



Rapport de recherche

FERTILISATION DU RADIS EN SOL ORGANIQUE

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

FASCICULE 12 :
Radis en sol organique
Version finale

Date : 17 avril 2024

Responsable scientifique : Christine Landry, agr., biologiste, 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 **progresses** 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 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

Auteurs du rapport

Auteurs principaux

Christine Landry, agr., biologiste, Ph. D., IRDA
Mandela M. Jacques, M. Sc., IRDA
Julie Forest-Drolet, M. Sc., IRDA
Simon Guillemette, M. Sc., IRDA

Collaborateurs au contenu

Fertilisation

Stéphanie Houde, agr., M. Sc., IRDA
Claude-Alla Joseph, Ph. D., IRDA

Base de données

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

Essais

Julie Mainguy, agr., IRDA
Mylène Marchand, agr., IRDA
Aurélié Demers, agr., B. Sc., IRDA
Olivier Breton-Bourgault, IRDA
Gabrielle Chevrier, 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., Jacques, M. M., Forest-Drolet, J. et Guillemette, S. (2024). Fertilisation du radis en sol organique. Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation du Québec (2020-2023). Fascicule 12. Version finale. IRDA. 58 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 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 | 10 |
| 1.1 | Provenance des données..... | 10 |
| 1.2 | Localisation des sites | 10 |
| 1.3 | Propriétés physico-chimiques des sols | 11 |
| 1.3.1 | Méthodes de calcul des teneurs en éléments extraits au Mehlich-3..... | 11 |
| 1.4 | Dispositifs expérimentaux et traitements | 12 |
| 1.4.1 | Dispositifs | 12 |
| 1.4.2 | Traitements..... | 12 |
| 1.4.3 | Répétitions additionnelles | 14 |
| 1.5 | Rendements..... | 14 |
| 1.6 | Aspects additionnels pour l'interprétation des résultats | 16 |
| 1.6.1 | Variété culturale | 16 |
| 1.6.2 | Précédent culturel | 16 |
| 1.6.3 | Date de semis | 16 |
| 1.7 | Calculs et analyses statistiques..... | 16 |
| 1.7.1 | Détermination des classes de fertilité des sols..... | 17 |
| 1.7.2 | Détermination des doses optimales de fertilisants | 18 |
| 1.7.3 | Diagnostic nutritionnel, quantités d'éléments nutritifs exportés..... | 19 |
| 1.7.4 | Analyses sur les calibres et les pertes à la récolte | 20 |
| 2 | Fertilisation azotée | 21 |
| 2.1 | Portrait et représentativité des données..... | 21 |
| 2.2 | Détermination des doses agronomiques optimales..... | 21 |
| 2.2.1 | Recherche d'indicateurs de potentiel de rendement et de fertilité du sol | 21 |
| 2.2.2 | Effet de la dose d'azote sur le rendement | 22 |
| 2.2.3 | Effet de la dose d'azote sur les calibres, la qualité et les pertes à la récolte | 24 |
| 2.2.4 | Diagnostic nutritionnel et exportations en azote | 28 |
| 2.2.5 | Nitrates à la récolte | 29 |
| 2.3 | Fertilisation azotée proposée | 30 |
| 3 | Fertilisation phosphatée..... | 33 |
| 3.1 | Portrait et représentativité des données..... | 33 |
| 3.2 | Détermination des doses agronomiques optimales..... | 33 |
| 3.2.1 | Recherche d'indicateurs de fertilité du sol | 33 |
| 3.2.2 | Effet de la dose de phosphore sur le rendement | 33 |
| 3.2.3 | Effet de la dose de phosphore sur les calibres, la qualité et les pertes à la récolte | 35 |
| 3.2.4 | Diagnostic nutritionnel et exportations en phosphore | 38 |
| 3.3 | Fertilisation phosphatée proposée..... | 40 |
| 4 | Fertilisation potassique | 42 |
| 4.1 | Portrait et représentativité des données..... | 42 |
| 4.2 | Détermination des doses agronomiques optimales..... | 42 |
| 4.2.1 | Recherche d'indicateurs de fertilité du sol | 42 |
| 4.2.2 | Effet de la dose de potassium sur le rendement | 43 |

| | | |
|-------|---|----|
| 4.2.3 | Effet de la dose de potassium sur les calibres, la qualité et les pertes à la récolte | 44 |
| 4.2.4 | Diagnostic nutritionnel et exportations..... | 49 |
| 4.3 | Fertilisation potassique proposée | 50 |
| 5 | Conclusion | 53 |
| 6 | Remerciements..... | 54 |
| 7 | Radis en sol organique – valeurs scientifiques de référence en fertilisation | 55 |
| 8 | Références | 56 |

Liste des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau 1. Description des traitements des essais de fertilisation N de radis | 13 |
| Tableau 2. Description des traitements des essais de fertilisation phosphatée de radis | 13 |
| Tableau 3. Description des traitements des essais potassiques de radis | 13 |
| Tableau 4. Statistiques descriptives des rendements de Radis des essais N, P et K..... | 14 |
| Tableau 5. Variétés culturales ayant fait l'objet des essais N, P et K de radis..... | 16 |
| Tableau 6. Description des calibres vendables de radis pour le classement à la récolte dans les essais du PSEFCM et du MIRVRF | 20 |
| Tableau 7 : Répartition des blocs des essais N de radis pour différentes classes de propriétés de sol ⁽¹⁾ | 21 |
| Tableau 8. Valeur critique de partition selon la date de semis pour l'ensemble des données des essais N de radis | 21 |
| Tableau 9 : Valeurs critiques de partition des indicateurs de sol significatifs pour les essais N de radis | 22 |
| Tableau 10. Concentrations et exportations en N de radis (sans feuille) et du feuillage selon le diagnostic nutritionnel | 28 |
| Tableau 11. Fertilisation azotée du radis en sol organique – Valeurs scientifiques de référence en fertilisation..... | 31 |
| Tableau 12. Comparaison des recommandations en N pour la production de radis au Canada et aux États-Unis..... | 31 |
| Tableau 13. Répartition des blocs des essais P de radis selon différentes classes de propriétés de sol après la validation des données..... | 33 |
| Tableau 14. Concentrations et exportations en P ₂ O ₅ de radis (sans les feuilles) et du feuillage... | 39 |
| Tableau 15. Fertilisation phosphatée du radis en sol organique – Valeurs scientifiques de référence en fertilisation. | 40 |
| Tableau 16. Comparaison des recommandations en P ₂ O ₅ pour la production de radis au Canada et aux États-Unis..... | 41 |
| Tableau 17. Répartition des blocs des essais K de radis selon différentes classes de propriétés de sol après la validation des données..... | 42 |
| Tableau 18. Valeurs critiques de jours juliens selon le test de Cate-Nelson pour les données des essais K de radis..... | 42 |
| Tableau 19. Concentrations et exportations en K ₂ O des radis (partie racinaire et feuillage) selon le diagnostic nutritionnel. | 49 |
| Tableau 20. Fertilisation potassique du radis – Valeurs scientifiques de référence en fertilisation. | 51 |
| Tableau 21. Comparaison des recommandations en K ₂ O pour la production de radis au Canada et aux États-Unis..... | 52 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure 1. Répartition géographique des sites. | 10 |
| Figure 2. Rendements moyens totaux et vendables par site en fonction des traitements de fertilisation. | 15 |
| Figure 3. Définitions des quadrants d'un test de partition binaire de Cate-Nelson (1979). | 18 |
| Figure 4. Résultats des analyses de variance sur la réponse du radis aux doses croissantes d'azote. | 23 |
| Figure 5. Proportion des calibres vendables en fonction des doses d'azote appliquées à la culture de radis en sol organique. | 24 |
| Figure 6. Proportion des calibres moyens vendables en fonction des doses d'azote appliquées à la culture de radis en sol organique. | 25 |
| Figure 7. Proportion des calibres gros vendables en fonction des doses d'azote appliquées à la culture de radis en sol organique. | 25 |
| Figure 8. Évaluation de la santé du feuillage selon les doses de N. | 26 |
| Figure 9. Pertes à la récolte (%) par rapport au rendement total en fonction des traitements de fertilisation azotée – Sans indicateur. | 27 |
| Figure 10. Répartition des exportations de N en fonction du rendement pour (A) le feuillage et (B) la racine des radis. | 29 |
| Figure 11. Nitrate résiduel à la récolte suivant une fertilisation azotée. | 30 |
| Figure 12. Résultats des analyses de variance sur la réponse du radis aux doses croissantes de phosphore. | 34 |
| Figure 13. Proportion des calibres vendables en fonction des doses de phosphore appliquées à la culture de radis en sol organique. | 35 |
| Figure 14. Proportion des calibres moyen et gros vendables en fonction des doses de phosphore appliquées à la culture de radis en sol organique. | 36 |
| Figure 15. Évaluation de la santé du feuillage selon les doses de P ₂ O ₅ | 37 |
| Figure 16. Catégories de pertes à la récolte par rapport au rendement total en fonction des traitements de fertilisation phosphatée. | 38 |
| Figure 17. Répartition des exportations en Phosphore en fonction du rendement pour (A) le feuillage et (B) la racine des radis. | 39 |
| Figure 18. Résultats des analyses de variance sur la réponse du radis aux doses croissantes de potassium. | 43 |
| Figure 19. Proportion des calibres vendables en fonction des doses de potassium appliquées à la culture de radis en sol organique. | 45 |
| Figure 20. Proportion des calibres moyens vendables en fonction des doses de potassium appliquées à la culture de radis en sol organique et la période de semis. | 45 |
| Figure 21. Proportion des calibres moyens en fonction des doses de potassium appliquées à la culture de radis en sol organique et des classes de fertilité en K _{M3} pour la période de semis 2. . | 46 |
| Figure 22. Proportion des calibres gros en fonction des doses de potassium appliquées à la culture de radis en sol organique. | 46 |
| Figure 23. Évaluation de la santé du feuillage selon les doses de K ₂ O. | 47 |
| Figure 24. Catégories de pertes à la récolte par rapport au rendement total en fonction des traitements de fertilisation potassique. | 48 |

Figure 25. Pertes à la récolte (%) par rapport au rendement total en fonction des traitements de fertilisation potassique – Sans indicateur..... 48

Figure 26. Répartition des exportations en K en fonction du rendement pour (A) le feuillage et (B) la racine des radis..... 50

1 PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES ESSAIS ET DES ANALYSES

1.1 Provenance des données

Les données utilisées pour la détermination des classes de fertilité et des nouvelles valeurs de référence en fertilisation (VSRF) NPK de la culture du radis en sol organique (SO) sont issues du *Programme de soutien aux essais de fertilisation des cultures maraîchères* (PSEFCM) et du *Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation* (MIRVRF). Un total de 16 sites expérimentaux ont été réalisés entre 2018 et 2012 dans le cadre du PSEFCM, auxquels se sont ajoutés 10 sites supplémentaires entre 2020 et 2023 dans le cadre du programme MIRVRF en vue d'améliorer la répartition des données en fonction des principales propriétés physico-chimiques des sols.

1.2 Localisation des sites

Les essais de radis en sol organique ont été réalisés exclusivement dans la région de la Montérégie (Figure 1). La répartition géographique des essais s'avère représentative des régions administratives concernées par la culture. En 2016, la quasi-totalité des hectares cultivés en radis au Québec était en Montérégie (*Statistiques Canada, 2016*). En conséquence, les résultats de la présente étude peuvent ne pas être totalement représentatifs des conditions et de la réalité agro-pédoclimatiques qui sévissent en dehors de cette région. De plus, l'utilisation de ces grilles par des conseillers et/ou producteurs qui cultivent des radis en sol minéral n'est pas suggérée.

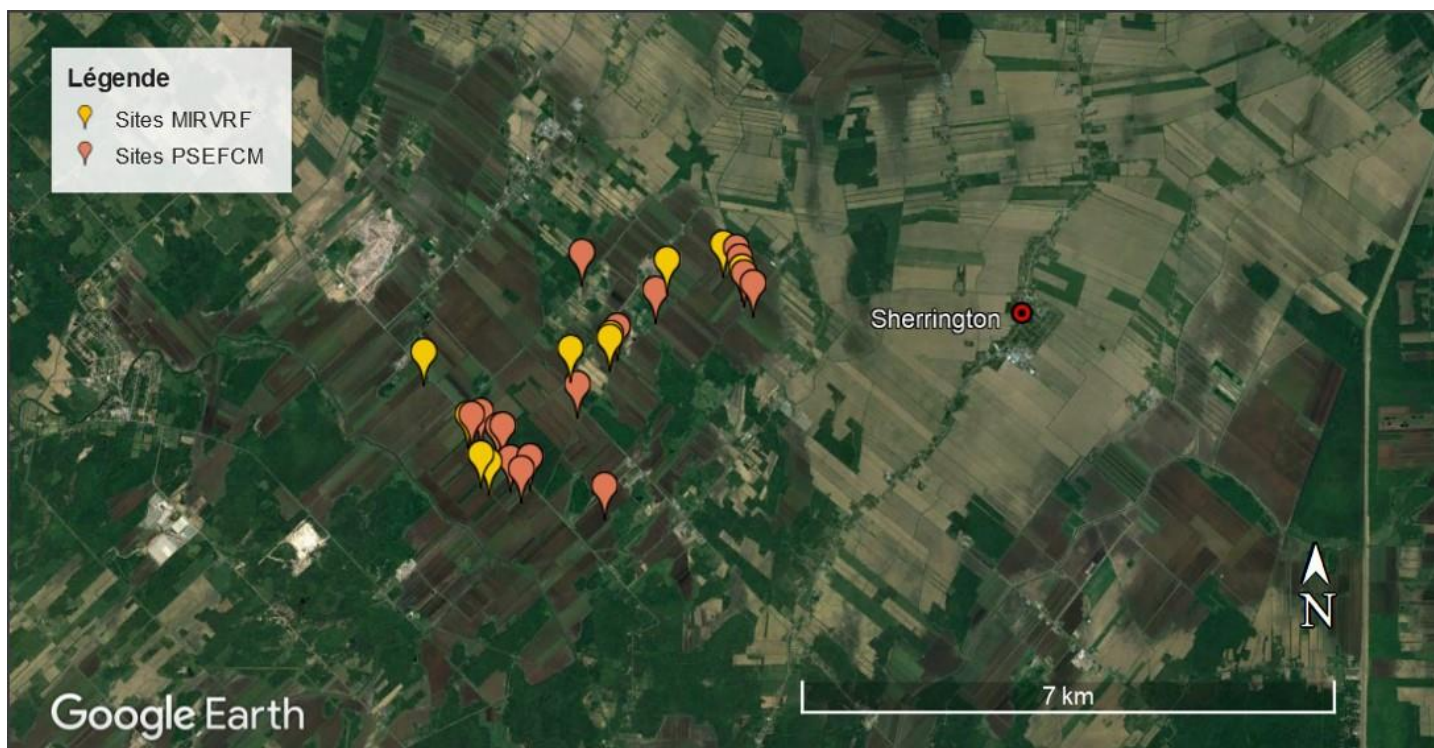


Figure 1. Répartition géographique des sites. L'emplacement des repères est approximatif et vise seulement à représenter la répartition géographique des sites sur le territoire du Québec.

1.3 Propriétés physico-chimiques des sols

Les analyses physico-chimiques du sol (0-30 cm) ont été effectuées par bloc afin de pouvoir associer les indicateurs de fertilité du sol à la courbe de réponse mesurée spécifiquement dans chaque bloc. Le pH d'une suspension d'une partie d'eau pour une partie de sol (10 cm³ de sol/10 mL d'eau) a été mesuré par une sonde à électrode de verre (Mettler Toledo, Seven compact, VWR, Mississauga, ON, CA). Les éléments nutritifs (P, K, Ca, Mg, Al, Mn, Cu, Zn, B et Fe) ont été extraits par la méthode Mehlich-3 en utilisant la masse de sol d'une cuillère de 3 cc et dosés par spectrophotométrie d'émission au plasma (Agilent 725-ES ICP OES, Agilent Technologies, Santa Clara, CA, USA). La matière organique a été mesurée par la masse perdue lors de l'incinération du sol dans un four à moufle (Thermolyne F30400, Thermo Fisher Scientific, Asheville, NC, USA) pendant un minimum de 12 heures et est présentée en pourcentage de la masse totale du sol. De plus, les contenus en C et N totaux ont été mesurés par combustion au LECO. Le rapport C/N a été calculé par division du C par N. Le N-NO₃ a été extrait au KCl 2M (Isaac et Johnson, 1976) et déterminé par colorimétrie avec un autoanalyseur Technicon. Pour chaque élément (N, P ou K) présenté dans les chapitres qui suivent, des détails supplémentaires seront apportés sur les caractéristiques physico-chimiques susceptibles d'influencer la réponse à la fertilisation de cet élément.

1.3.1 Méthodes de calcul des teneurs en éléments extraits au Mehlich-3

L'extraction Mehlich-3 nécessite un volume de sol séché et tamisé (≤ 2 mm), le plus souvent prélevé avec une cuillère de 3 ml. Puisque les sols minéraux et organiques ont des densités différentes (les sols organiques sont plus légers) (Parent et al., 1991), le poids de ce volume varie en fonction du type de sol. Ainsi, en moyenne, 3 ml de sol minéral pèse 3 g (CRAAQ 2010), tandis que 3 ml de sol organique sont normalement beaucoup plus légers, tel que le corrobore la pesée de 177 échantillons de sol organiques provenant de 26 sites du PSEFCM, indiquant une masse moyenne réelle pour 3 ml de sol de 1,203 g. La densité des sols organiques tamisés séchés est donc plutôt de 0,401 g/ml, en comparaison de 1 g/ml pour les sols minéraux. Il est donc important, en cas de non-pesée de la cuillère, d'utiliser lors des calculs la densité moyenne spécifique au type de sols analysés. Dans le cas où la masse des sols minéraux (3 g) est employée pour des sols organiques, les concentrations obtenues en ppm sont alors fortement sous-estimées puisque la quantité d'un élément dosé est extraite à partir d'une masse de sols beaucoup plus petite que ce qui est supposé.

De même, les différences de densité au champ des deux types de sols doivent être considérées afin de convertir les ppm en kg/ha. Pour les sols minéraux du Québec, une MVA au champ de 1,32 g/ml et une épaisseur de sol de 17 cm sont généralement utilisées, menant à un facteur de conversion de 2,24 (voir le *Guide de référence en fertilisation* à la p. 48, pour plus de détails sur le calcul; CRAAQ, 2010). Ces constantes sont cependant non adaptées aux sols organiques, lesquels sont plus légers et plus profonds. Afin de convertir les ppm K_{M3} provenant de sol organique en kg/ha, l'utilisation d'une MVA au champ de 0,28 g/cm³ (Parent et al., 1991) et une profondeur de sol de 30 cm est plutôt suggéré, ce qui correspond à un facteur de conversion de 0,84 et non de 2,24 (Khiari et al., 2017). Sur cet aspect également, les mesures effectuées sur 495 échantillons provenant de 138 sites d'essais du PSEFCM ont permis de confirmer une MVA moyenne de 0,30 g/cm³, très similaire à celle de 0,28 g/cm³, confirmant qu'un facteur de 0,84 est plus adéquat que le facteur de 2,24.

Les explications précédentes sont importantes pour le bon usage des nouvelles VSRF potassiques de l'oignon en sols organiques puisque celles-ci sont élaborées sur des teneurs en K du sol extrait par la méthode Mehlich-3 selon un volume (cuillère de 3 ml) de sol **pesé** (ppm massique (mg K_{M3} /kg sol)) et utilisant donc dans les calculs des valeurs de MVA propres aux sols organiques. Dans les cas où des résultats d'analyses de sols seraient produits en utilisant une valeur théorique de 1 g/ml, associée aux sols minéraux, ceux-ci ne peuvent être utilisés directement dans le tableau des nouvelles VSRF. Au vu des différences méthodologiques, une conversion doit être faite. Celle-ci est double si les résultats sont fournis en kg/ha en utilisant la MVA de 1 g/ml et le facteur 2,24 des sols minéraux. Ce double facteur de conversion à employer pour la correction des résultats est de 1,11 (division par 2,24 pour passer de kg/ha à ppm, suivi d'une division par 0,401 afin de considérer la densité moyenne du sol dans la cuillère). Par exemple, un résultat d'analyse Mehlich-3 qui affiche **400 kg/ha** obtenu sur un volume de sol non pesé (avec convention 1 g/ml) et utilisant un facteur de conversion de ppm vers kg/ha de 2,24 devient **444 ppm** une fois corrigé (400 kg/ha divisé par 2,24 qui donne tout d'abord 178 ppm par la suite divisés

par 0,401 g/cm³ de densité de sol). La teneur corrigée de 444 ppm est celle à laquelle se référer pour l'utilisation des nouvelles VSRF K (Tableau 20). À noter qu'une valeur obtenue en ppm à partir d'une analyse avec cuillère non pesée doit seulement être divisée par 0,401 afin d'obtenir une valeur à laquelle se référer dans les tableaux de VSRF du présent fascicule.

1.4 Dispositifs expérimentaux et traitements

1.4.1 Dispositifs

Les essais de radis en sol organique ont été menés en plein champ chez des producteurs agricoles et ont été entretenus selon une régie de production conventionnelle. Dans la majorité des essais, les traitements (doses d'engrais testées) étaient disposés selon un plan en 3 ou en 5 blocs complètement aléatoires, selon l'année de réalisation de l'essai. Dans le PSEFCM (2008-2012), les traitements testés étaient disposés selon un plan en tiroirs (*split-plot*) comportant trois blocs complètement aléatoires. Chaque bloc du dispositif était constitué de trois parcelles principales représentant chacune un élément nutritif (N, P et K) à l'essai, à l'intérieur desquelles se trouvaient quatre sous-parcelles où les doses de N, de P ou de K étaient testées. Les parcelles constituant les unités expérimentales mesuraient de 6 à 8 m de longueur et de 1,5 à 3,2 m de largeur. Les semis ont eu lieu de la fin avril à début août, et la durée moyenne des essais a été de 27 jours.

1.4.2 Traitements

Contrairement aux essais N pour lesquels les doses testées n'étaient pas ajustées selon des critères de sol (Tableau 1), les doses croissantes de P et K ont été choisies en fonction de la classe de fertilité du sol pour l'élément testé (Tableau 2; Tableau 3). La classe de fertilité était déterminée selon que la teneur en P_{M3} ou en K_{M3} du site se situait de part ou d'autre d'un seuil préétabli. Des doses plus élevées de K₂O ou de P₂O₅ ont donc été testées dans les sols dits « à faibles teneurs » que dans les sols dits à « fortes teneurs ». Cependant, dans le cadre du PSEFCM, le choix des sites était fait sur la base des analyses de sol à l'échelle de tout le champ (informations tirées des plans agroenvironnementaux de fertilisation des producteurs) et les teneurs en K_{M3} et P_{M3} des aires d'essais n'étaient validées qu'après l'implantation de ceux-ci, c'est-à-dire pendant la caractérisation des sites. Par conséquent, certains sites se sont retrouvés mal classés et n'ont pas reçu les doses prévues au protocole. En cas de mauvais classement dans les sols à faibles teneurs, même les niveaux de traitement les plus élevés pourraient être insuffisants pour l'atteinte d'un plateau de production. Au contraire, dans les sols à fortes teneurs mal classés, le plateau de production pourrait être atteint dès l'application du plus faible niveau de traitement. Toutefois, les problèmes de mauvais classement n'ont affecté qu'environ 30 % des essais et des méthodes d'analyses adaptées ont permis de réduire l'influence de cette problématique. Enfin, pour tous les essais, seul l'élément testé variait, les autres éléments nutritifs majeurs étant fixés au troisième niveau de traitement de chaque élément afin qu'ils ne soient pas limitants.

1.4.2.1 Doses d'azote

Les doses de N testées ont varié de 0 à 60 kg/ha de 2008 à 2009, de 0 à 90 kg/ha de 2010 à 2012 et de 0 à 120 kg/ha de 2020 à 2022. Les doses, ainsi que les modes et les périodes d'applications sont présentés au Tableau 1. Les doses ont été apportées sous forme de nitrate d'ammonium calcique (CAN, 27-0-0) et/ou de phosphate monoammoniacal (MAP, 11-52-0).

