 15-39.
- Wang, P., K. Souma, H. Okamoto, S. Kin, A. Sugita, A. Furudate, C. Sato, A. Nibe, Y. M. Cai et T. Masuko. 2014. Effects of Potassium Fertilizer on Water-Soluble Carbohydrate Content of Timothy (*Phleum pratense* L.), Silage Fermentation, Nutritive Values, and Nutrient Intake. *American Journal of Plant Sciences* 5: 1030–1038. <http://dx.doi.org/10.4236/ajps.2014.57115>.
- Ward Jr, J. H. (1963). Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of the American statistical association*, 58(301), 236-244.
- Warncke, D., Dahl, J. et Zandstra, B. 2004. Nutrient Recommendations for Vegetable Crops in Michigan (E2904). *Michigan State University Extension Bulletin*, (E2934), 1-32.
- Whitehead, D. C. 2000. *Nutrient elements in grassland: soil-plant-animal relationships*. Cabi Publishing. 385 p.
- Worner, S. P. 1992. Performance of phenological models under variable temperature regimes: consequences of the Kaufmann or rate summation effect. *Environmental entomology*, 21(4), 689-699.
- Ziadi, N., M. Chantigny et G. Bélanger. 2022. Fertilisation. Chapitre 4, pages 102-132, dans : Guide de production – Plantes fourragères. 2e éd., Vol. 1. Bélanger, G. A. Claessens, M.-N. Thivierge et G. Tremblay (Éd.sc.) Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). ISBN 978-2-7649-0636-1.