Tableau 1. Description des traitements des essais de fertilisation N de radis

| Essais N | | | | Doses de N (kg/ha) | | | | |
|-----------------------|------------------------------|-------------------------------|----|--------------------|----|----|-----|--|
| Chercheur (Année) | Nombre de sites ¹ | Mode et période d'application | T0 | T1 | T2 | T3 | T4 | |
| PSEFCM (2008-2009) | 8 | À la volée avant le semis | | 0 | 20 | 40 | 60 | |
| | | Apport total | | 0 | 20 | 40 | 60 | |
| PSEFCM (2010-2012) | 6 | À la volée avant le semis | | 0 | 30 | 60 | 90 | |
| | | Apport total | | 0 | 30 | 60 | 90 | |
| MIRVF (2020-2022) | 10 | À la volée avant le semis | 0 | 30 | 60 | 90 | 120 | |
| | | Apport total | 0 | 30 | 60 | 90 | 120 | |

1.4.2.2 Doses de phosphore

Les doses de P testées ont varié de 0 à 90 kg/ha ou de 0 à 150 kg/ha selon la richesse du sol en phosphore. Les doses, ainsi que les modes et les périodes d'applications sont présentés au *Tableau 2*. Les doses ont été apportées sous forme de phosphate monoammoniacal (MAP, 11-52-0) ou de superphosphate triple (TSP, 0-46-0).

Tableau 2. Description des traitements des essais de fertilisation phosphatée de radis

| Essais P | | | | | Doses de P ₂ O ₅ (kg/ha) | | | | |
|-----------------------|------------------------------|----------|-------------------------|-------------------------------|--|----|-----|-----|-----|
| Chercheur (Année) | Nombre de sites ¹ | ISP3 (%) | P _{M3} (kg/ha) | Mode et période d'application | T5 | T6 | T7 | T8 | T9 |
| PSEFCM (2008-2012) | 12 | | ≤ 200 | À la volée avant le semis | 0 | 50 | 100 | 150 | |
| | | | | Apport total | 0 | 50 | 100 | 150 | |
| | 1 | | > 200 | À la volée avant le semis | 0 | 30 | 60 | 90 | |
| | | | | Apport total | 0 | 30 | 60 | 90 | |
| MIRVRF (2020-2022) | 7 | ≤ 5 | | À la volée avant le semis | 0 | 25 | 50 | 100 | 150 |
| | | | | Apport total | 0 | 25 | 50 | 100 | 150 |
| | 2 | > 5 | | À la volée avant le semis | 0 | 15 | 30 | 60 | 90 |
| | | | | Apport total | 0 | 15 | 30 | 60 | 90 |

1.4.2.3 Doses de potassium

Les doses de K testées ont varié de 0 à 90 kg/ha ou 0 à 150 kg/ha selon la richesse du sol en potassium. Les doses, ainsi que les modes et les périodes d'applications sont présentés au *Tableau 3*. Pour la grille K, la dose de 15 kg K₂O, appliquée à un seul site, n'a pas été considérée dans les analyses. Les doses ont été apportées sous forme de muriate de potassium (0-0-60).

Tableau 3. Description des traitements des essais potassiques de radis

| Essais K | | | | Doses de K ₂ O (kg/ha) | | | | | |
|-----------------------|------------------------------|-------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| Chercheur (Année) | Nombre de sites ¹ | P _{M3} (kg/ha) | Mode et période d'application | T9 | T10 | T11 | T12 | T13 | T14 |
| PSEFCM (2008-2012) | 12 | ≤ 400 | À la volée avant le semis | 0 | 50 | 100 | 150 | | |
| | | | Apport total | 0 | 50 | 100 | 150 | | |
| | 1 | > 400 | À la volée avant le semis | 0 | 30 | 60 | 90 | | |
| | | | Apport total | 0 | 30 | 60 | 90 | | |
| MIRVRF (2020-2022) | 8 | ≤ 400 | À la volée avant le semis | | 0 | 25 | 50 | 100 | 150 |
| | | | Apport total | | 0 | 25 | 50 | 100 | 150 |
| | 1 | > 400 | À la volée avant le semis | | 0 | 15 | 30 | 60 | 90 |
| | | | Apport total | | 0 | 15 | 30 | 60 | 90 |

Note : La dose de 15 kg K₂O, appliquée à un seul site, n'a pas été considérée dans les analyses par groupe de doses.

1.4.3 Répétitions additionnelles

Dans le PSEFCM, puisque les essais N, P et K étaient organisés en tiroirs (*split plot*) sur un même site et que les éléments fertilisants complémentaires à celui testé (ex.: P et K dans l'essai N) correspondaient à la 3^e dose de leurs essais respectifs, les parcelles testant le 3^e niveau de dose présentaient la même formulation N-P-K dans tous les essais. Ainsi, les parcelles ayant reçu les traitements T3, T7 et T11 dans les essais N, P et K ont reçu exactement les mêmes doses de fertilisants en N, P et K dans chacun des essais d'un même site. Ces observations ont pu être valorisées à plusieurs reprises en augmentant le nombre d'observations du jeu de données de chaque essai, ce qui a permis d'améliorer la performance des analyses statistiques. À titre d'exemple, les parcelles ayant reçu le traitement T3 dans l'essai N et T7 dans l'essai P ont été utilisées comme répétitions additionnelles dans l'essai K du même site.

1.5 Rendements

Les statistiques descriptives des rendements totaux, des rendements vendables et des pourcentages de pertes à la récolte sont présentées au Tableau 4. Les rendements moyens (totaux ou vendables) sont similaires entre essais. Dans les essais N, seulement deux sites n'ont pas obtenu un rendement vendable moyen dans la plage de rendement de référence moyen de la culture. Dans les essais P et K, un seul site n'atteint pas ce seuil tandis que deux et trois sites ont respectivement dépassé cette valeur moyenne de référence maximale. Quatre sites par essai ont obtenu des rendements particulièrement bas, n'atteignant pas le rendement de référence minimale à travers les années (5 sites distincts) (Tableau 4).

Les pertes à la récolte, c.-à-d. la différence entre les rendements totaux et les rendements vendables, ont été en moyenne de 17 à 21 % (Tableau 4). Des variations inter-sites considérables ont été observées. Par exemple pour l'essai N, cinq sites ont connu des pertes moyennes supérieures à 30 % et des pertes allant jusqu'à 100 % ont été observées dans certaines parcelles témoins. Dans les essais P et K, seuls trois sites ont des pertes moyennes supérieures à 30 % et aucune parcelle n'a été totalement déclassée au moment de la récolte.

Les causes de déclassement à la récolte ont été diverses. Plus de 12 % de pertes sont causés par des maladies (jusqu'à 16 % dans l'essai K), environ 10 % sont dû aux causes « autres », et dans une moindre mesure, les pertes sont causées par des calibres trop petits (3-8 %) ou des déformations (1-2%).

Tableau 4. Statistiques descriptives des rendements de Radis des essais N, P et K.

| Essai | | N | Moyenne | Écart-type | Minimum | Maximum |
|-------|----------------------------|-----|---------|------------|---------|---------|
| N | Rendement total (kg/ha) | 335 | 13 915 | 5 734 | 111 | 29 725 |
| | Rendement vendable (kg/ha) | 244 | 11 443 | 4 897 | 0 | 25 980 |
| | Pertes (%) | 227 | 22 | 18 | 1 | 100 |
| P | Rendement total (kg/ha) | 337 | 14 910 | 4 635 | 4 754 | 30 437 |
| | Rendement vendable (kg/ha) | 248 | 12 281 | 4 945 | 2 052 | 26 885 |
| | Pertes (%) | 231 | 22 | 18 | 0 | 71 |
| K | Rendement total (kg/ha) | 328 | 16 280 | 5 913 | 3 639 | 35 410 |
| | Rendement vendable (kg/ha) | 261 | 13 762 | 5 196 | 2 777 | 32 350 |
| | Pertes (%) | 233 | 19 | 17 | 0 | 73 |

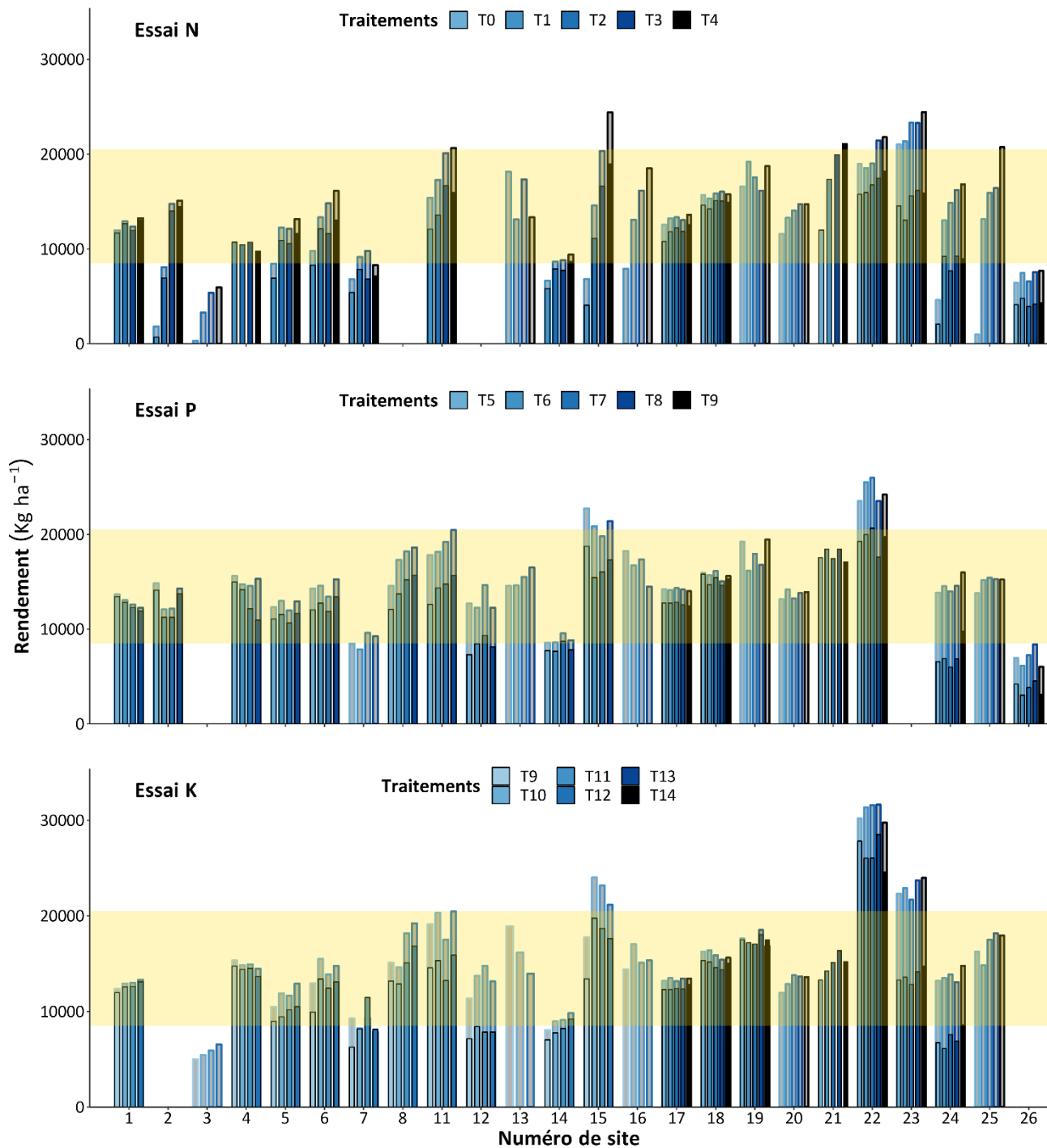


Figure 2. Rendements moyens totaux et vendables par site en fonction des traitements de fertilisation. Légende : Les traitements de fertilisation sont les doses croissantes d’engrais de l’élément à l’essai (voir section 1.4.2). La superposition des sections grisées et colorées des barres représente le rendement total, la partie colorée le rendement vendable. La plage de rendement de référence moyenne de la culture est présentée par le rectangle jaune (allant du rendement de référence minimal à maximal).

1.6 Aspects additionnels pour l'interprétation des résultats

1.6.1 Variété culturale

Dans le cadre des essais, 4 variétés différentes ont été utilisées et l'information a été manquante pour 30 % des observations (Tableau 5). La variété 'Red satin' était celle la plus utilisée et représentait au moins 40 % du jeu de donnée pour chaque essai considéré. Les autres variétés comptaient pour 12 % et moins du jeu de données chacune.

Tableau 5. Variétés culturales ayant fait l'objet des essais N, P et K de radis

| Variété | Proportion des essais sur lesquels était testée chaque variété (%) | | | Rendement total moyen (kg/ha) | | |
|--------------|--|----------|----------|-------------------------------|----------|----------|
| | Essais N | Essais P | Essais K | Essais N | Essais P | Essais K |
| Cherriette | 7 | 9 | 12 | 11 668 | 13 898 | 13 630 |
| Escala | 4 | 5 | 11 | 12 326 | 12 497 | 15 623 |
| Melito | 9 | - | 10 | 15 469 | 17 816 | 14 280 |
| Red satin | 47 | 58 | 40 | 9 710 | 10 586 | 13 292 |
| Manquant | 33 | 28 | 27 | 12 113 | 13 221 | 13 325 |
| Total | 100 | 100 | 100 | | | |

1.6.2 Précédent cultural

Les essais de radis suivaient majoritairement une culture de radis (38%), d'oignons de type inconnu (21 %), d'oignons secs (8 %), et dans une moindre mesure, une combinaison de radis et de fines herbes, de pomme de terre, de carotte, de laitue ou d'oignon vert. Le précédent cultural était inconnu dans 13 % des sites. L'absence de répétitions pour certains précédents culturaux n'a pas permis de tirer des conclusions fiables concernant leurs effets sur la réponse de la culture à la fertilisation.

1.6.3 Date de semis

Tel que brièvement mentionné à la section 1.4.1, les dates de semis ont été très variables. S'échelonnant sur plus de 3 mois pour une culture ayant un cycle cultural de 26 jours en moyenne, la variabilité des moments de semis en interactions avec les conditions climatiques pourrait avoir d'importants effets sur la réponse à la fertilisation.

1.7 Calculs et analyses statistiques

Hormis les cultures de prairies en production (Landry et al., 2023), la méthodologie générale employée pour le calcul des VSRF et les analyses statistiques préconisées sont similaires pour toutes les cultures maraichères révisées dans le cadre du MIRVRF (Landry et al., 2020 à 2023). Lorsque des ajustements spécifiques à une culture ont été requis, ceux-ci sont décrits dans la présente section ou directement dans les chapitres des éléments (N, P ou K) requérant ces ajustements. En complément des calculs et analyses, 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). Dans les cas où les essais ont été conduits différemment des pratiques en vigueur, ces différences sont mises en évidence dans les notes de bas de tableau et dans les éléments de réflexion amenés par l'IRDA.

1.7.1 Détermination des classes de fertilité des sols

La détermination des classes de fertilité des sols est effectuée en se basant sur la partition binaire de Cate- Nelson (Cate et Nelson, 1971; IRDA, 2020a). Ce test de partition 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}). Le RRel est calculé par bloc, en divisant le rendement vendable du témoin ($\text{Rendement}_{\text{Témoin}}$) par le rendement vendable maximal ($\text{Rendement}_{\text{Maximal}}$) parmi tous les traitements du bloc, incluant le témoin (Éq. 1). Dans le cas où une unité expérimentale est écartée à l'analyse exploratoire, le rendement maximal du bloc concerné est considéré impossible à déterminer et aucun RRel n'est déterminé.

$$RRel (\%) = \frac{\text{Rendement}_{\text{Témoin}}}{\text{Rendement}_{\text{Maximal}}} \quad (\text{Éq. 1})$$

Un RRel inférieur à 100 % indique une réponse positive de la culture à la fertilisation. À l'opposé, si le rendement maximal est atteint dans la parcelle témoin, le RRel est égal à 100 %, indiquant que le potentiel de rendement de la culture a été atteint sans l'apport du fertilisant testé. La considération des rendements sur une base relative permet, entre autres, d'atténuer les effets de sites et des conditions météorologiques annuelles sur la productivité.

Le nuage de points obtenu avec les RRel de tous les blocs de tous les essais est ensuite analysé avec la procédure de partition Cate-Nelson. Celle-ci vise à établir un seuil de l'indicateur de fertilité de sol testé à partir duquel la culture ne répond plus à la fertilisation. Le nuage de points se retrouve ainsi divisé en quatre quadrants selon un axe vertical correspondant à la valeur critique de l'indicateur de fertilité du sol, et un axe horizontal correspondant au rendement relatif optimal de la partition. Ces axes sont placés de façon à maximiser le nombre de points dans les quadrants des vrais négatifs et positifs, tout en minimisant ceux dans les quadrants des faux négatifs et positifs (Figure 3).

Le rendement relatif optimal de la partition correspond théoriquement à un rendement relatif de 90 à 95 % lorsque des courbes de réponse à la fertilisation sont utilisées (Black, 1993). Toutefois, dans le cas de l'utilisation de la méthode par quadrant, comme dans le cas dans la présente étude, ce seuil est généralement attribué à un rendement relatif autour de 80 % (Black, 1993; Cate et Nelson, 1971; Nelson et Anderson, 1977; Pellerin et al., 2006). Néanmoins, dans le cas de certains essais de fertilisation, ce seuil peut également être inférieur à cette valeur. Par exemple, au Québec, Pellerin et al. (2006) rapporte un seuil optimal de rendement relatif aussi faible que 50 %.

La valeur critique agronomique de l'indicateur de fertilité du sol permet de distinguer les sols qui répondent à la fertilisation de ceux qui ne répondent pas. Lorsque nécessaire, cette valeur critique peut être divisée ou multipliée par deux ou par quatre, selon la procédure de Cope et Rouse (1973), afin de délimiter plusieurs classes de fertilité des sols. Lorsque possible, la procédure de Cate-Nelson peut également être utilisée pour déterminer des seuils secondaires permettant de diviser en sous-catégories les sols répondant à la fertilisation.

Afin de s'assurer de la performance des seuils déterminés avec le test de Cate-Nelson, les valeurs du P de Fisher des partitions ainsi que les mesures de précision, sensibilité et spécificité sont calculées et maximisées (S.-E. Parent et al., 2013) :

Sensitivité : Probabilité pour qu'une réponse de la culture à la fertilisation soit correctement diagnostiquée dans un sol ayant une caractérisation située en dessous du seuil critique considéré. Ce critère est calculé à partir des nombres d'observations des quadrants suivants (Figure 3) : $VP/(VP+FN)$.

Spécificité : Probabilité pour qu'une non-réponse de la culture à la fertilisation (plateau de l'augmentation des rendements) soit correctement diagnostiquée dans un sol ayant une caractérisation située au-dessus du seuil critique considéré. Ce critère est calculé à partir des nombres d'observations des quadrants suivants (Figure 3) : $VN/(VN+FP)$.

Précision : Probabilité pour que la réponse ou la non-réponse de la culture à la fertilisation soit correctement diagnostiquée pour une analyse de sol donnée. Elle est calculée à partir des nombres d'observations des quadrants suivants (Figure 3) : $(VN+VP)/(VN+FN+VP+FP)$.

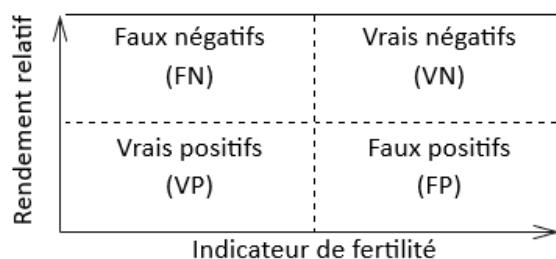


Figure 3. Définitions des quadrants d'un test de partition binaire de Cate-Nelson (1979).

1.7.2 Détermination des doses optimales de fertilisants

Les doses optimales de fertilisants pour chaque classe de fertilité de sol sont calculées par analyses de variances (ANOVA). Ainsi, les ANOVA sont effectuées séparément pour les sols se trouvant de part et d'autre des seuils agronomiques de réponse déterminés avec la procédure expliquée précédemment à la section 1.7.1.

L'effet de l'apport des doses croissantes de fertilisants est étudié en tenant compte du rapport de rendements (ROM, Éq. 2). L'utilisation du ROM 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. De plus, comme pour le rendement relatif, l'utilisation du ROM permet 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. 2) :

$$ROM = \frac{\text{Rendement}_{\text{Fertilisé}}}{\text{Rendement}_{\text{Témoin}}} \quad (\text{Éq. 2})$$

Les logarithmes naturels des rapports de rendements (\log_ROM) ont été utilisés dans l'ANOVA afin de pallier les problèmes d'hétérogénéité de la variance. La réponse du radis à la fertilisation azotée est remarquablement forte. À des doses nulles de N, les rendements vendables pour plusieurs sites sont nuls ou très faibles. Ce qui aboutit, lorsque les rendements vendables sont utilisés, à des valeurs de ROM inexistantes ou excessivement élevées, lesquelles valeurs extrêmes influencent la normalité de la distribution des données. Afin de maintenir l'emploi du ROM dans les calculs, diverses alternatives ont été considérées, telles que l'inclusion des radis de petits calibres dans le calcul du rendement vendable, l'ajout d'une constante équivalente à la plus petite valeur de rendement non nulle dans les essais N, l'étude de la réponse sur le rendement vendable absolu (plutôt qu'en rendement relatif), ou la considération du rendement total pour l'étude de la réponse de la culture. La dernière alternative a été retenue puisque les résultats étaient les plus cohérents et simples d'interprétation et que les données sur l'effet de la fertilisation sur le calibre et la qualité des radis permettent, lorsque requis, d'ajuster les doses selon ces critères qui déterminent le rendement vendable. Ainsi, dans un premier temps, la réponse du radis a été étudiée en considérant le rendement total, puis dans un deuxième temps, les VSRF ont été modulées en fonction des différentes analyses supplémentaires, lorsque requis, dont les résultats de l'effet des apports de N sur les pertes à la récolte.

Les analyses de variances ont été effectuées en utilisant la procédure *mixed* de SAS® (SAS Institute Inc., 2013) et en considérant les blocs et les sites comme des effets aléatoires. Lorsque l'ANOVA indique un effet significatif ($P < 0,05$) ou une tendance ($P < 0,12$) à un effet de la dose sur le ROM, des tests de Student (test *t*) sont réalisés afin de faire les comparaisons multiples des moyennes des traitements permettant de déterminer les doses agronomiques optimales menant aux meilleurs rendements. Il est important de souligner qu'en raison de la considération des rendements sur une base relative (ROM), le test de Student permet de faire une comparaison multiple des moyennes des traitements entre elles sans tenir compte de l'effet de la fertilisation par rapport au témoin. Ainsi, l'absence de différence significative entre les traitements ne traduit pas nécessairement une absence de différence par rapport au témoin. Le calcul des intervalles

de confiance à 90 % permet de déterminer si l'augmentation de rendement obtenue pour un traitement donné est numériquement différente en comparaison au témoin.

Puisque les doses testées dans les divers essais varient en fonction des années, les doses similaires ont dû être regroupées afin d'équilibrer les jeux de données et d'augmenter la puissance de l'ANOVA. Ainsi, les groupes de doses ont été considérés comme des variables catégoriques plutôt que numériques continues dans le modèle statistique. Les groupes de doses sont exprimés sous cette forme dans le présent document : 1-30-60. Dans ce cas, par exemple, il s'agit du 1^{er} groupe de doses testées (1-30-60) et les doses qui le composent vont de 30 à 60 kg/ha de l'élément testé (1-30-60). La VSRF proposée pour une catégorie de sol donnée est la médiane des doses testées à l'intérieur du groupe de doses optimal.

1.7.3 Diagnostic nutritionnel, quantités d'éléments nutritifs exportés

Le taux d'humidité, la concentration en éléments nutritifs (majeurs et mineurs) dans les tissus et les exportations en N, P₂O₅ et K₂O ont été calculés en considérant exclusivement la biomasse qui quitte le champ à la récolte. Le diagnostic nutritionnel a donc été effectué sur la base de la teneur en éléments nutritifs à la fois dans le feuillage et dans la racine des radis. Cette considération tient compte du fait qu'en contexte de production commerciale au Québec, une grande partie de la production de radis est destinée à la consommation au frais et est distribuée en bottes incluant les feuilles. Par conséquent, le feuillage et les racines de radis quittent la ferme à la récolte.

Les calculs ont été effectués 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. Les individus présentant de mauvais rendements, de même que ceux carencés ou en excès (prélèvement de luxe) pour certains éléments, ont donc été écartés du calcul.

Par définition, l'état d'équilibre nutritionnel est atteint si l'interaction est positive entre la productivité de la plante et les différents éléments nutritifs favorisant sa croissance (Brown, 1945). 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.* (2001b) et Parent *et al.* (2009). Selon le CND, la composition des tissus de la plante constitue un simplexe complet Sⁿ, de dimension n+1, soit un nombre d'éléments nutritifs *n* additionné d'une valeur de remplissage (Khiari *et al.*, 2001b). Ce principe considère que tout changement de la concentration d'un élément va affecter simultanément celle des autres à l'intérieur du système. Ainsi, à l'optimum, les éléments nutritifs dans la plante agissent en synergie (Khiari *et al.*, 2001a; L. Parent et Dafir, 1992). Les éléments considérés dans la détermination du statut d'équilibre nutritionnel sont le N, le P, le K, le Ca et le Mg.

La méthode utilisée dans le cadre du calcul des VSRF se base sur celle de Parent *et al.* (2009). Toutefois, afin d'améliorer la robustesse du calcul, ces éléments ont été modifiés par l'équipe IRDA (cndMethodRobustIrd ; IRDA, 2020b):

- 1- La méthode de sélection de la population de référence : Cette population est déterminée *a priori* (De Bauw *et al.*, 2016) en sélectionnant le quart supérieur (25 %) des rendements triés en ordre décroissant. Ce sous-groupe dit à haut rendement servira à la détermination numérique, en plusieurs dimensions, de l'équilibre en N, P, K, Ca et Mg (c.-à-d. la norme, voir l'étape 2).
- 2- La méthode de calcul de la norme : Des estimateurs MCD (*Minimum Covariance Determinant*) ont servi à évaluer la norme. Ces estimateurs correspondent à la moyenne (μ_{MCD}) et à la covariance (Σ_{MCD}) d'un sous-ensemble optimal de points (Hubert et Debruyne, 2010). L'utilisation des MCD permet, entre autres, l'obtention d'une composition équilibrée par l'exclusion des individus en déséquilibre nutritif.

Le calcul des exportations fournit de nouvelles valeurs scientifiques liées à la nutrition de radis cultivé en sol organique. 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 de cette présente étude, les valeurs d'exportations ont pu être utilisées en absence de données en quantité suffisante pour établir des recommandations, particulièrement dans les classes de sol les plus pauvres.

1.7.4 Analyses sur les calibres et les pertes à la récolte.

Des analyses complémentaires ont été effectuées afin d'évaluer l'effet des traitements de fertilisation sur les calibres des radis à la récolte et sur les pourcentages de pertes à la récolte. De plus, la santé du feuillage a été évaluée dans le cadre des essais de fertilisation du radis, puisque la qualité du feuillage favorise la commercialisation en bottes. Ces données de nature catégorielle (indices de 1 à 5; 1 – Feuillage vert et sain; 2 – Feuillage avec un léger pâlissement; 3 – Feuillage avec pâlissement et légère chlorose à la marge; 4 – Feuillage avec léger jaunissement et marges chlorosées; 5 – Feuillage avec jaunissement généralisé et marges nécrosées) ont été analysées au moyen d'un test exact de Fisher et d'un modèle linéaire mixte généralisé pour variable multinomiale. L'effet de la fertilisation sur les calibres a été mesuré par des analyses de fréquences et un test du Khi-2. À cette fin, les radis ont été classés selon les critères présentés au Tableau 6.

Tableau 6. Description des calibres vendables de radis pour le classement à la récolte dans les essais du PSEFCM et du MIRVRF

| Calibre vendable | Diamètre (mm) |
|------------------|-----------------|
| Moyen | > 22,2 à ≤ 31,8 |
| Gros | > 31,8 à ≤ 38,1 |
| Jumbo | > 38,1 |

Les causes de déclasserment à la récolte étaient: diamètre trop petit (inférieur à 22,2 mm), présence de maladie, ou déformations majeures (ou éclatement). Dans le MIRVRF une catégorie « Autre cause de rejet » a été ajoutée.

2 FERTILISATION AZOTÉE

2.1 Portrait et représentativité des données

La répartition des blocs des essais N, selon différentes classes de propriétés de sol (0-30 cm), est présentée au Tableau 7. Tous les sites sont caractérisés par un fort pourcentage de matière organique à l'exception d'un site pour lequel la teneur en MO minimale était de 61,75 %. Globalement, seulement 3 % des blocs ont une teneur en MO < 70 % et des valeurs médiane et maximale de 85 % et 92 % respectivement ont été mesurés. Les sols ont accusé un léger niveau d'acidité avec des pH variant de 4,82 à 6,5. En termes de proportion, 30 % des blocs avaient un pH inférieur ou égal à 5,5 %. De tels niveaux de pH pourraient limiter l'activité des microorganismes du sol et la minéralisation de la matière organique. Toutefois, la représentativité des données n'a pas été affectée puisque plus de la moitié des données se trouve dans la plage de pH adéquate de 5,6 à 6,5 pour le radis. Les teneurs en nitrates ont varié entre 2,49 ppm à 142 ppm avec une bonne répartition des valeurs jusqu'à 100 ppm. Près d'un quart du jeu de données avait une teneur en nitrate relativement faible. Pour ce qui est de l'azote total, les données ont été bien réparties à travers les différentes classes considérées. De plus, les rapports C/N ont varié entre 18 à 32 avec environ 90 % des blocs sous le seuil de 29 indiquant une bonne capacité de minéralisation des sols (Puustjärvi, 1970). En se basant sur ces principaux paramètres physico-chimiques, les sites ont été bien choisis et les données validées devraient permettre d'étudier de manière adéquate la réponse des radis à la fertilisation azotée.

Tableau 7 : Répartition des blocs des essais N de radis pour différentes classes de propriétés de sol⁽¹⁾

| pH _{eau} ⁽²⁾ | Blocs (%) | MO _{PAF} (%) ⁽³⁾ | Blocs (%) | N-NO ₃ (ppm) ⁽⁴⁾ | Blocs (%) | N total (%) ⁽⁵⁾ | Blocs (%) | Ratio C/N | Blocs (%) |
|----------------------------------|-----------|--------------------------------------|-----------|--|-----------|----------------------------|-----------|-----------|-----------|
| ≤ 5,5 | 30 | ≤ 70 | 3 | ≤ 25 | 22 | ≤ 1,25 | 5 | ≤ 20 | 9 |
| 5,5 – 6,0 | 53 | 70- 80 | 18 | 25 – 50 | 38 | 1,25 – 1,5 | 17 | 20– 25 | 54 |
| 6,0 – 6,5 | 16 | 80- 90 | 71 | 50- 100 | 36 | 1,5-1,75 | 30 | 25- 30 | 27 |
| 6,5 – 7,0 | 1 | > 90 | 8 | 100- 150 | 4 | 1,75- 2 | 25 | > 30 | 10 |
| > 7,0 | 0 | - | - | > 150 | 0 | > 2 | 23 | - | - |

⁽¹⁾ Le cumul de certains résultats peut ne pas totaliser 100 % en raison des arrondis.

⁽²⁾ Le pH optimal est de 5,6 pour les radis en sol organique (CRAAQ, 2010).

⁽³⁾ Matière organique déterminée par la méthode de perte au feu.

⁽⁴⁾ Nitrate mesuré au semis dans la couche de sol 0-30 cm.

⁽⁵⁾ Ntotal analysé par combustion au moyen du Système LECO.

2.2 Détermination des doses agronomiques optimales

2.2.1 Recherche d'indicateurs de potentiel de rendement et de fertilité du sol

Plusieurs facteurs liés aux conditions climatiques et aux propriétés physico-chimiques des sols sont susceptibles d'influencer la réponse du radis à la fertilisation azotée. Étant une culture à court cycle de production (26 jours en moyenne), la période de semis a été le premier facteur qui a influencé la réponse de la plante à l'azote. Dans cet ordre d'idée, un seuil de jours Juliens de 140 jrs (19-20 mai) a été déterminé à l'aide d'une analyse de répartition (Cate-Nelson 1971) : la période de semis 1 regroupe les sites semés avant le 21 mai et la période de semis 2, ceux semés à partir du 21 mai. Les performances du modèle de répartition des jours juliens (Référence 1^{er} janvier) sont présentées au Tableau 8.

Tableau 8. Valeur critique de partition selon la date de semis pour l'ensemble des données des essais N de radis

| Indicateur de rendement ⁽¹⁾ | N _{obs} ⁽²⁾ | Valeur critique | RRel ⁽³⁾ (%) | Sensitivité | Spécificité | Précision | Valeur de P |
|--|---------------------------------|-----------------|-------------------------|-------------|-------------|-----------|-------------|
| Période de semis (jours juliens) | 46 | 140 | 0,73 | 0,61 | 0,93 | 0,78 | < 0,001 |

⁽¹⁾ Les jours juliens réfèrent au nombre de jours écoulés depuis le 1^{er} janvier de l'année de l'essai et la date de semis.

⁽²⁾ N_{obs} : nombre d'observations.

⁽³⁾ RRel : Rendement relatif (100 % × rendement du témoin/rendement maximum par bloc).

Dans un premier temps, l'ensemble des données a été analysé sans égard au seuil de jour julien. Dans un second temps, le jeu de données a été séparé selon chaque période de semis. Pour chaque analyse, le potentiel de plusieurs indicateurs physico-chimiques du sol à expliquer la réponse à la fertilisation azotée a été testé : la teneur en nitrate au semis (0-30 cm), le N total, la MO et le rapport C/N. Il en ressort qu'aucun indicateur n'a pu être retenu lorsque l'ensemble du jeu de données est considéré sans égard aux dates de semis, car la grande variabilité de la réponse réduit considérablement la performance des modèles de répartition. Cependant, lorsque chaque période est considérée séparément, le N total et le nitrate au semis sont ressortis comme indicateurs potentiels en fonction de leur performance. Toutefois, seuls les résultats des modèles basés sur le N total ont permis de définir des doses optimales valides agronomiquement. Il convient de garder un œil ouvert sur le nitrate mesuré au printemps puisqu'il présente un fort potentiel d'influence de la réponse à la fertilisation azotée du radis. Ce constat a été fait dans la plupart des VSRF N produites par l'IRDA.

Tableau 9 : Valeurs critiques de partition des indicateurs de sol significatifs pour les essais N de radis

| Indicateur de sol ⁽¹⁾ | N _{obs} ⁽²⁾ | Valeur critique | RRel ⁽³⁾ (%) | Sensitivité | Spécificité | Précision | Valeur de P |
|--|---------------------------------|-------------------|-------------------------|-------------|-------------|-----------|-------------|
| Période de semis 1 (≤ 140 Jours Juliens) | | | | | | | |
| N total (%) | 19 | 1,66 | 0,56 | 0,50 | 1 | 0,63 | 0,033 |
| N total 2 (%) | 19 | 1,77; 2,14 | 0,51; 0,84 | 0,40 | 0,79 | 0,74 | 0,033 |
| N-NO ₃ au semis (ppm) | 19 | 33,75 | 0,55 | 0,70 | 0,88 | 0,79 | 0,019 |
| Période de semis 2 (> 140 Jours Juliens) | | | | | | | |
| N total (%) | 43 | 1,43 | 0,69 | 0,61 | 0,93 | 0,79 | 0,001 |
| N total 2 (%) | 43 | 1,54 | 0,69 | 0,60 | 0,89 | 0,79 | 0,001 |
| N-NO ₃ au semis (ppm) | 43 | 29,15 | 0,72 | 0,50 | 1 | 0,81 | < 0,001 |
| N-NO ₃ au semis 2 (ppm) | 43 | 32,15 | 0,72 | 0,56 | 0,93 | 0,79 | < 0,001 |

⁽¹⁾ Le nitrate au semis a été déterminé par la méthode au KCl 2M et dosé par colorimétrie.

⁽²⁾ N_{obs} : nombre d'observations.

⁽³⁾ RRel : Rendement relatif (100 % × rendement du témoin/rendement maximum par bloc).

2.2.2 Effet de la dose d'azote sur le rendement

L'effet de la fertilisation azotée sur le gain de rendement a été étudié, par période de semis, en utilisant des modèles de régression sur les doses d'azote et des analyses de variance par groupe de doses. La méthode des régressions ne donnant pas de bénéfices additionnels à celle des ANOVA, la méthode utilisée pour une majorité des cultures précédentes a été retenue. Les résultats permettant la meilleure interprétation agronomique de la réponse de la culture à l'engrais sont présentés à la Figure 4 par période de semis, selon un modèle sans indicateur de fertilité ou selon des indicateurs teneur en N du sol.

Dans l'ensemble, la réponse à la fertilisation azotée par rapport au témoin 0N est importante (ROM élevé) indépendamment de la période de semis et de la teneur en N total. Une sous-alimentation en N peut avoir un impact considérable sur le rendement. Pour la période de semis 1, le modèle sans indicateur (Modèle 1-A) et le modèle avec le N total comme indicateur de fertilité (Modèle 1-B; sous le seuil critique de 1,66 % seulement) ont présenté des effets significatifs de la dose de N sur le gain de rendement. Pour le modèle sans indicateur de fertilité (N_{obs} = 108, P = 0,010), la dose optimale a été de 90 kg N/ha pour un ROM moyen de 2,3 et des augmentations de rendement allant de 57 à 205 % par rapport au témoin. Sous le seuil de N total critique (N total ≤ 1,66 %), l'effet de la dose a été significatif (N_{obs} = 30, P = 0,001) et le ROM optimal moyen (3,7) a été également obtenu avec la dose de 90 kg N/ha. Au-delà de 1,66 % de N total, l'effet de la dose n'est pas significatif et le premier groupe de doses testées 1-20-30 (ROM = 1,6) a été suffisant pour produire des augmentations de rendement variant de 17 à 105 % par rapport au témoin. Cependant, tout comme le modèle sans indicateur et la classe de richesse faible, la dose de 90 kg N/ha a été celle qui produit le ROM maximal (1,82) pour la classe de fertilité élevée. Cela appuie que la réponse obtenue pour la classe de fertilité faible n'est pas due à un effet de site. De plus, au site d'essai, des réponses similaires très nettes ont été mesurées dans chacun des 5 blocs.

Toutefois, l'apport d'une dose de N aussi forte pour une culture de court cycle cultural ne serait pas idéal et pourrait induire une production trop importante de feuillage. Une réduction de la dose en fonction des analyses de qualités et du nitrate résiduel pourrait être envisagée.

Modèle

1-A)

1-B)

2-A)

2-B)

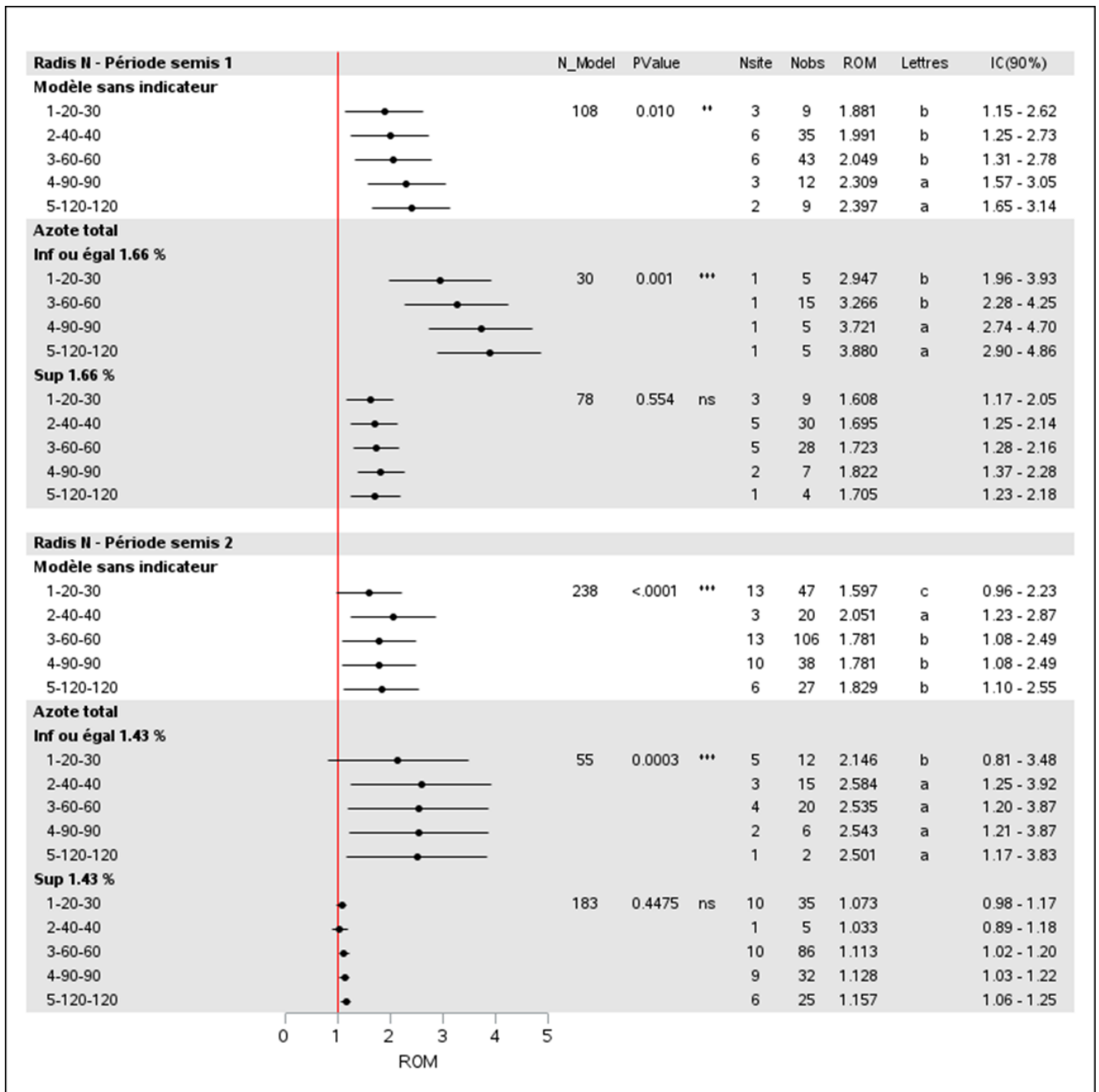


Figure 4. Résultats des analyses de variance sur la réponse du radis aux doses croissantes d'azote. N_model : nombre d'observations du modèle; Nsite : nombre de sites; Nobs : nombre d'observations; ROM : rapport de rendements (rendement parcelle fertilisée/rendement parcelle témoin); IC : Intervalle de confiance. Les moyennes d'une même catégorie qui ne partagent pas la même lettre sont significativement différentes au seuil $P < 0,12$.

Pour la période de semis 2, le modèle sans indicateur (Modèle 2-A) indique également un effet significatif de la dose sur le gain de rendement de la culture ($N_{obs} = 238, P < 0,001$). Avec un ROM moyen de 2,1 et des augmentations de rendement allant de 23 à 189 %, le groupe de doses 2-40-40 constitue la dose agronomique optimale. Pour la classe de richesse en N total inférieur au seuil ($N_{total} \leq 1,43 \%$), un effet significatif de la dose a été également obtenu ($N_{obs} = 55, P < 0,0003$). Le

deuxième groupement de doses (1-40-40) avec un ROM moyen de 2,6 permet d'obtenir les plus fortes augmentations de rendement. Au-delà de 1,43 % de N total, aucun effet significatif de la dose n'a été constaté. Le groupe de doses 1-20-30 (ROM = 1,1) est retenu et entraîne des augmentations de rendement allant jusqu'à 17 % du rendement total.

2.2.3 Effet de la dose d'azote sur les calibres, la qualité et les pertes à la récolte

2.2.3.1 Calibres à la récolte

Les radis ont été classés à la récolte, suivant les critères de diamètre décrits au Tableau 6 (p. 20), pour évaluer l'effet de la dose d'azote sur le calibre des radis. Une analyse de la variance a été effectuée pour chaque période de semis. Globalement, pour la période de semis 1, une analyse descriptive des données a montré que la proportion de radis de calibre moyen tend à diminuer et se stabiliser autour de 65 % du rendement vendable à partir d'une dose de 40 kg N/ha. La proportion de calibre gros par rapport au rendement vendable était de 12 % et 25 % pour le témoin et le groupe de doses 1-20-30 et se stabilisait à 33 % à partir de 40 kg N/ha. Pour la deuxième période de semis, la proportion de radis de calibre moyen était stable jusqu'au groupe de doses de 1-40-40 (63-68 %). Cependant, à partir de 40 kg N/ha, la proportion cumulée des calibres Moyen + Gros et la proportion des jumbos étaient relativement similaires.

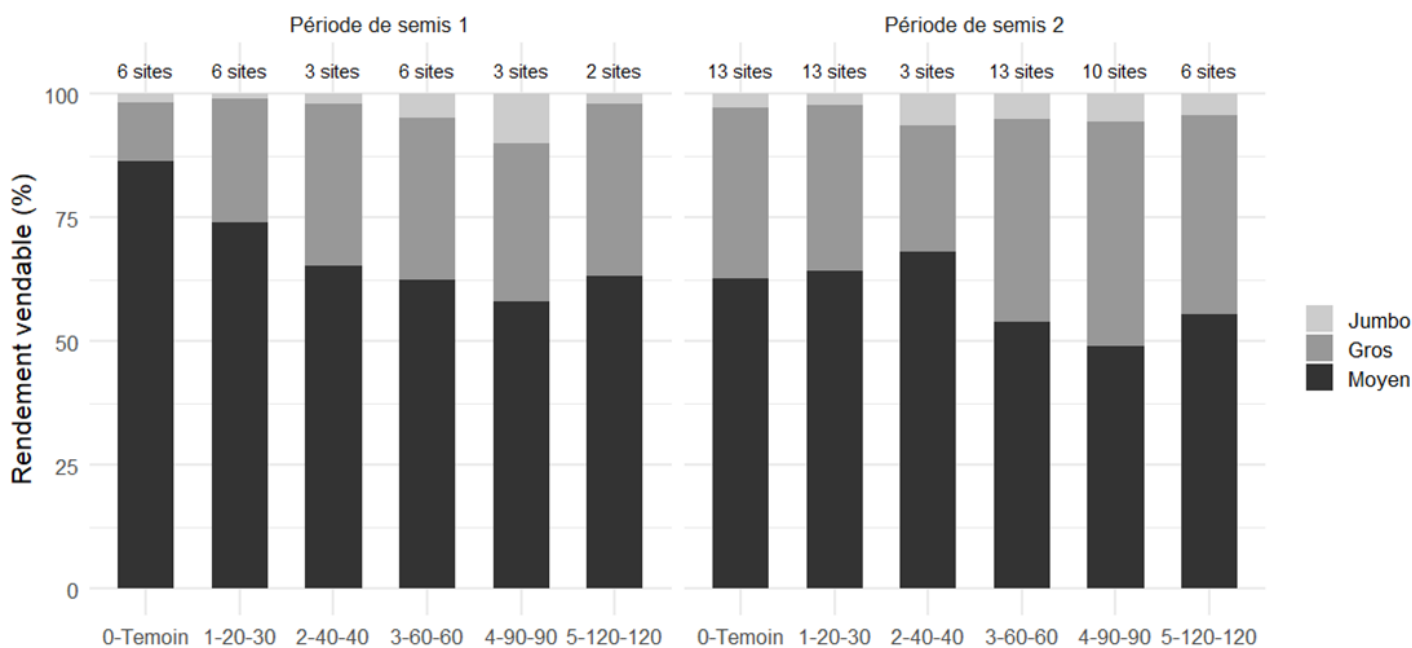


Figure 5. Proportion des calibres vendables en fonction des doses d'azote appliquées à la culture de radis en sol organique.

Les radis de calibre moyen sont très prisés à la consommation et leur apparence visuelle leur confère un avantage par rapport aux radis très gros en termes de commercialisation. Une analyse de variance par classe de richesse et en fonction des périodes de semis a permis de faire ressortir des différences selon les doses de N appliquées (Figure 6). Pour la première période de semis, la classe de richesse en N total faible a montré un effet significatif de la dose sur les radis de calibre moyen ($N_{obs} = 25$, $P < 0,001$). Une diminution de la proportion des calibres Moyen a été observée en fonction de l'augmentation de la dose de N jusqu'à la dose de 60 kg N/ha. Toutefois, la dose de 60 N permet de maintenir une proportion de radis de calibre moyen supérieur à 60 % du rendement vendable. En sols plus riches, à l'exception du témoin, aucune différence n'a été observée parmi les traitements de N pour la période de semis 1. Pour la période de semis 2, des différences significatives ont été observées pour chaque classe de fertilité et les doses de N allant de 0 à 40 ont permis de maximiser les proportions de radis de calibre moyen.

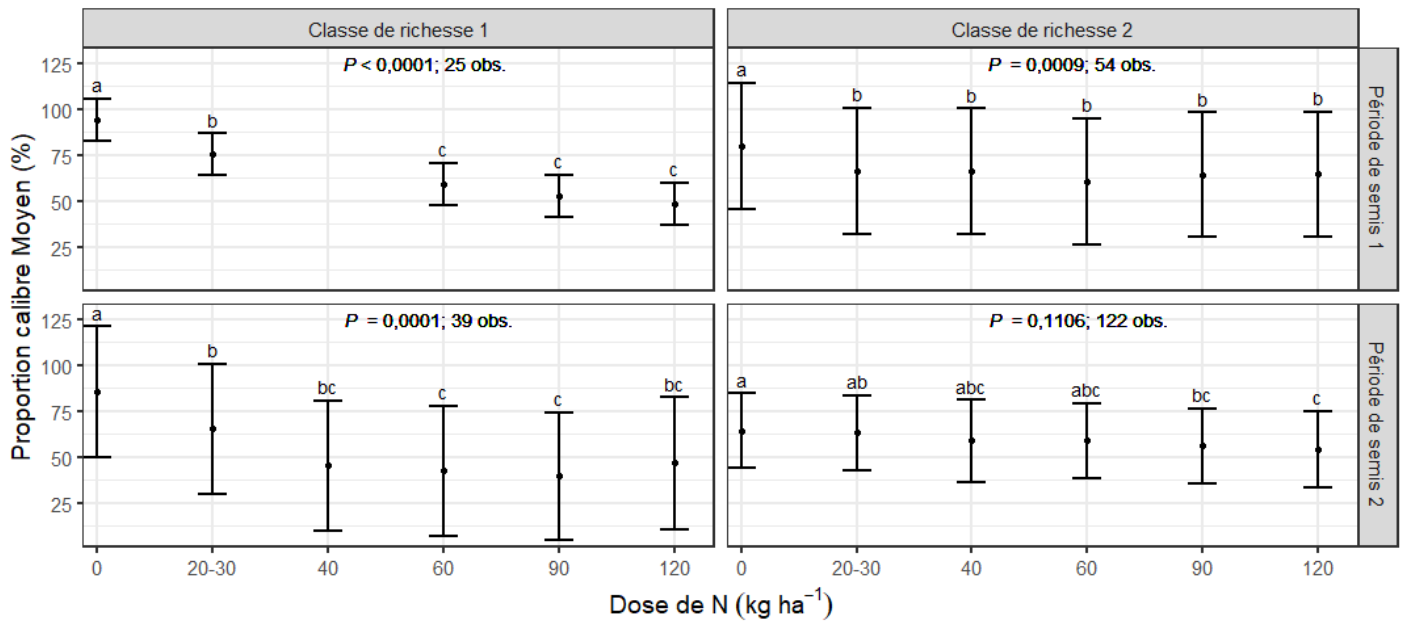


Figure 6. Proportion des calibres moyens vendables en fonction des doses d'azote appliquées à la culture de radis en sol organique. Période de semis 1 – Classe de richesse : 1) $N_{tot} \leq 1,66\%$; 2) $N_{tot} > 1,66\%$; Période de semis 2 – Classe de richesse : 1) $N_{tot} \leq 1,43\%$; 2) $N_{tot} > 1,43\%$.

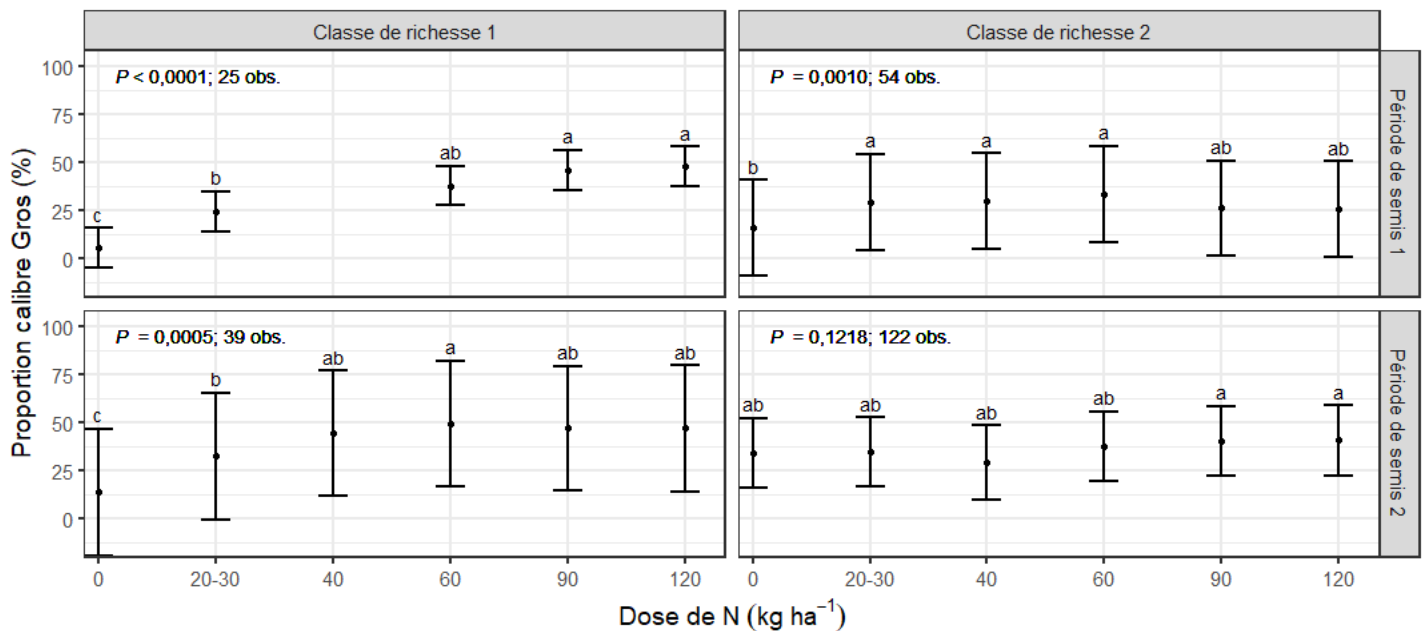


Figure 7. Proportion des calibres gros vendables en fonction des doses d'azote appliquées à la culture de radis en sol organique. Période de semis 1 – Classe de richesse : 1) $N_{tot} \leq 1,66\%$; 2) $N_{tot} > 1,66\%$; Période de semis 2 – Classe de richesse : 1) $N_{tot} \leq 1,43\%$; 2) $N_{tot} > 1,43\%$.

Au Québec, les radis de plus grand calibre présentent aussi un intérêt économique pour le marché de la grande distribution. Certains producteurs visent des diamètres de radis allant jusqu'à 40 mm. Une analyse des radis de calibre gros dont le diamètre est compris entre 31,8 mm et 38,1 mm montre un effet significatif de la dose de N (seuil $P < 0,125$) sur la proportion de radis de calibre gros en fonction de la période de semis et de la classe de richesse en azote total du

sol (Figure 7). Contrairement aux radis de calibre moyen, l'accroissement de la dose de N entraîne une augmentation significative de la proportion des radis de calibre gros.

Pour la première période de semis, la classe de richesse en azote total faible (classe de richesse 1) indique une augmentation significative de la proportion des radis de calibre gros jusqu'à 60 kg N/ha ($P < 0,001$). Au-delà de cette dose de N, tout apport en azote ne profite ni au calibre moyen ni au calibre gros. Conséquemment, seuls les calibres Jumbo dont l'intérêt économique et alimentaire est moindre profitent à la dose de 90 kg N/ha jugée optimale pour optimiser le rendement. Dans le cas des sols plus riches, le groupe de doses minimales testées (20 - 30 kg/ha) ne présente aucune différence significative avec les autres doses de N plus élevées en termes de proportion de radis de calibre gros.

Globalement, des doses de N plus faibles sont requises pendant la période de semis dite tardive pour maximiser le rendement total et la proportion des radis vendables ayant un calibre standard (moyen ou gros). Dans les sols moins bien pourvus en azote, la dose de 40 kg/ha de N permet d'optimiser à 45 % la proportion des radis vendables de calibre gros. Dans les sols plus riches, aucune réelle différence significative n'a été obtenue.

2.2.3.2 Masse et qualité du feuillage à la récolte

Pour les radis destinés à la commercialisation en botte, la masse et l'apparence visuelle du feuillage ont une importance sur la qualité globale de la production. Un feuillage vert montrant des signes de vitalité et de masse adéquate en comparaison à la masse de la racine est recherché. Dans la littérature, aucune plage de valeur optimale du rapport de la masse des racines sur les feuilles de radis n'a été identifiée. Dans la pratique, les producteurs utilisent une règle de pouce stipulant que la longueur du feuillage ne doit pas dépasser de plus de 2 fois la longueur de la paume de la main. Sur l'ensemble des sites, des valeurs du rapport de la masse totale des racines sur la masse du feuillage de 1,35 à 2,94 ont été calculées (Moyenne de 1,99 et Médiane de 1,84). En moyenne, le rapport était moins élevé au cours de la première période de semis (1,58) en comparaison à la seconde période (2,37). Toutefois, la seule différence significative en fonction de la dose de N appliquée a été observée pour la première période de semis sous le seuil de fertilité en N_{tot} du sol ($P < 0,001$; $N = 25$). Le rapport masses Racine/Feuille diminue avec la dose de N et passe en dessous de 1,5 au-delà de 60 N.

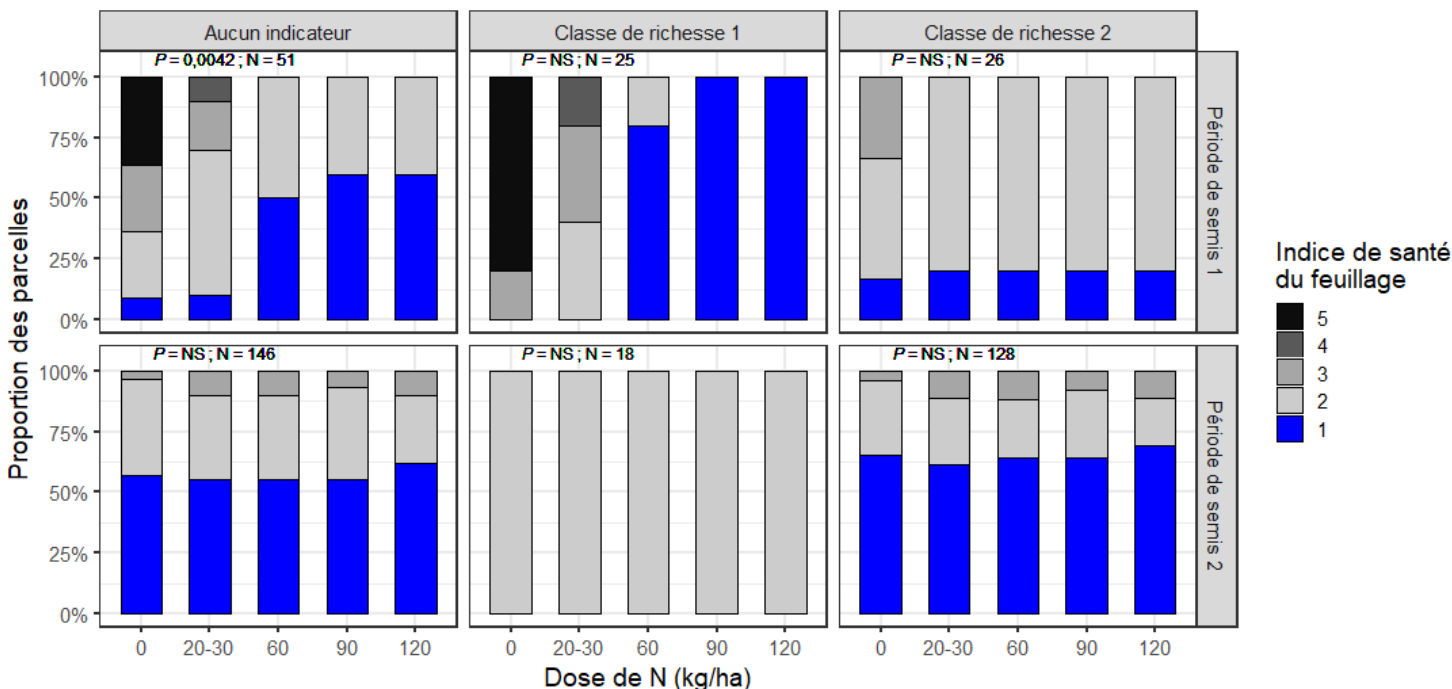


Figure 8. Évaluation de la santé du feuillage selon les doses de N. N = Nombre d'observations. Période de semis 1 – Classe de richesse : 1) $N_{tot} \leq 1,66$ %; 2) $N_{tot} > 1,66$ %; Période de semis 2 – Classe de richesse : 1) $N_{tot} \leq 1,43$ %; 2) $N_{tot} > 1,43$ %.

Dans le cadre des présents essais, la santé du feuillage a été évaluée dans la zone de récolte de chaque unité expérimentale. Un indice à cinq niveaux (1 à 5) a été retenu en vue de l'évaluation : 1 pour un feuillage d'un vert intense et uniforme; 5 pour un feuillage caractérisé par un jaunissement généralisé. L'analyse de la qualité du feuillage en fonction de la dose N a montré peu d'effet significatif (Figure 8). Pour la première période de semis, aucun effet de la dose a été observé par classe de fertilité. Toutefois, le modèle sans indicateur indique un effet significatif de la dose de N sur la santé du feuillage. À partir d'une dose de 60 kg N/ha, au moins 50 % des parcelles ont un feuillage sain et vert (indice de 1) et le niveau le plus élevé observé est de 2 caractérisé par un léger pâlissement du feuillage et une absence de jaunissement. En sols plus riches, il y a eu peu de variations de la qualité du feuillage en fonction de la dose de N. L'effet est plus marquant en sols bien moins pourvus en N_{tot} mais le nombre réduit d'observations n'a pas permis de faire ressortir une différence significative. Pour la deuxième période de semis, aucune différence significative n'a été observée.

2.2.3.3 Pertes à la récolte

Le radis nécessite un sol modérément fertile pour optimiser son niveau de rendement (Atlantic Provinces Agriculture, 1988). Toutefois, des apports d'éléments nutritifs à des doses élevées pourraient affecter la qualité des racines de radis. À la récolte, les pertes totales ont été évaluées pour déterminer l'influence de la fertilisation azotée sur celles-ci. Les pertes ont été classifiées par catégories et les valeurs moyennes sont présentées à la Figure 9. L'analyse de variance des pertes totales a montré un effet significatif de la dose de N pour chacune des deux périodes de semis considérées. Pour la période de semis 1 ($N_{obs} = 74$, $P = 0,018$), des doses de N variant de 20 à 40 kg/ha ont permis de minimiser les pertes à la récolte sans tenir compte de l'indicateur de fertilité.

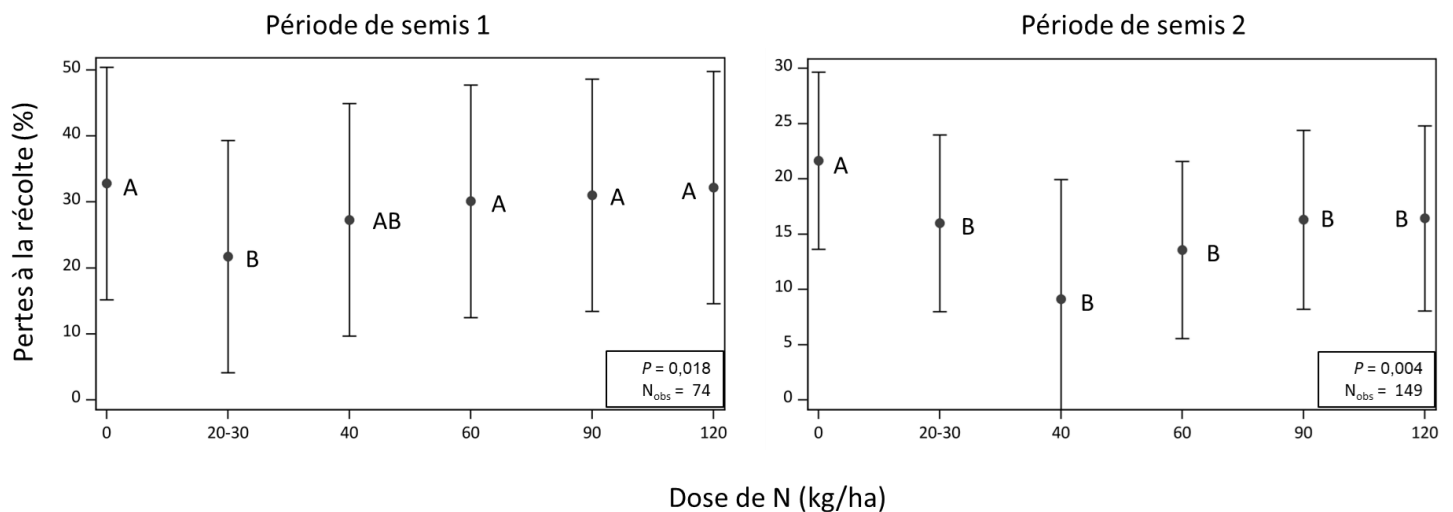


Figure 9. Pertes à la récolte (%) par rapport au rendement total en fonction des traitements de fertilisation azotée – Sans indicateur.

Un écart de 9,3 % de pertes entre la dose de 90 kg N/ha et le groupe de doses 1-20-30 caractérisé par les pertes minimales a été obtenu. Toutefois, le ROM calculé de 2,09 pour la dose de 90 kg N/ha ($ROM \times (1 - 9,3/100)$) reste supérieur au ROM de 1,88 obtenu pour le groupe de doses 1-20-30 et justifierait l'apport d'une telle dose pour maximiser le rendement avec le modèle sans indicateur. Cependant, le ROM à 90 N est inférieur au ROM de 3,27 obtenu pour la dose de 60 N. Dans un objectif d'applicabilité des doses et de réduction des pertes sans diminuer drastiquement les gains de rendement, la dose intermédiaire entre 30 et 90, soit 60 kg N/ha, serait la dose fonctionnellement optimale et donnerait des augmentations de rendement pouvant aller jusqu'à 325 % du rendement témoin. Pour la période de semis 2, indépendamment de la richesse en N total, l'effet de la dose a été significatif seulement par rapport au témoin ($N_{obs} = 149$, $P = 0,004$) et la dose de 40 kg N/ha minimise les pertes. Il convient de rappeler que la distribution des pertes n'a pas suivi les seuils de richesse en N total du sol par période de semis et les modèles sans indicateur ont permis d'obtenir des modèles plus consistants

dont les résultats sont cohérents avec les doses jugées optimales. Aucun ajustement n'a été nécessaire pour améliorer la qualité.

2.2.4 Diagnostic nutritionnel et exportations en azote

Les exportations en azote ont été calculées de manière séparée pour les radis et leur feuillage avec des taux d'humidité variant de 95 à 96 % dans les racines et de 90 à 94 % dans les feuilles (Tableau 10). Globalement, la concentration en N a été de plus de 2 fois supérieure dans la biomasse aérienne en comparaison à la biomasse racinaire. Les exportations pour la population de tête des racines de radis représentaient environ la moitié de celles des feuilles. Dans la population de tête, les exportations des racines de radis ont varié de 14 à 27 kg de N/ha avec une valeur moyenne de 20 kg de N/ha tandis qu'une valeur de 38 kg de P₂O₅/ha a été calculée pour les feuilles (26-52 kg de N/ha). En considérant les exportations cumulées de la population de tête pour les deux parties analysées, les exportations moyennes de la culture ont été de 58 kg de N à l'hectare. Pour chaque partie de la plante considérée, les exportations ont varié linéairement par rapport aux rendements (Voir Figure 10) et étaient indépendantes de la variété de radis cultivée. Le feuillage représentait en termes de rendement environ la moitié des rendements obtenus pour les racines de radis. Pour la population de tête, le rendement moyen pour la biomasse aérienne a été de 11398 kg/ha tandis qu'un rendement moyen de 19 299 kg/ha a été calculé pour les racines.

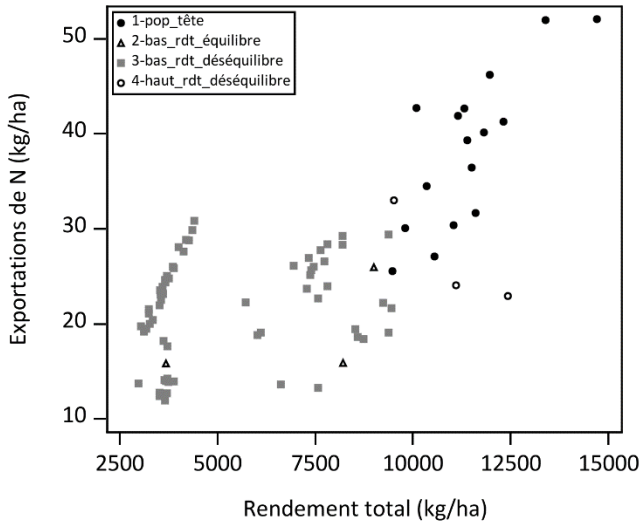
Tableau 10. Concentrations et exportations en N de radis (sans feuille) et du feuillage selon le diagnostic nutritionnel

| | Humidité ⁽¹⁾ | | Exportations ⁽²⁾ | | | | |
|---|-------------------------|-----------------|-----------------------------|-------------------------------|----|----|----|
| | (%) | (kg N/t) Moy | Éc-T | (kg N/ha) Moy Med Moy Éc-T | | | |
| Radis sans feuilles | | | | | | | |
| Haut rendement et équilibre nutritionnel (« population de tête ») | 96 | 1,04 | 0,20 | 20 | 18 | 14 | 27 |
| Faible rendement et équilibre nutritionnel | 96 | 1,18 | 0,17 | 16 | 16 | 12 | 20 |
| Faible rendement et déséquilibre nutritionnel | 95 | 1,6 | 0,68 | 18 | 17 | 2 | 41 |
| Haut rendement et déséquilibre nutritionnel | 95 | 1,29 | 0,37 | 24 | 13 | 13 | 36 |
| Feuillage des radis | | | | | | | |
| Haut rendement et équilibre nutritionnel (« population de tête ») | 92 | 3,35 | 0,50 | 38 | 40 | 26 | 52 |
| Faible rendement et équilibre nutritionnel | 93 | 3,05 | 1,20 | 19 | 16 | 16 | 26 |
| Faible rendement et déséquilibre nutritionnel | 90 | 4,66 | 1,70 | 21 | 22 | 12 | 31 |
| Haut rendement et déséquilibre nutritionnel | 94 | 2,50 | 0,86 | 27 | 24 | 23 | 33 |
| Radis + feuilles | | | | | | | |
| Haut rendement et équilibre nutritionnel (« population de tête ») | 94 | 2,2 | 0,35 | 58 | 58 | 40 | 79 |
| Faible rendement et équilibre nutritionnel | 94,5 | 2,12 | 0,69 | 35 | 32 | 28 | 46 |
| Faible rendement et déséquilibre nutritionnel | 92,5 | 3,13 | 1,19 | 39 | 39 | 14 | 72 |
| Haut rendement et déséquilibre nutritionnel | 94,5 | 1,9 | 0,62 | 51 | 37 | 36 | 69 |

(1) Humidité après séchage à 60-70 °C pendant 72 h ou jusqu'à l'atteinte d'une masse constante.

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

(A) Feuilles de radis



(B) Racines de radis

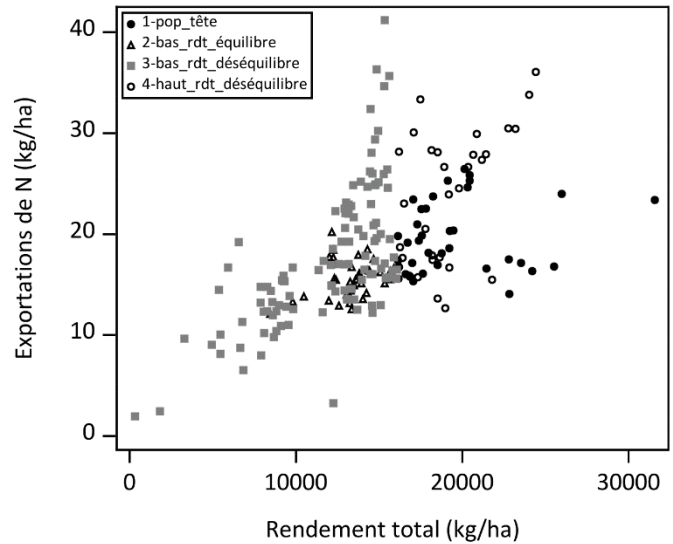


Figure 10. Répartition des exportations de N en fonction du rendement pour (A) le feuillage et (B) la racine des radis.

2.2.5 Nitrates à la récolte

N'étant pas utilisé dans sa totalité, une partie de l'azote apportée par la fertilisation restera au niveau du sol à la fin du cycle cultural et entraîne un risque de diffusion de certains composés azotés dans l'environnement (Bélanger et al., 2003). Afin d'évaluer ce risque, le nitrate (N-NO_3) a été mesuré sur deux profondeurs (0-30 et 30-60 cm) immédiatement après la récolte. Les concentrations en N-NO_3 des différents traitements ont été analysées en tant qu'« indice nitrate ». Cet indice s'obtient en divisant la teneur en N-NO_3 du traitement fertilisé par la teneur en 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 indices nitrate obtenus en fonction des différentes doses d'azote sont présentées à la Figure 11. La fertilisation azotée a entraîné une hausse des teneurs en N-NO_3 aux deux profondeurs analysées. Les teneurs en N-NO_3 des témoins étaient similaires en surface (21,9 ppm) et en profondeur (21,2 ppm). En surface, dès les plus petites doses testées (1-20-30), la teneur en N-NO_3 à la récolte a été augmentée de manière significative ($P < 0,001$), tandis qu'une tendance à une augmentation a été observée en profondeur à partir de la dose de 40 kg N/ha ($P < 0,001$). Pour des doses de N allant de 60 à 120 kg N/ha, les teneurs ont fortement augmenté dans les deux profondeurs et atteint 74,4 ppm dans la couche de surface avec une dose de 120 kg N/ha. Toutefois, en se fixant un seuil d'indice de nitrate à 3 dans la couche superficielle, seules les doses variant de 90 à 120 kg N/ha ont dépassé ce niveau de nitrates.

Ainsi, malgré la réponse très importante observée de la culture aux apports d'engrais azoté, l'analyse du nitrate à la récolte démontre qu'une partie non négligeable de l'azote apporté demeure non prélevée et risque d'être perdue par lessivage. En vue d'atténuer le risque environnemental, le radis étant caractérisé par un court cycle de production, l'implantation d'un second cycle de production ou d'une culture de couverture (pour limiter le risque de propagation de maladies) comme culture piège est à encourager. De plus, avec des objectifs de rendements un peu moins du maximum, l'application d'une dose de 60 kg N/ha intermédiaire entre 90 kg N/ha et le groupe de doses minimum testé atténuerait les risques environnementaux en considérant la couche de surface et un seuil d'indice de nitrates de 3.

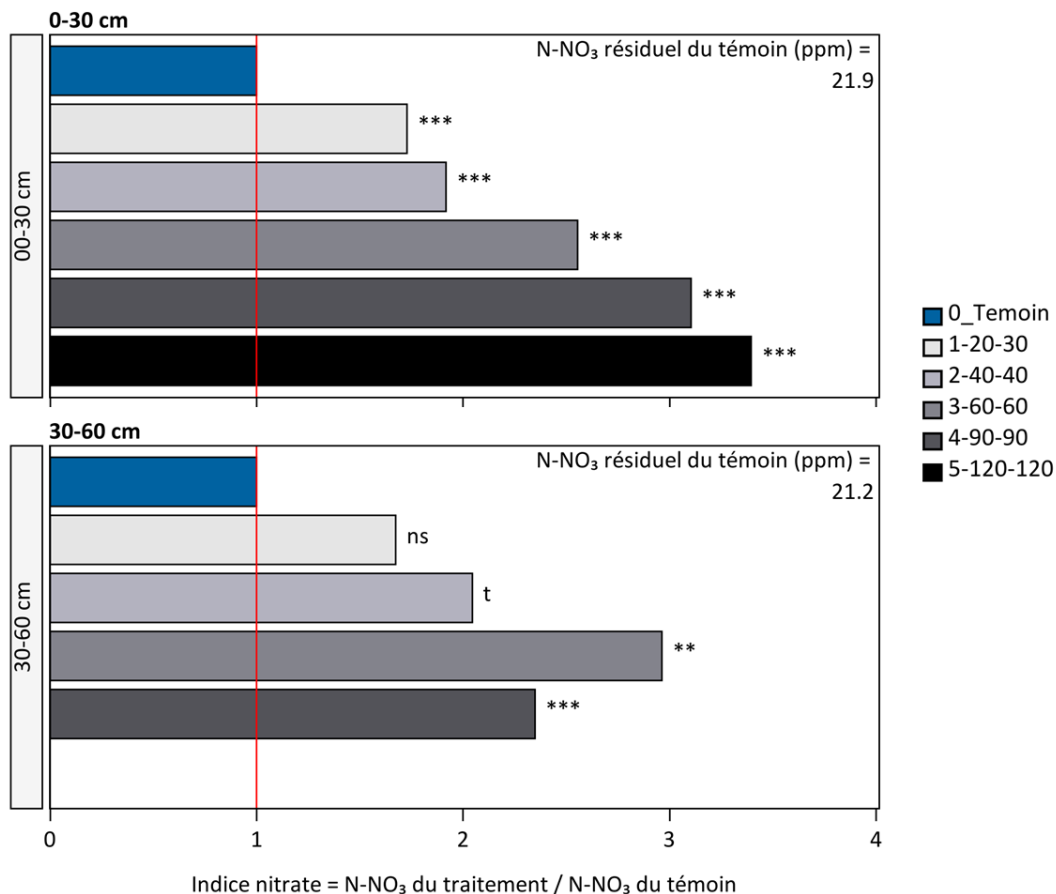


Figure 11. Nitrate résiduel à la récolte suivant une fertilisation azotée.

2.3 Fertilisation azotée proposée

Les VSRF de N proposées pour la culture du radis sont présentées au Tableau 11. La date de semis et la teneur en N total des sols ont servi d'indicateurs permettant de distinguer les différentes classes de fertilité des sols. Par ailleurs, un ajustement des doses proposées comme VSRF a été nécessaire sur la base des analyses de pertes totales à la récolte.

Pour la culture du radis semée avant le 21 mai, deux classes de richesse de sol ont été définies à partir du seuil de 1,66 % de N déterminé par le test de partition de Cate-Nelson (voir section 2.2.1). Dans les sols dont le niveau de N total est inférieur ou égal à 1,66 %, la dose de 90 kg N/ha a été calculée comme étant optimale, menant à des gains de rendements variant de 57 à 205 %, par rapport au témoin ON. Parallèlement, cette dose correspond à des niveaux de pertes d'environ 10 % par rapport au groupe de doses minimum testé (20-30) et des niveaux de nitrate résiduel de 65 ppm dans la couche de surface (0-30 cm). Ajoutées à cela, les données d'un seul site ont permis d'aboutir à cette dose bien que celle-ci reflète mathématiquement les besoins optimaux des sites hâtifs (Les ROM maximaux sont associés à la dose de 90 N). À la lumière de tout cela, la dose de 60 kg N/ha intermédiaire entre la dose minimale testée qui minimise à la fois les pertes et les nitrates résiduels et la dose optimale calculée est proposée pour la classe de fertilité faible en N total de la première période de semis. Cette dose, plus adaptée au contexte de production de culture de court cycle cultural, permettra de couvrir l'ensemble des exportations en azote de la culture (58 N en moyenne) et d'assurer des augmentations de rendement minimales de 128 % par rapport au témoin. De plus, en vue de favoriser la production de radis de moins grand calibre et un rapport Racine/Feuille adéquat, la dose qui optimise le rendement au cours de la deuxième période de semis (40 kg N/ha) peut être appliquée pour des semis réalisés à la fin de la première période. Ainsi, un intervalle de dose variant de 40 kg N/ha et 60 kg N/ha doit permettre d'optimiser la production tout en minimisant les risques environnementaux.

Toujours pour la 1^e période de semis (avant le 21 mai), dépassé le seuil de N total de 1,66 %, aucune différence significative n'a été calculée et la dose agronomique optimale de 30 kg K₂O/ha (médiane du groupe de doses 25-30) est proposée.

Pour la deuxième période de semis (à partir du 21 mai, Tableau 9), 2 classes de richesse du sol en N total ont également été retenues en fonction du seuil critique de 1,43 % (voir section 2.2.1). Sous ce seuil de non-réponse, la dose agronomique optimale a été de 40 kg N/ha pour un ROM moyen de 2,6. Au-delà de 1,43 % de N total, en absence de différences de ROM entre les groupes de doses, la dose de 30 kg N/ha (médiane du groupe de doses 25-30) est proposée et celle-ci permet des augmentations de rendement pouvant atteindre jusqu'à 17 % du rendement témoin ON. Globalement, des doses de N variant de 30 à 60 kg/ha ont été proposées. À l'exception des sites pauvres en N total pour la première période de semis considérée, les VSRF étaient égales ou inférieures aux doses de N recommandées actuellement au Québec, en Ontario et au Michigan (Tableau 14). Les VSRF de cette grille ont permis des augmentations de rendement pouvant aller jusqu'à 370 % du rendement témoin. De telles augmentations de rendement ont été observées au Québec pendant les 20 dernières années. Selon le Portrait-diagnostic sectoriel des légumes frais au Québec, le rendement du radis en kg/ha a connu une augmentation de 222 % pendant la période allant de 2006 à 2015 (MAPAQ, 2017). Alors que la superficie totale ensemencée est passée de 647 ha à 565 ha sur la même période (Statistique Canada, 2023).

Note : En vue de faciliter l'utilisation des VSRF dans les grilles officielles MAPAQ, il a adopté en comité scientifique la proposition de l'IRDA consistant à remplacer les périodes de semis 1 et 2 respectivement, par des semis hâtif et tardif définis autour de la date du 1^{er} juin.

Tableau 11. Fertilisation azotée du radis en sol organique – Valeurs scientifiques de référence en fertilisation

| Période de semis ⁽¹⁾ | Classe de fertilité N total ⁽²⁾ (%) | Période d'application | VSRF ⁽³⁾ (kg N/ha) |
|---|---|-----------------------|----------------------------------|
| Semis hâtif (Avant le 1 ^e juin) | ≤ 1,66 | Au semis | 40-60 ⁽⁴⁾ |
| | > 1,66 | | 30 ⁽⁵⁾ |
| Semis tardif (À partir du 1 ^e juin) | ≤ 1,43 | Au semis | 40 ⁽⁶⁾ |
| | > 1,43 | | 30 ⁽⁵⁾ |

(1) La période de semis correspond au seuil du 140^{ème} jour julien déterminé lors du test de partition Cate-Nelson (voir section 2.2.1) et arrondi au 1^{er} juin.

(2) Le N_{total} est mesuré par combustion au LECO.

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

(4) Dose intermédiaire entre celle qui minimise les pertes et celle qui optimise l'augmentation de rendement.

(5) En absence de différence entre les traitements, la dose médiane du plus petit groupe de doses testées est recommandée.

(6) Dose (ou médiane du groupe de doses) agronomique optimale dans cette catégorie de sol.

Tableau 12. Comparaison des recommandations en N pour la production de radis au Canada et aux États-Unis

| Provinces/États | Indicateurs | Dose N (kg/ha) | Source |
|-----------------|-------------|----------------|-------------------------|
| Québec (CAN) | - | 45 | CRAAQ (2010) |
| Ontario (CAN) | - | 40 | MAAARO (2011) |
| Michigan (US) | - | 55 | Warncke et coll. (2004) |



Méthode pour le dosage du nitrate au semis

Le nitrate au semis a été dosé par la méthode au KCl 2M en laboratoire. La corrélation entre la méthode KCl et d'autres méthodes, par exemple le Nitratecheck, n'a pas été évaluée. Comme les seuils peuvent varier selon la méthode utilisée (Wetselaar et al., 1998), il n'est pas possible pour l'instant d'émettre un seuil équivalent pour une autre méthode. De plus, actuellement au Québec, l'analyse de la teneur en nitrate ne fait pas partie des analyses de routine des entreprises. Dans le cadre de la présente grille N, des seuils de nitrates critiques intéressants ont été calculés pour chaque période de semis. Les classes de fertilité définies autour de ces valeurs seuils n'ont pas permis de proposer des VSRF. Néanmoins, les nitrates présentent un fort potentiel d'utilisation comme indicateurs de fertilité en sols organiques.

3 FERTILISATION PHOSPHATÉE

3.1 Portrait et représentativité des données

La caractérisation physicochimique des sols des blocs (Tableau 13) indique que les sites ont été d'un niveau d'acidité (pH) allant de faible à élevé (6,79 à 4,8). Le pourcentage des blocs ayant un pH inférieur au seuil de pH 5,5 représentait moins du tiers des données. Étant des sols organiques (61,7 % à 95,5 %), nos sites ont été constitués de plus de 70 % de MO dans plus de 95 % des blocs. De telles teneurs en MO devraient augmenter le pouvoir tampon du sol et réduire l'influence de l'acidité sur la disponibilité du phosphore. En constituant des complexes avec les ions Al^{3+} et Fe^{3+} , la MO limiterait la précipitation du phosphore et de surcroît, maintiendrait le P sous une forme assimilable. Le P_{M3} et l'ISP₃ présentent également une bonne répartition des blocs. Au moins un quart des données a été caractérisé par des niveaux de P assez faibles. Pour l'ISP₃, 28 % des blocs ont une valeur inférieure à 5 %, seuil d'ISP₃ pour les sols les moins bien pourvus en phosphore dans les grilles en sols organiques mises à jour en 2010. Environ la moitié des blocs, soit 47 %, se situait dans la deuxième classe de fertilité (5-10 %) et les unités expérimentales qui les constituaient seraient susceptibles d'avoir une réponse à la fertilisation phosphatée. Et finalement, 20 % des blocs ont un ISP₃ de plus de 15 % et permettraient potentiellement de définir un seuil ISP₃ au-delà duquel il n'y aurait aucun gain significatif à fertiliser.

Tableau 13. Répartition des blocs des essais P de radis selon différentes classes de propriétés de sol après la validation des données.

| pH _{eau} ⁽¹⁾ | Blocs (%) | MO _{PAF} (%) ⁽²⁾ | Blocs (%) | ISP ₃ (%) ⁽³⁾ | Blocs (%) | P _{M3} | Blocs (%) |
|----------------------------------|-----------|--------------------------------------|-----------|-------------------------------------|-----------|-----------------|-----------|
| ≤ 5,5 | 30 | ≤ 70 | 3 | ≤ 5 | 28 | ≤ 100 | 36 |
| 5,5 – 6,0 | 42 | 70- 80 | 16 | 5 – 10 | 47 | 100 – 200 | 46 |
| 6,0 – 6,5 | 25 | 80-90 | 72 | 10 –15 | 11 | 200 – 300 | 8 |
| 6,5 – 7,0 | 3 | >90 | 10 | 15-20 | 10 | 300 – 400 | 4 |
| > 7,0 | 0 | - | - | > 20 | 4 | > 400 | 6 |

⁽¹⁾ Le pH optimal est de 5,6 pour les cultures en sol organique (CRAAQ, 2010).

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

⁽³⁾ ISP₃ : indice de saturation en phosphore = $(P_{M3}/31) / ((Al_{M3}/27) + 5 \times (Fe_{M3}/56)) \times 100 \%$, éléments extraits au Mehlich-3 (Mehlich, 1984).

3.2 Détermination des doses agronomiques optimales

3.2.1 Recherche d'indicateurs de fertilité du sol

D'une manière générale, certaines propriétés physico-chimiques du sol ont une capacité d'influence sur la biodisponibilité de phosphore. Par conséquent, elles pourraient être considérées comme des indicateurs de fertilité phosphatée potentiels lorsque des seuils critiques statistiquement significatifs existent. Dans le cadre des essais P, les paramètres tels que le pH, la MO, la teneur en P_{M3} du sol et l'indice de saturation en phosphore (ISP₃) ont été testés et aucun seuil critique significatif n'a été trouvé. De plus, contrairement à la fertilisation azotée et potassique, la réponse du radis à la fertilisation phosphatée n'était pas dépendante de la période de semis. Aucun seuil de jour julien n'a été déterminé non plus en utilisant les rendements relatifs, qu'ils soient calculés avec les rendements vendables et totaux. Les seuils de 5, 10 et 15 % d'ISP₃ (Guérin, 2009), ont donc été retenus pour conduire les analyses sur l'ensemble du jeu de données. Ce choix repose sur l'usage de ces seuils pour les nouvelles grilles maraîchères en sols organiques (CRAAQ, 2010).

3.2.2 Effet de la dose de phosphore sur le rendement

Des analyses de régressions et des analyses de variance par groupe de doses ont été réalisées sur le jeu de données sans indicateurs et également en fonction des quatre classes ISP₃. La méthode des régressions ne donnant pas de bénéfices additionnels à celles des ANOVA, la méthode utilisée pour une majorité des cultures précédentes a été retenue. Les résultats des ANOVA ont été regroupés dans la Figure 12.

Modèle

A)

B)

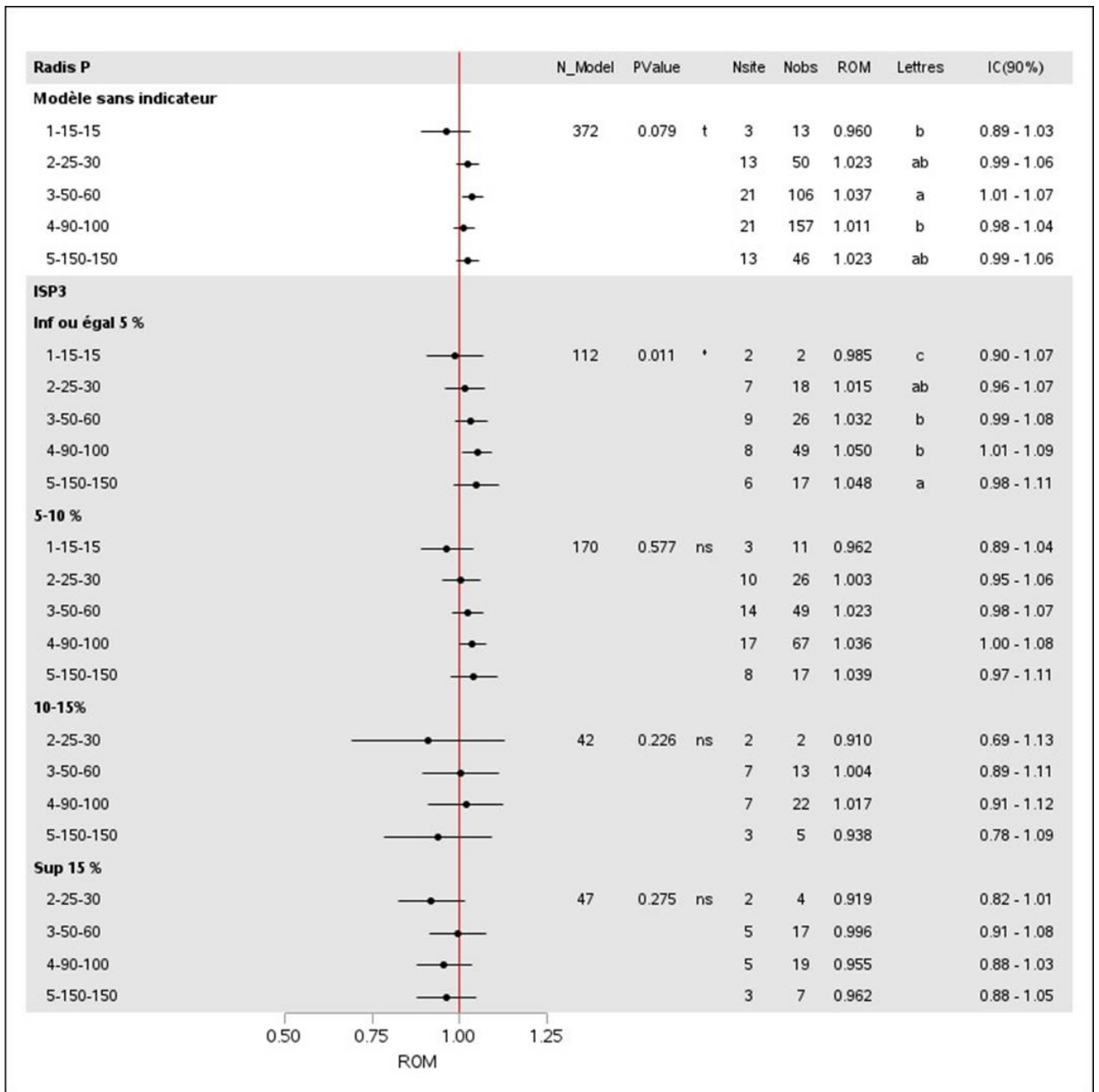


Figure 12. Résultats des analyses de variance sur la réponse du radis aux doses croissantes de phosphore. N_model : nombre d'observations du modèle; Nsite : nombre de sites; Nobs : nombre d'observations; ROM : rapport de rendements (rendement parcelle fertilisée/rendement parcelle témoin); IC : Intervalle de confiance. Les moyennes d'une même catégorie qui ne partagent pas la même lettre sont significativement différentes au seuil $P < 0,12$.

Globalement, la réponse du radis à la fertilisation phosphatée a été faible. L'augmentation maximale du rendement que les doses de phosphore ont permis d'obtenir a été de 5 %. Toutefois, le modèle d'analyses de variance sans indicateur et celui pour la classe d'ISP₃ la plus faible ont indiqué, respectivement, une tendance et une différence statistiquement significative entre les doses testées. Dans les deux cas, le groupe de doses de 25-30 kg de K₂O permettrait d'optimiser le ROM tout en réduisant la variabilité de la réponse. Comparativement au premier groupe de doses testé (1-15-15), le groupe de doses optimal a permis d'éviter des pertes pouvant aller jusqu'à 10-11% par rapport au témoin suivant l'intervalle de confiance à 90 %. Pour la classe d'ISP₃ comprises entre 5 et 10 %, aucune différence n'a été obtenue entre les traitements et l'augmentation de rendement maximal moyenne n'a pas dépassé 3,9%. Cependant, selon les intervalles

de confiance, des pertes ont été mesurées suivant l'apport de la plus petite dose testée et un effet de pente a été observé. Suivant le jugement du conseiller et se basant sur l'historique du champ, des doses de P_2O_5 variant de 0 à 30 kg/ha pourraient être appliquées pour l'optimisation du rendement. Pour la classe d'ISP₃ comprises entre 10 et 15 %, le peu de données crée une grande variabilité. Cependant, pour cette classe aussi des pertes ont été mesurées dans certaines parcelles pour le 1^{er} groupe de doses testé. Dans l'incertitude, et vu l'ISP₃, des doses variant de 0 à 30 pourraient également permettre d'optimiser le rendement. Au-delà de 15 % d'ISP₃, toute application de phosphore a conduit à des ROM inférieurs à l'unité. Par conséquent, la dose nulle permet d'avoir les meilleurs rendements.

3.2.3 Effet de la dose de phosphore sur les calibres, la qualité et les pertes à la récolte

3.2.3.1 Calibres à la récolte

Les radis ont été classés à la récolte afin de déterminer le rendement vendable suivant les critères de diamètre décrits au Tableau 6 (p. 20) pour évaluer l'effet de la dose de phosphore sur le calibre. L'analyse de la variance de l'effet de la dose de P sur les proportions de calibres a été effectuée sur l'ensemble du jeu de données ($N_{obs} = 338$). Aucune différence significative n'a été calculée entre les différents groupes de doses testés avec le modèle sans indicateurs et en fonction des seuils de ISP₃ ($P = NS$). En moyenne et indépendamment de la dose de phosphore, 53 % des radis étaient de calibre moyen, 40 % des radis de calibre gros et 7 % étaient des jumbos, à l'exception de la dose de 15 kg P_2O_5 /ha P_2O_5 pour laquelle 20 % des radis étaient de calibre jumbo. Cependant, cette dose n'a été testée que sur 3 sites (Figure 13) et les calibres moyen et gros sont plus recherchés puisque les jumbos peuvent être liés à des niveaux d'acidité plus élevés, du coup, moins prisés à la consommation.

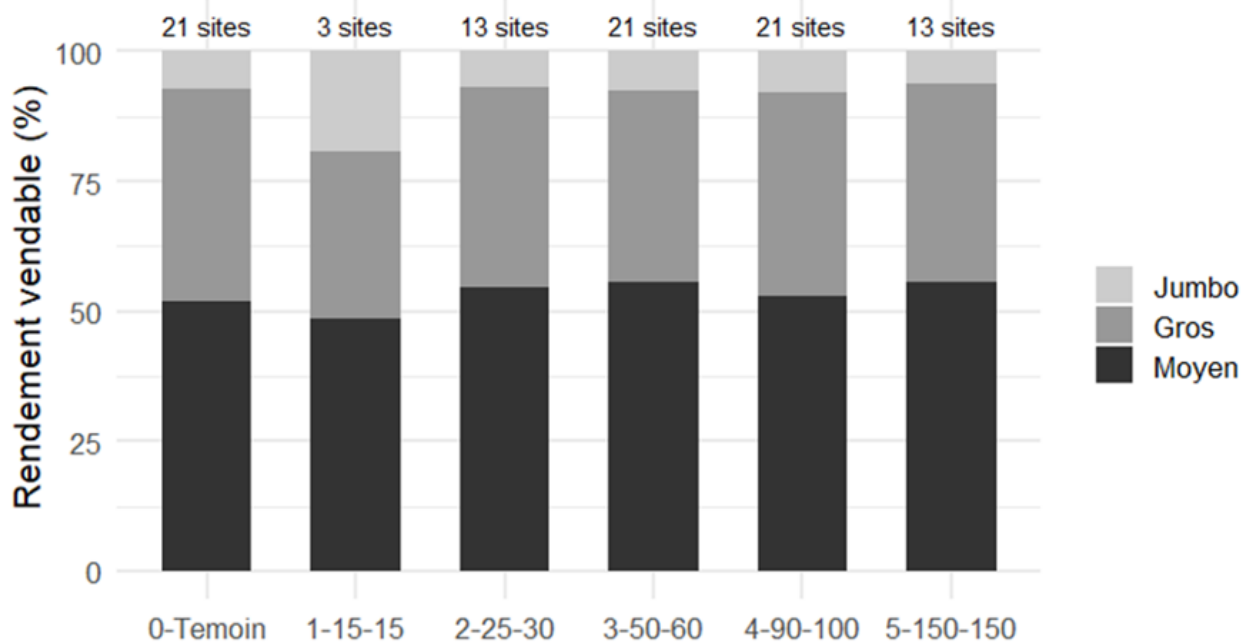


Figure 13. Proportion des calibres vendables en fonction des doses de phosphore appliquées à la culture de radis en sol organique

L'analyse de variance de la proportion des radis de calibre moyen (Très recherché pour la commercialisation en bottes; dans le cadre des essais, diamètre < 32 mm), n'a montré aucune différence significative en fonction de la dose de phosphore testée pour le modèle sans indicateur ($N = 338$ et $P = 0,953$; Figure 14) et ceux utilisant les classes d'ISP₃ comme indice de fertilité - **(a) ≤ 5 %** : $N = 105$ et $P = 0,165$; **(b) 5-10 %** : $N = 146$ et $P = 0,308$; **(c) 10-15 %** : $N = 31$ et $P =$

0,630; **(d) > 15 %** : N = 56 et P = 0,487). Globalement, la proportion de radis de calibre moyen variait relativement peu en fonction de la fertilisation phosphatée et représentaient un peu plus de la moitié du rendement vendable (53,0 à 54,8 %).

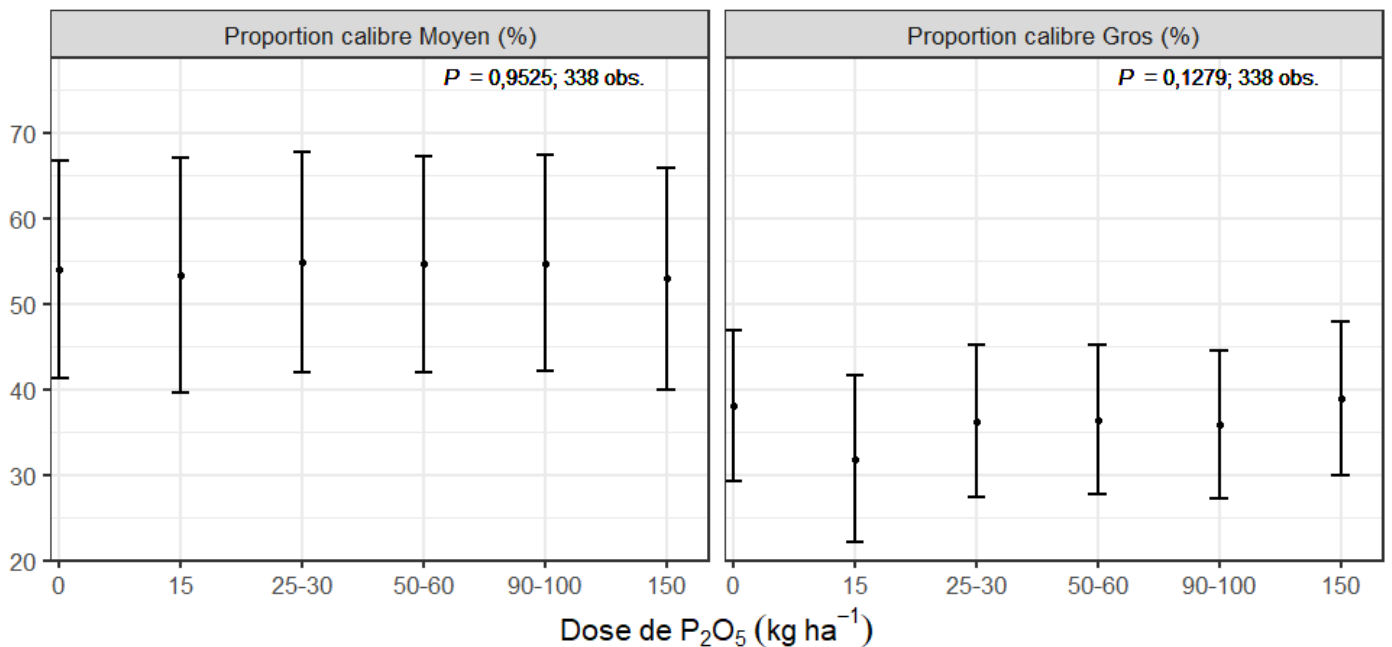


Figure 14. Proportion des calibres moyen et gros vendables en fonction des doses de phosphore appliquées à la culture de radis en sol organique

Les radis de plus grand calibre (gros), présentant un intérêt économique particulièrement pour le marché de la grande distribution, ont été également analysés. Aucun effet significatif de la dose de phosphore n'a été observé sur la proportion des radis gros (Modèle sans indicateur : N = 338 et P = 0,128 (Figure 14); Modèles incluant l'ISP₃ comme indice de fertilité - **(a) ≤ 5 %** : N = 105 et P = 0,118; **(b) 5-10 %** : N = 146 et P = 0,243; **(c) 10-15 %** : N = 31 et P = 0,214; **(d) > 15 %** : N = 56 et P = 0,627). Dans les sols dont l'ISP₃ se situe en dessous du seuil de saturation de 5 %, une tendance a été observée au seuil de P < 0,120. Les groupes de dose 1-15-15 et 4-90-100 kg P₂O₅/ha permettraient de minimiser la proportion de radis gros (35,5 et 37,7 % respectivement; **[b]**) en comparaison à la plus forte dose de P₂O₅ testée (150 kg/ha) qui la maximiserait (45,3 %; **[a]**). Toutefois, les traitements précités ne présentaient aucune différence significative par rapport aux autres traitements caractérisés par un apport de 0, 25-30 ou 50-60 kg P₂O₅/ha (41,9; 42,7 et 43,0 % respectivement; **[ab]**).

En termes de proportion de calibre par dose de phosphore, sans tenir compte d'indicateurs de fertilité, les radis de calibre gros représentaient entre 32 % (15 kg P₂O₅/ha) à 39 % (150 kg P₂O₅/ha) en moyenne du rendement vendable. Indépendamment de la dose de phosphore et de la classe de fertilité, les radis de calibre moyen ont été de 17,8 % que ceux de calibre gros. Comme pour le rendement, le phosphore a un effet limité sur le calibre des radis. La différence observée dans la proportion des calibres moyen et gros pourrait être expliquée par les doses de confort en N (40 ou 60 kg N/ha) et K (100 kg K₂O/ha) apportées aux UE de l'essai P. Selon les nouvelles valeurs de références pour la fertilisation azotée du radis (Tableau 11), des doses similaires (30 à 60 kg N/ha) sont recommandées en vue d'optimiser le rendement et la qualité de la production.

3.2.3.2 Masse et qualité du feuillage à la récolte

L'analyse du rapport de la masse des racines sur la masse du feuillage a été réalisée en fonction de la fertilisation phosphatée. Aucun effet significatif n'a été observé. Toutes doses confondues, la valeur moyenne du rapport Racine/Feuille a été peu variable et se situait autour de 3,0. À partir des 10 essais MIRVRF, l'indice de santé du feuillage a été évalué avant la récolte et analysé en fonction des doses de phosphore appliquées (Figure 15). Les sites inclus dans cette analyse ont été

caractérisés par un $ISP_3 \leq 10$. Des modèles non linéaires généralisés applicables aux variables multinomiales ont été développés avec et sans indicateur de fertilité. Aucun d'entre-deux n'a abouti à une différence significative de la fertilisation phosphatée sur l'indice de santé du feuillage. Indépendamment de la dose d'engrais phosphatés appliquée, environ 50 % des parcelles ont un feuillage sain et au moins 75 % des parcelles ont un indice de santé du feuillage ≤ 2 .

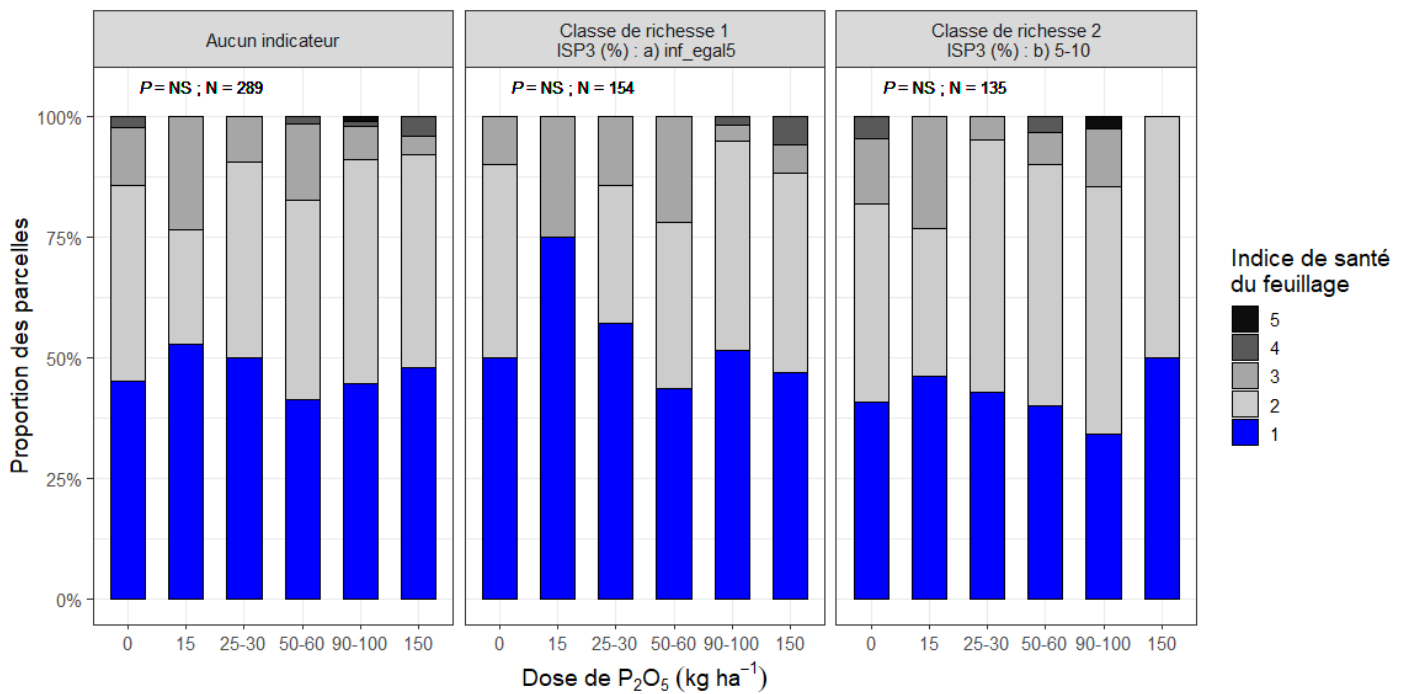


Figure 15. Évaluation de la santé du feuillage selon les doses de P₂O₅. N = Nombre d'observations.

3.2.3.3 Pertes à la récolte

Le radis est une culture qui nécessite un sol modérément fertile pour optimiser son niveau de rendement (ATLANTIC PROVINCES AGRICULTURE, 1988). Ainsi, des apports d'éléments nutritifs à des doses élevées pourraient affecter la qualité des racines de radis. À la récolte, les pertes totales ont donc été évaluées pour déterminer l'influence de la dose de phosphore sur la qualité. Les pertes ont été classifiées par catégorie et les valeurs moyennes sont présentées à la Figure 16. Globalement, les catégories de pertes ont représenté des proportions similaires du rendement total pour les différentes doses testées, à l'exception de la dose minimale de 15 kg P₂O₅/ha. Une analyse de variance et une comparaison de moyenne par groupe de doses n'ont montré aucune différence de la dose par classe d'ISP₃ (a) < 5 % : N = 92 et P = 0,135; 5-10 % : N = 140 et P = 0,481; 10-15 % : N = 29 et P = 0,757; > 15 % : N = 53 et P = 0,602).

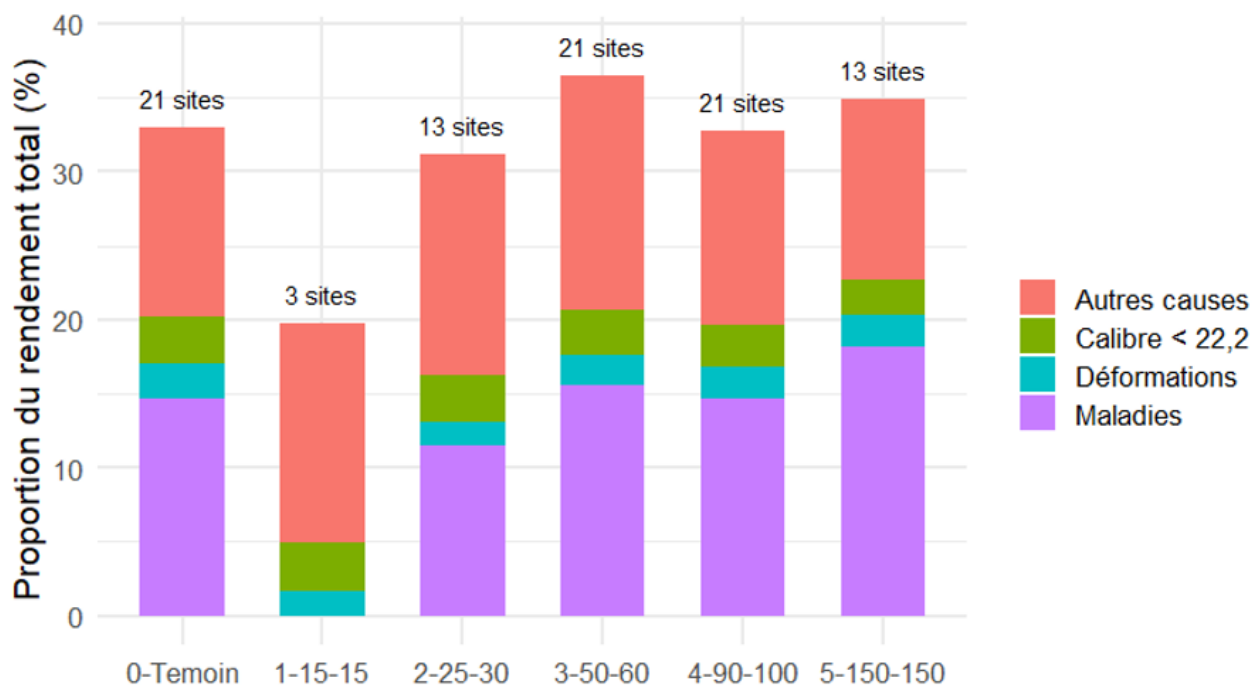


Figure 16. Catégories de pertes à la récolte par rapport au rendement total en fonction des traitements de fertilisation phosphatée.

3.2.4 Diagnostic nutritionnel et exportations en phosphore

Les exportations en P_2O_5 ont été calculées de manière séparée pour les radis et leur feuillage avec des taux d'humidité variant de 95 à 96 % dans les racines et de 90 à 94 % dans les feuilles (Tableau 14; Figure 17). Les exportations pour la population de tête ont été similaires dans les deux parties de la plante. Dans la population de tête, les exportations des racines de radis ont varié de 8 à 15 kg de P_2O_5 /ha avec une valeur moyenne de 11 kg de P_2O_5 /ha tandis qu'une valeur de 10 kg de P_2O_5 /ha a été calculée pour les feuilles (7-16 11 kg de P_2O_5 /ha). En ce qui a trait à la concentration en P_2O_5 /ha, les racines de radis ont présenté des niveaux de concentration de 1,5 fois moins que les feuilles.

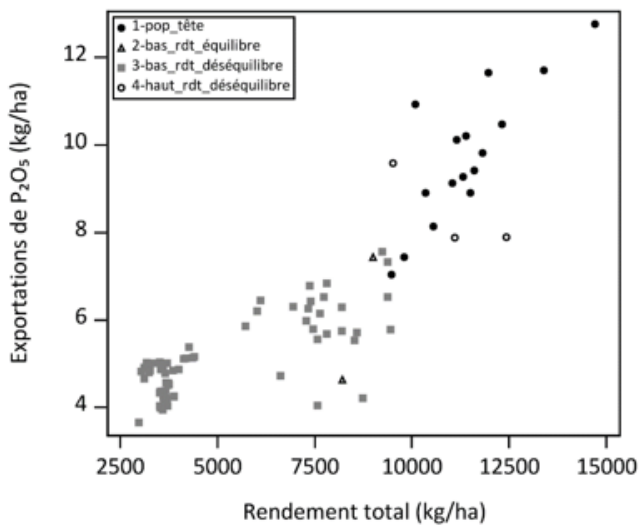
Tableau 14. Concentrations et exportations en P₂O₅ de radis (sans les feuilles) et du feuillage.

| | Humidité ⁽¹⁾ | | Exportations ⁽²⁾ | | | | |
|---|-------------------------|--|-----------------------------|---|----|------|----|
| | (%) | (kg P ₂ O ₅ /t) Moy | Éc-T | (kg P ₂ O ₅ /ha) Moy Med Min Max | | | |
| Radis sans feuilles | | | | | | | |
| Haut rendement et équilibre nutritionnel (« population de tête ») | 96 | 0,57 | 0,10 | 11 | 11 | 8 | 15 |
| Faible rendement et équilibre nutritionnel | 96 | 0,67 | 0,11 | 9 | 9 | 7 | 12 |
| Faible rendement et déséquilibre nutritionnel | 95 | 0,75 | 0,24 | 8 | 8 | 0,65 | 20 |
| Haut rendement et déséquilibre nutritionnel | 95 | 0,57 | 0,09 | 11 | 11 | 7 | 15 |
| Feuillage des radis | | | | | | | |
| Haut rendement et équilibre nutritionnel (« population de tête ») | 92 | 0,85 | 0,09 | 10 | 10 | 7 | 13 |
| Faible rendement et équilibre nutritionnel | 93 | 0,85 | 0,30 | 5 | 5 | 4 | 7 |
| Faible rendement et déséquilibre nutritionnel | 90 | 1,09 | 0,28 | 5 | 5 | 4 | 8 |
| Haut rendement et déséquilibre nutritionnel | 94 | 0,78 | 0,20 | 9 | 8 | 8 | 10 |
| Radis + feuilles | | | | | | | |
| Haut rendement et équilibre nutritionnel (« population de tête ») | 94 | 0,71 | 0,1 | 21 | 21 | 15 | 28 |
| Faible rendement et équilibre nutritionnel | 94,5 | 0,76 | 0,21 | 14 | 14 | 11 | 19 |
| Faible rendement et déséquilibre nutritionnel | 92,5 | 0,92 | 0,26 | 13 | 13 | 4,65 | 28 |
| Haut rendement et déséquilibre nutritionnel | 94,5 | 0,68 | 0,15 | 20 | 19 | 15 | 25 |

(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.

(A) Feuilles de radis



(B) Racines de radis

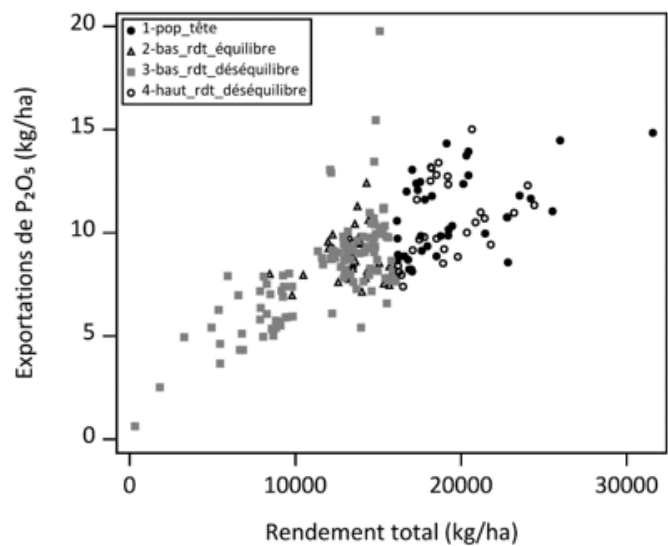


Figure 17. Répartition des exportations en Phosphore en fonction du rendement pour (A) le feuillage et (B) la racine des radis.

Globalement, les exportations en P₂O₅ de la culture de radis restent faibles. Elles varient peu à la fois entre les quatre groupes de populations du diagnostic nutritionnel, mais aussi entre le feuillage et la racine. En considérant les exportations cumulées de la population de tête pour les deux parties analysées, les exportations moyennes de la culture ont été de 20 kg de P₂O₅ à l'hectare. Pour chaque partie de la plante considérée, les exportations ont varié linéairement par rapport aux rendements (Voir) et étaient indépendantes de la variété de radis cultivée. Le feuillage représentait en termes de rendement environ la moitié des rendements obtenus pour les racines de radis.

3.3 Fertilisation phosphatée proposée

Les valeurs scientifiques de référence en fertilisation (VSRF) de P_2O_5 proposées pour la culture de radis en sol organique sont présentées au Tableau 15. En absence d'indicateur de rendement obtenu par calcul (test de partition), des classes de richesse d'ISP₃ ont été définies à partir du seuil de saturation en phosphore adopté lors de la mise à jour 2010 des grilles de fertilisation des cultures maraîchères (GREF, CRAAQ 2010) pour déterminer les doses optimales : a) Inf ou égal à 5 %, b) 5-10 %, c) 10-15 % et Sup à 15 %. Les mêmes classes ont été utilisées par la thèse doctorale de Guérin (Guérin, 2009). Pour les sols avec un ISP₃ inférieur ou égal à 5 %, le groupe de doses 25-30 kg P_2O_5 /ha a permis une augmentation du rendement significatif par rapport aux autres groupes de doses. Ainsi, la dose de 30 kg P_2O_5 /ha ayant eu une plus grande occurrence dans le groupement de doses a donc été proposée sous le seuil de 5 d'ISP₃. Pour les deux classes de fertilité comprises entre 5 et 15 % d'ISP₃, aucune différence significative n'a été calculée. Toutefois, une dose de P_2O_5 allant jusqu'à 30 kg P_2O_5 /ha a permis de réduire la variabilité de la réponse et d'obtenir des ROM moyens calculés > 1. Des probabilités de pertes plus importantes étaient mesurées avec un apport du 1^{er} groupe de doses testé (1-15-15) dans la classe de fertilité comprise entre 5 et 10 % d'ISP₃ et le groupe minimal de doses testées pour la classe 10-15 % a été de 25-30 kg P_2O_5 /ha. Les exportations maximales de la culture étant de 28 kg P_2O_5 /ha, une dose de 30 kg P_2O_5 /ha permettra de les couvrir dans leur totalité. De ce fait, un intervalle de dose variant de 0 à 30 kg P_2O_5 /ha a donc été retenu. À l'intérieur de cet intervalle, la dose à appliquer sera décidée par l'agronome selon son jugement et l'historique de fertilité du champ. Au-delà de 15 % d'ISP₃, aucune dose de phosphore n'est recommandée. Selon le modèle sans indicateur, une dose de 25-30 kg P_2O_5 /ha permettrait d'optimiser le rendement indépendamment de la richesse de sol en phosphore. Pour une meilleure régie en fertilisation phosphatée, le modèle avec indicateur qui permet de mieux moduler la dose de phosphore a été retenu. Ces doses sont inférieures aux actuelles recommandations du Québec et de l'Ontario, mais sont comparables à celles du Michigan (Tableau 16).

Tableau 15. Fertilisation phosphatée du radis en sol organique – Valeurs scientifiques de référence en fertilisation.

| Classe de fertilité ISP ₃ (%) ⁽¹⁾ | Période d'application | VSRF ⁽²⁾ (kg P_2O_5 /ha) |
|--|-----------------------|--|
| ≤ 5,0 | Au semis | 30 ⁽³⁾ |
| 5,1 – 15,0 | | 0-30 ⁽⁴⁾ |
| > 15,0 | | 0 ⁽⁵⁾ |

(1) ISP₃ : indice de saturation en phosphore = $(PM3/31) / ((AlM3/27) + 5 \times (FeM3 / 56)) \times 100 \%$, éléments extraits au Mehlich-3 (Mehlich, 1984)

(2) VSRF : Valeurs scientifiques de référence en fertilisation – **Recommandations pour un premier semis de radis en tant que première culture de la saison.**

(3) Dose optimale de 30 P_2O_5 obtenue par l'analyse de variance.

(4) Intervalle de 0 à 30 P_2O_5 proposé. Suivant le contexte de production, la dose de 30 P_2O_5 permet d'avoir moins de variabilité dans la réponse.

(5) En absence de différence entre les traitements et réponse, la dose nulle est recommandée.

Indice de saturation des sols en phosphore



L'indice de saturation du sol en phosphore (ISP₃) met en rapport la teneur en P par rapport au Al et au Fe, selon l'équation suivante : $(P/31) / (Al/27 + 5 \times Fe/56)$. Conséquemment, son utilisation ne nécessite pas une correction pour tenir en compte la masse volumique du sol. Il en aurait été différent si la teneur d'un élément seul devait être considérée, par exemple le P_{M3} .

Tableau 16. Comparaison des recommandations en P₂O₅ pour la production de radis au Canada et aux États-Unis

| Provinces/États | Indicateurs ¹ | Dose P ₂ O ₅ (kg/ha) | Source |
|-----------------|---------------------------------|--|-------------------------|
| Québec (CAN) | P _{M3} : 0-50 kg/ha | 150 | CRAAQ (2010) |
| | P _{M3} : 51-100 kg/ha | 130 | |
| | P _{M3} : 101-150 kg/ha | 115 | |
| | P _{M3} : 151-200 kg/ha | 105 | |
| | P _{M3} : 201-300 kg/ha | 80 | |
| | P _{M3} : 301-400 kg/ha | 50 | |
| | P _{M3} : 401+ kg/ha | 20 | |
| Ontario (CAN) | 0-9 mg P/L | 100 | MAAARO (2011) |
| | 10-15 mg P/L | 90 | |
| | 16-20 mg P/L | 80 | |
| | 21-25 mg P/L | 70 | |
| | 26-30 mg P/L | 60 | |
| | 31-40 mg P/L | 50 | |
| | 41-50 mg P/L | 30 | |
| | 51-60 mg P/L | 20 | |
| | 61+ mg P/L | 0 | |
| Michigan (US) | 40 ppm | 70 | Warncke et coll. (2004) |
| | 60 ppm | 25 | |
| | 70-85 ppm | 5 | |
| | 100+ ppm | 0 | |

¹ La méthode d'analyses de l'indicateur doit être prise en compte pour la comparaison par classe de richesse du sol en phosphore.

4 FERTILISATION POTASSIQUE

4.1 Portrait et représentativité des données

La répartition des blocs des essais K à travers les différentes classes de propriétés de sol (0-30 cm) est présentée au Tableau 17. Dans l'ensemble, les essais ont été menés sur des sols acides avec des pH variant de 4,6 à 6,6 (valeur médiane de 5,6). Cependant, plus de la moitié des blocs avait un pH dans la plage optimale de 5,6 à 6,5. De plus, la quasi-totalité des blocs avait une teneur en MO_{PAF} supérieure à 70 %. Par conséquent, le pouvoir tampon de la MO devrait permettre de réduire l'effet négatif du pH faible sur la nutrition de la plante (Krull et al., 2004). Les teneurs en K_{M3} ont été caractérisées à la fois par une large répartition avec des valeurs minimales et maximales de 66 et 1086 ppm (56-912 kg/ha) respectivement, et une bonne répartition des blocs à l'intérieur des classes de propriétés de sol. En rappel, ces valeurs utilisent la masse volumique réelle des sols organiques, ainsi que leur facteur de conversion spécifique de 0,84 (ppm en kg/ha) en remplacement du facteur de 2,24 des sols minéraux. Un facteur de 1,11 permet de passer de kg/ha (cuillère non pesée) à ppm calculée avec cuillère pesée (voir section 1.3.1). Globalement, les données ont été suffisamment bien distribuées et représentatives des principales conditions de sols organiques du Québec.

Tableau 17. Répartition des blocs des essais K de radis selon différentes classes de propriétés de sol après la validation des données.

| pH _{eau} ⁽¹⁾ | Blocs (%) | MO_{PAF} (%) ⁽²⁾ | Blocs (%) | K_{M3} (ppm) ⁽³⁾ | K_{M3} (kg/ha) ⁽⁴⁾ | Blocs (%) |
|----------------------------------|-----------|-------------------------------|-----------|-------------------------------|---------------------------------|-----------|
| ≤ 5,5 | 35 | ≤ 70 | 2 | ≤ 238 | ≤ 200 | 20 |
| 5,5 – 6,0 | 38 | 70-80 | 16 | 238-476 | 200 – 400 | 53 |
| 6,0 – 6,5 | 22 | 80-90 | 73 | 476-714 | 400 – 600 | 14 |
| 6,5 – 7,0 | 5 | > 90 | 9 | 714-952 | 600-800 | 12 |
| > 7,0 | 0 | - | - | > 852 | > 800 | 1 |

⁽¹⁾ Le pH optimal est de 5,6 pour les radis en sol organique (CRAAQ, 2010).

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

⁽³⁾ K_{M3} : K extrait par la méthode Mehlich-3 (1984). Les valeurs tiennent compte de la masse réelle de l'échantillon de la cuillère de 3 cc.

⁽⁴⁾ Facteur de conversion de 0,84 pour les sols organiques en considérant une profondeur de sol moyenne de 30 cm (Khiari et al., 2017).

4.2 Détermination des doses agronomiques optimales

4.2.1 Recherche d'indicateurs de fertilité du sol

Divers paramètres physico-chimiques des sols sont susceptibles d'influencer la réponse du radis à la fertilisation potassique. Pour l'ensemble du jeu de données, aucun indicateur de fertilité en potassium n'a été trouvé. Toutefois, comme pour l'azote, la période de semis avait un effet significatif sur la réponse de la culture à la fertilisation potassique. Un seuil de jours juliens de 147,5 (28 mai) a été déterminé à l'aide d'une analyse de répartition (Cate-Nelson, 1971). La période de semis 1 regroupe les sites semés avant le 28 mai et la période de semis 2, ceux semés à partir du 28 mai. Les performances du modèle de répartition des jours juliens (référence 1^{er} janvier) sont présentées au Tableau 18.

Tableau 18. Valeurs critiques de jours juliens selon le test de Cate-Nelson pour les données des essais K de radis

| Indicateur de rendement ⁽¹⁾ | N_{obs} ⁽²⁾ | Valeur critique | RRel ⁽³⁾ (%) | Sensitivité | Spécificité | Précision | Valeur de P |
|---|--------------------------|-----------------|-------------------------|-------------|-------------|-----------|-------------|
| Toutes données | | | | | | | |
| Période de semis (<i>jours juliens</i>) | 57 | 147,5 | 86 | 0,65 | 0,74 | 0,70 | < 0,001 |
| Période de semis 1 | | | | | | | |
| K_{M3} (ppm) | 24 | 399,7 | 85 | 0,86 | 0,5 | 0,71 | 0,085 |

(1) Les jours juliens se réfèrent au nombre de jours écoulés depuis le 1^{er} janvier de l'année de l'essai et la date de semis.

(2) N_{obs} : nombre d'observations.

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

Pour chaque période de semis, le potentiel de plusieurs indicateurs physico-chimiques du sol à expliquer la réponse à la fertilisation potassique a été testé : la teneur en K_{M3} , la CEC, les ratios $K/(Ca + Mg)$ et K_{M3}/CEC . Un seuil de teneur en K_{M3} statistiquement significatif a été obtenu pour la période de semis 1 alors qu'aucun des paramètres n'a pu être retenu pour la période 2. Toutefois, le seuil obtenu pour la première période a été testé pour la seconde pour étudier la réponse des sites au-delà de ce seuil pour établir une limite à partir de laquelle un apport de K ne serait pas recommandé. À noter, le seuil de 399,7 ppm représente une valeur de 336 kg/ha lorsque le poids de la cuillère de sol est considéré et que le facteur de 0,84 est utilisé pour convertir en kg/ha. Cependant, tel que le calcul est déterminé actuellement (volume de 3 cc, facteur 2,24), cette valeur serait de 359 kg/ha. Une légère surestimation de la richesse du sol (moins de 7 %) se fait avec la cuillère non pesée. Cependant, indépendamment de la méthode d'analyse, cela ne devrait représenter aucun risque sur l'applicabilité des nouvelles VSRF K de radis.

4.2.2 Effet de la dose de potassium sur le rendement

Les ANOVA réalisées sur l'ensemble des données sans indicateurs, ou selon les indicateurs de teneurs en K_{M3} du sol pour chaque période de semis (Période 1 et Période 2) sont résumées à la Figure 18.

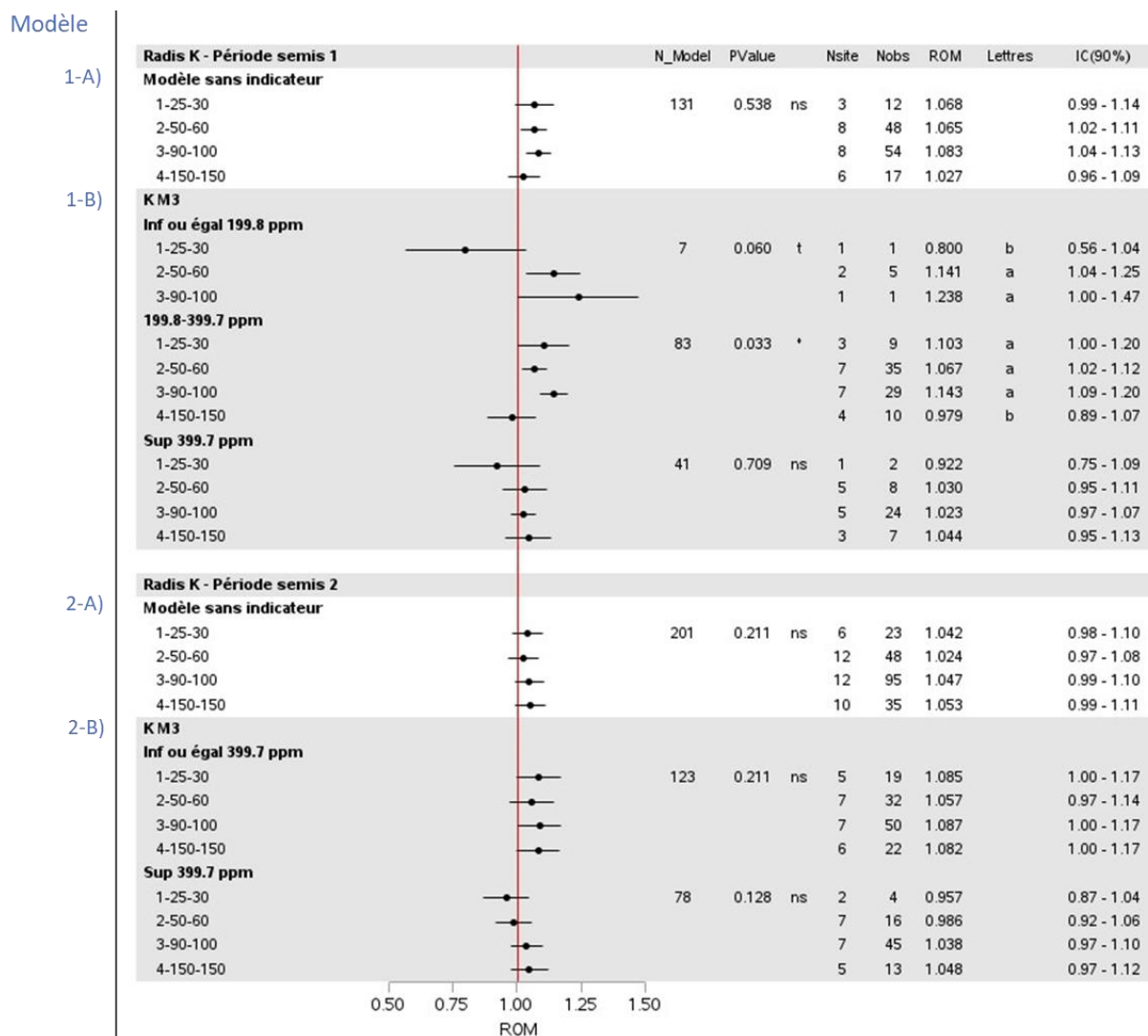


Figure 18. Résultats des analyses de variance sur la réponse du radis aux doses croissantes de potassium. N_model : nombre d'observations du modèle; Nsite : nombre de sites; Nobs : nombre d'observations; ROM : rapport de rendements (rendement parcelle fertilisée/rendement parcelle témoin); IC : Intervalle de confiance. Les moyennes d'une même catégorie qui ne partagent pas la même lettre sont significativement différentes au seuil $P < 0,12$.

Pour la période de semis 1 définie comme les sites semés avant le 28 mai, aucune différence significative n'a été observée entre les différents groupes de doses lorsque toutes les catégories de sol sont analysées conjointement (Figure 18 Modèle 1-A). Ainsi, toutes doses confondues, les augmentations de rendement ont varié de 2,7 à 8,3 % (ROM de 1,027 à 1,083) pour un ROM moyen de 6 % et le groupe de doses minimal (25-30 kg K₂O/ha) s'est avéré suffisant pour optimiser le rendement.

Dans le modèle avec indicateur de sol (Figure 18 Modèle 1-B), trois classes de richesses ont été définies en divisant par 2 le seuil critique de K_{M3} déterminé pour la première période de semis (Méthode de Cope-Rouse): a) ≤ 199,8 ppm; b) 199,8-399,7 ppm et c) ≥ 399,7 ppm. À des niveaux de richesse du sol en K_{M3} ≤ 199,8 ppm, une forte tendance à un effet significatif a été obtenue ($P = 0,060$) et le groupe de doses de 50-60 kg de K₂O/ha a été considéré comme groupe de doses optimales. Pour cette classe de fertilité, à ce groupe de doses, l'augmentation du rendement a monté jusqu'à 25 % par rapport au témoin, pour un gain moyen de 14 %. Entre 199,8-399,7 ppm, le groupe de doses 25-30 kg K₂O/ha a permis d'optimiser le gain de rendement avec une augmentation de rendement de 10,3 % en moyenne. Au-delà de 399,7 ppm K_{M3}, la fertilisation potassique n'a pas eu d'incidence sur les gains de rendements, lesquels étaient nuls sinon très modestes par rapport au témoin dans cette catégorie de sol fortement pourvue en K_{M3}.

Pour la deuxième période de semis (à partir du 28 mai; Figure 18 Modèle 2-A), dans le modèle sans indicateur, la fertilisation potassique a entraîné des gains de rendement plus faible que lors de la période 1, soit de 2 à 5 % (ROM = 1,024 à 1,053) pour un ROM moyen de 4 % par rapport au témoin. Aucune différence entre les groupes de doses n'a été observée, par conséquent, le premier groupe de doses (25-30 kg K₂O/ha) est considéré apte à optimiser le gain de rendement (augmentation de 4,2 % en moyenne). Afin de pouvoir vérifier la possibilité de créer une classe de sol pour laquelle une recommandation nulle serait sécuritaire, le seuil de 399,7 ppm K_{M3} déterminé pour la période 1 a été testé pour la période 2. Selon ce modèle (2-B), dépassé le seuil de K_{M3} > 399,7 ppm, l'apport du groupe de doses minimal proposé par le modèle sans indicateur n'a revêtu aucune utilité.

Globalement, la réponse à la fertilisation potassique a permis des augmentations de rendement pouvant atteindre jusqu'à 49 % par rapport au témoin. Le ratio N/K, pour étudier une éventuelle carence en azote sur la réponse, n'a pas été pris en compte puisque la totalité des sites ont reçu entre 40 et 60 kg N/ha. Ce qui est, à la lumière de la nouvelle grille N (voir section Tableau 11), une condition suffisante d'alimentation en N.

4.2.3 Effet de la dose de potassium sur les calibres, la qualité et les pertes à la récolte

4.2.3.1 Calibres à la récolte

Les radis vendables ont été classés à la récolte, suivant les critères de diamètre décrits au Tableau 6 (p. 20), pour évaluer l'effet de la dose de potassium sur le calibre des radis. Les proportions des calibres par rapport au rendement vendable sont présentées à la Figure 19. En moyenne et indépendamment de la dose de potassium, 49 % des radis étaient de calibre moyen (47,1 - 52,3 %); 38 % de calibre gros et 14 % étaient des jumbos (11,0 – 15,1 %).

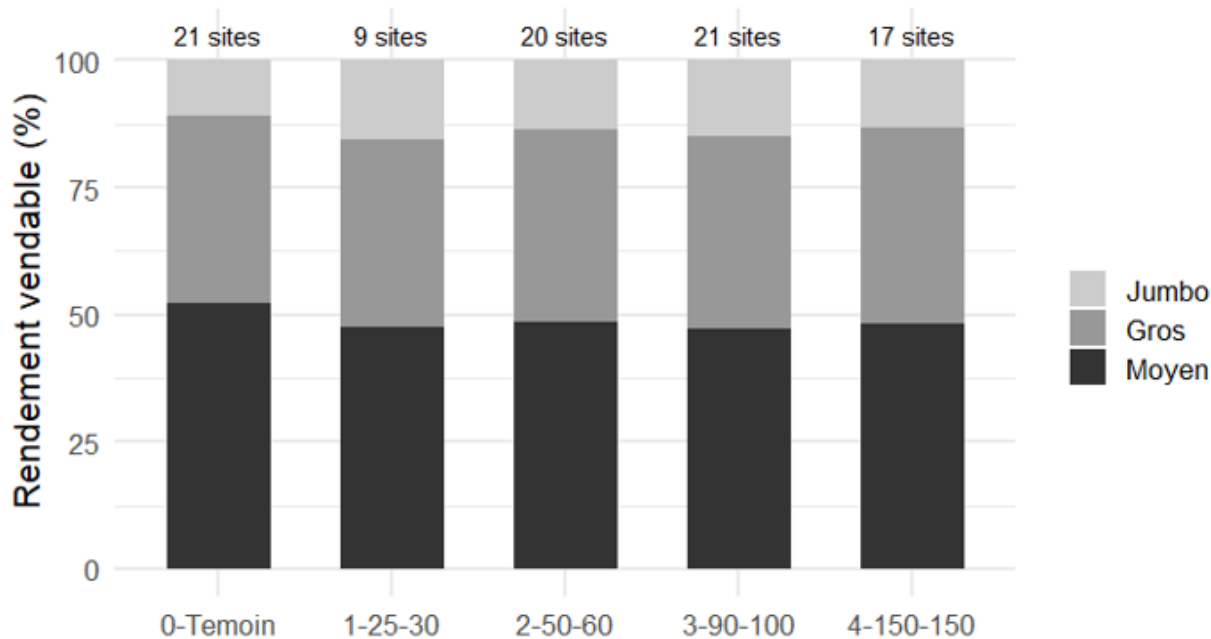


Figure 19. Proportion des calibres vendables en fonction des doses de potassium appliquées à la culture de radis en sol organique

Une analyse de variance par période de semis a permis de démontrer un effet significatif de la dose de K sur la proportion des calibres moyen pour la première période de semis ($P = 0,029$; $N_{\text{obs}} = 133$) tandis qu'aucun effet n'a été obtenu pour la deuxième période de semis ($P = 0,229$) (voir Figure 20). Pour la période de semis, une proportion de radis de calibre moyen assez stable a été calculée pour les doses intermédiaires et les doses de limites (0 et 150 kg K₂O/ha) maximisent cette proportion. Aucune différence n'a été observée par classe de richesse en potassium pour la première période de semis. En considérant le seuil de non-réponse (Figure 21), la deuxième période de semis n'a non plus pas présenté de différence au-delà de 400 ppm tandis que les doses de 0 et 150 kg K₂O/ha ont donné les proportions de radis moyens les plus élevés sous le seuil de 400 ppm.

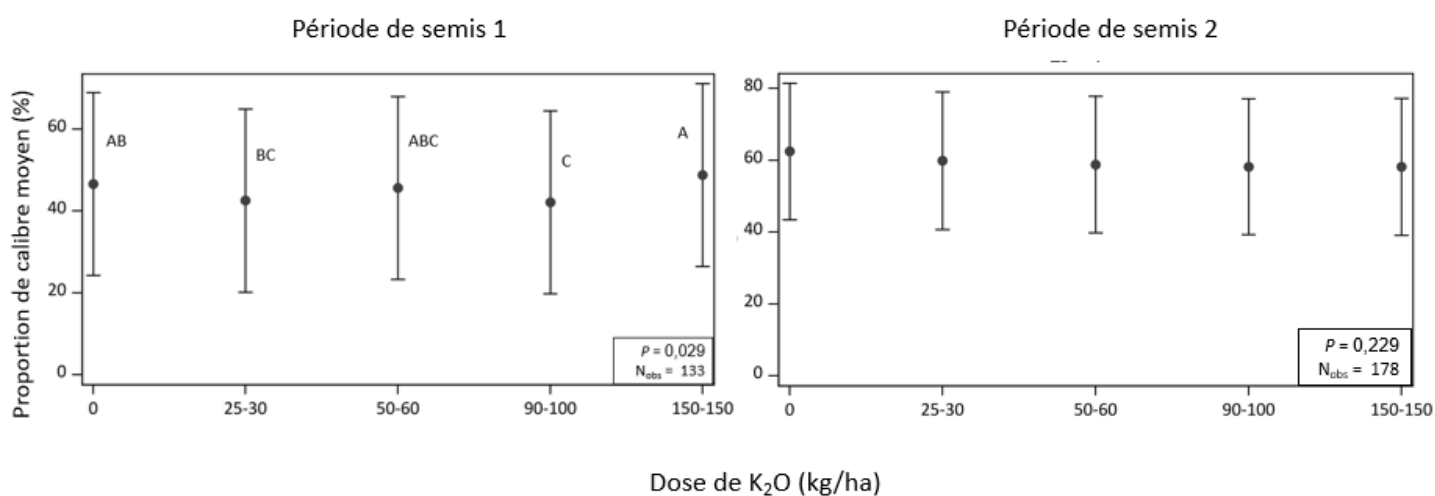


Figure 20. Proportion des calibres moyens vendables en fonction des doses de potassium appliquées à la culture de radis en sol organique et la période de semis

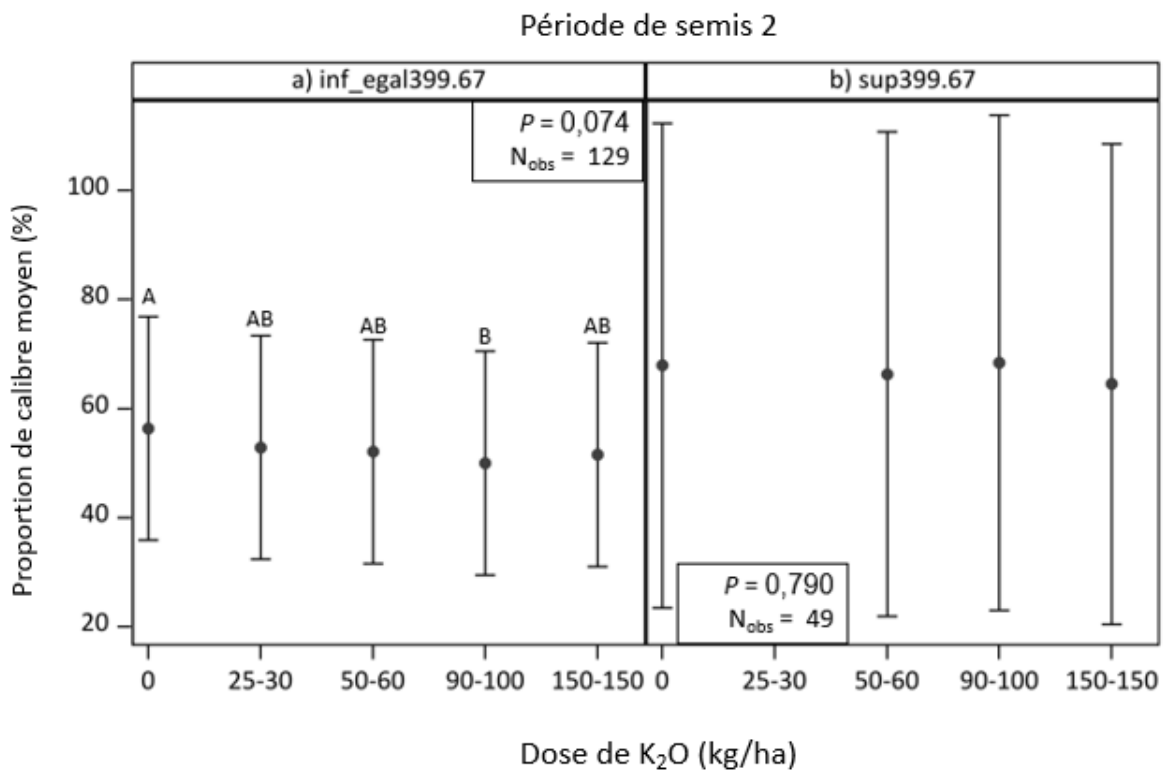


Figure 21. Proportion des calibres moyens en fonction des doses de potassium appliquées à la culture de radis en sol organique et des classes de fertilité en K_{M3} pour la période de semis 2.

Une analyse de variance des radis de calibre gros a été également réalisée en fonction de la fertilisation potassique. Aucune différence significative n'a été calculée avec l'ensemble du jeu de données (Figure 24; $P = 0,625$; $N_{obs} = 311$), ni en fonction des périodes de semis, ni en fonction des classes de fertilité des sols en potassium.

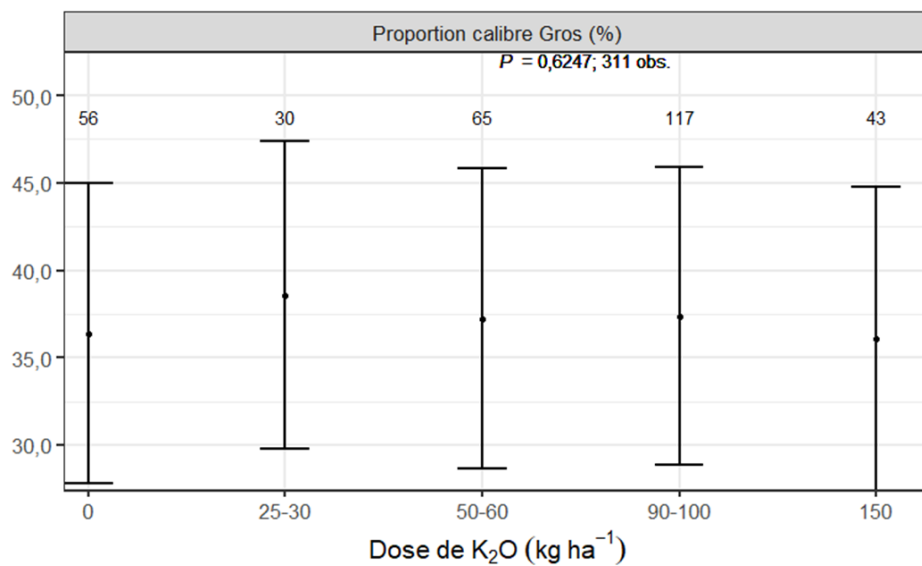


Figure 22. Proportion des calibres gros en fonction des doses de potassium appliquées à la culture de radis en sol organique.

4.2.3.2 Masse et qualité du feuillage à la récolte

L'analyse du rapport de la masse des racines sur la masse du feuillage a été réalisée en fonction de la fertilisation potassique. Aucun effet significatif n'a été observé. Toutefois, la valeur moyenne du rapport Racine/Feuille semble plus faible pour la première période de semis (1,82) comparativement à la deuxième période de semis (3,91). À partir des 10 essais MIRVRF, l'indice de santé du feuillage a été évalué avant la récolte et analysé en fonction des doses de potassium appliquées (Figure 23). Des modèles non linéaires généralisés applicables aux variables multinomiales ont été développés avec et sans indicateur de fertilité. Aucun d'entre-deux n'a abouti à une différence significative de la fertilisation potassique sur l'indice de santé du feuillage au seuil $P < 0,05$. Néanmoins, une tendance à un effet significatif a été observée pour la deuxième période de semis sans indicateur de richesse ($P = 0,052$; $N = 162$). Une probabilité plus grande à obtenir un indice supérieur à 2 a été associée au groupe de doses 50-60. Cependant, environ 75 % des parcelles n'atteignent pas un indice de 3 et aucun indice supérieur ou égal à 4 n'a été observé pour la période de semis 2.

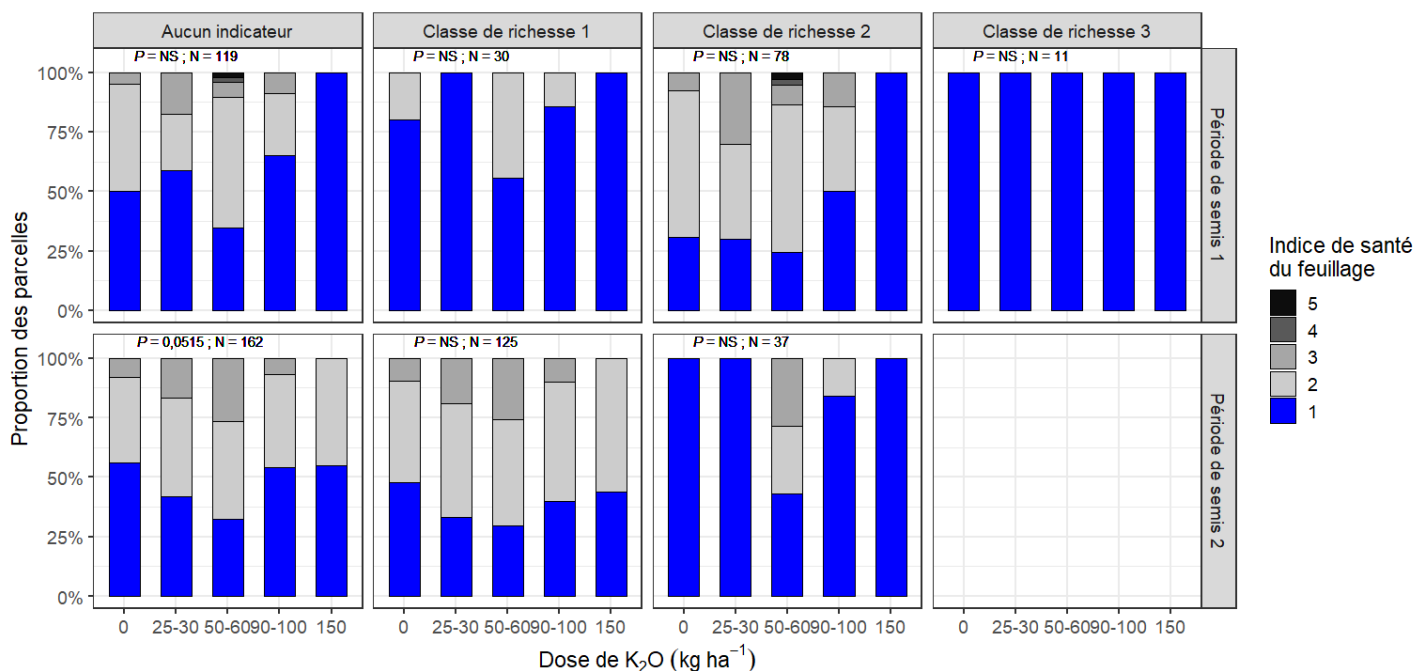


Figure 23. Évaluation de la santé du feuillage selon les doses de K_2O . N = Nombre d'observations.

4.2.3.3 Pertes à la récolte

Le radis est une culture qui nécessite un sol modérément fertile pour optimiser son niveau de rendement (Atlantic Provinces Agriculture, 1988). Toutefois, des apports d'éléments nutritifs à des doses élevées pourraient affecter la qualité des racines de radis. À la récolte, les pertes totales ont été évaluées pour déterminer l'influence de la dose de potassium sur la qualité. Les pertes ont été classifiées par catégories et les valeurs moyennes sont présentées à la Figure 24. Globalement, la maladie constitue la première cause de déclassement pour l'ensemble des doses. À l'exception des cas de maladies où les traitements caractérisés par les plus petites doses testées (1-25-30) et la dose maximale de 150 $kg\ K_2O/ha$ ont présenté des valeurs moyennes plus faibles, les autres catégories de pertes sont similaires pour l'ensemble des doses.

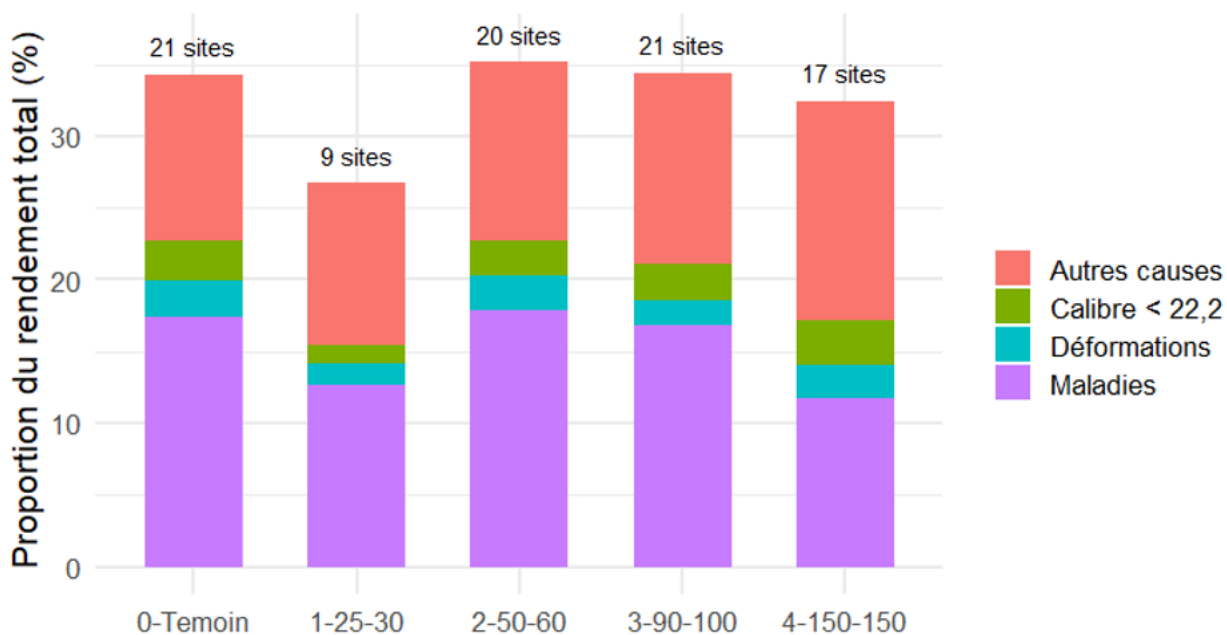


Figure 24. Catégories de pertes à la récolte par rapport au rendement total en fonction des traitements de fertilisation potassique.

Une analyse des pertes par période de semis a été également effectuée. Pour la première période de semis, un effet significatif de la dose a été constaté ($N_{obs} = 102$; $P = 0,123$). Pour cette première période de semis, la dose de 25-30 permet de minimiser les pertes. Cependant, aucune différence significative n'a été calculée entre la dose minimale testée et la dose maximale (60 K_2O) proposée pour la première période. En ce sens, nos doses optimales seraient adéquates pour minimiser les pertes. Pour la période de semis 2, l'analyse de variance des pertes n'a pas présenté un effet significatif de la dose de potassium ($N_{obs} = 173$; $P = 0,440$).

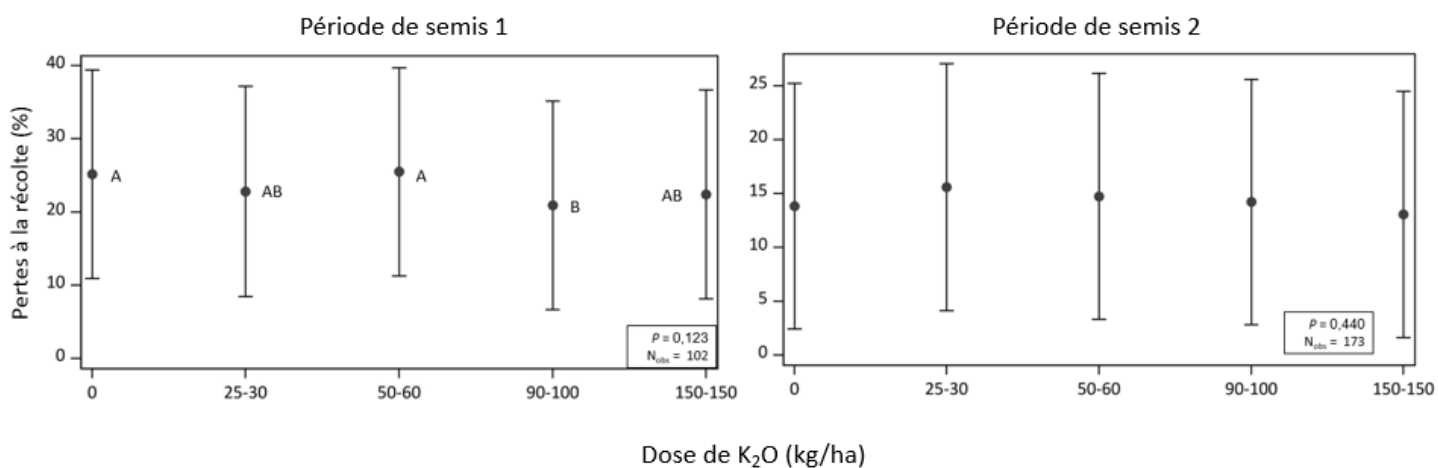


Figure 25. Pertes à la récolte (%) par rapport au rendement total en fonction des traitements de fertilisation potassique – Sans indicateur.

4.2.4 Diagnostic nutritionnel et exportations

À l'instar des essais précédents (N et P), le diagnostic nutritionnel a été effectué sur la biomasse récoltée. Les parties aériennes et racinaires du radis ont été analysées séparément. Les valeurs calculées d'humidité, de concentrations et d'exportations en K₂O du radis en fonction du diagnostic nutritionnel sont présentées au Tableau 19 et à la Figure 26. Pour un radis sans feuillage (partie racinaire seulement), la concentration de K₂O de la population de tête dans les tissus était de 3,16 ± 0,47 kg/t à une humidité de 96 %. En considérant un rendement moyen de 19 299 kg/ha, les exportations de tête ont été de 59 kg K₂O/ha et ont varié de 43 à 76 kg K₂O/ha. Toujours pour la population de tête de radis, la concentration de K₂O dans les tissus du feuillage était de 4,01 ± 0,43 à une humidité de 92 %. Avec un rendement moyen de 11 398 kg/ha, le feuillage a représenté des exportations en K₂O de 46 kg/ha en moyenne. Pour la partie racinaire comme pour le feuillage, les exportations ont généralement varié de façon linéaire en fonction du rendement (Figure 26) et étaient indépendantes de la variété de radis cultivée. Pour un plant entier de radis (racine et feuillage), les exportations totales de la population de tête se sont élevées à 105 kg K₂O/ha en moyenne.

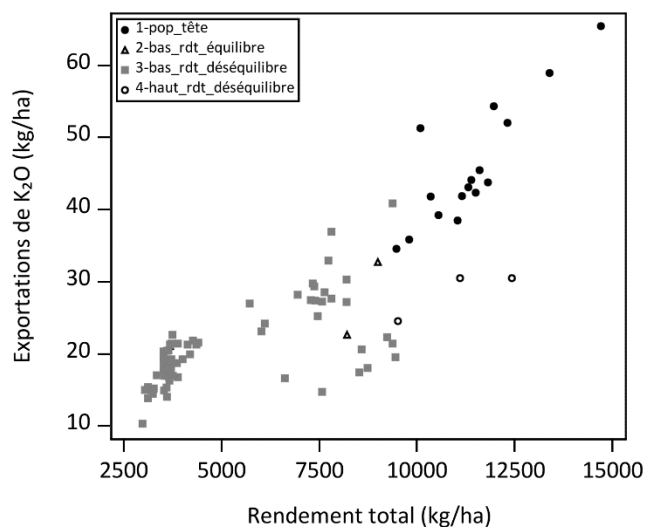
Tableau 19. Concentrations et exportations en K₂O des radis (partie racinaire et feuillage) selon le diagnostic nutritionnel.

| | Humidité ⁽¹⁾ | | Exportations ⁽²⁾ | | | | |
|--|-------------------------|--------------------------------|-----------------------------|---|------------|-----------|------------|
| | (%) | (kg K ₂ O/t) Moy | Éc-T | (kg K ₂ O/ha) Moy Med Min Max | | | |
| Radis sans feuilles | | | | | | | |
| Haut rendement et équilibre nutritionnel (« population de tête ») | 96 | 3,16 | 0,47 | 59 | 57 | 43 | 76 |
| Faible rendement et équilibre nutritionnel | 96 | 3,82 | 0,64 | 50 | 50 | 38 | 65 |
| Faible rendement et déséquilibre nutritionnel | 95 | 4,21 | 0,94 | 47 | 49 | 3 | 103 |
| Haut rendement et déséquilibre nutritionnel | 95 | 3,20 | 0,39 | 60 | 60 | 46 | 83 |
| Feuillage des radis | | | | | | | |
| Haut rendement et équilibre nutritionnel (« population de tête ») | 92 | 4,01 | 0,43 | 46 | 44 | 35 | 66 |
| Faible rendement et équilibre nutritionnel | 93 | 4,05 | 1,54 | 26 | 23 | 21 | 33 |
| Faible rendement et déséquilibre nutritionnel | 90 | 4,38 | 1,02 | 21 | 19 | 10 | 41 |
| Haut rendement et déséquilibre nutritionnel | 94 | 2,60 | 0,15 | 29 | 31 | 25 | 31 |
| Radis + Feuilles | | | | | | | |
| Haut rendement et équilibre nutritionnel (« population de tête ») | 94 | 3,59 | 0,45 | 105 | 101 | 78 | 142 |
| Faible rendement et équilibre nutritionnel | 94,5 | 3,94 | 1,09 | 76 | 73 | 59 | 98 |
| Faible rendement et déséquilibre nutritionnel | 92,5 | 4,3 | 0,98 | 68 | 68 | 13 | 144 |
| Haut rendement et déséquilibre nutritionnel | 94,5 | 2,9 | 0,27 | 89 | 91 | 71 | 114 |

(1) Humidité après séchage à 60-70 °C pendant 72 h ou jusqu'à l'atteinte d'une masse constante.

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

(A) Feuilles de radis



(B) Racines de radis

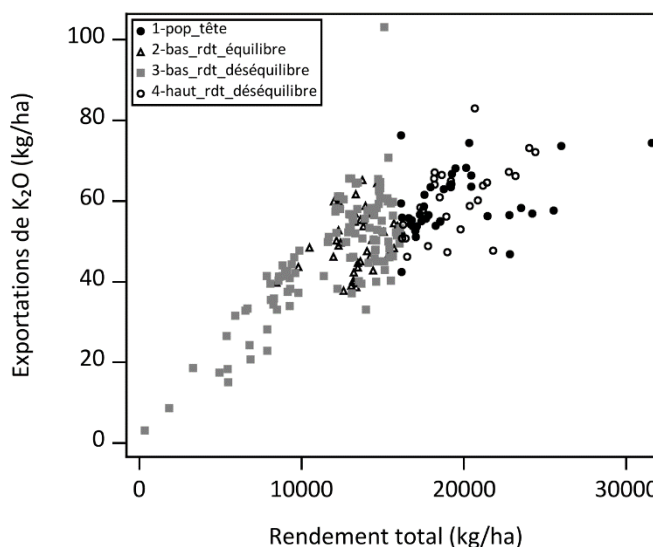


Figure 26. Répartition des exportations en K en fonction du rendement pour (A) le feuillage et (B) la racine des radis.

4.3 Fertilisation potassique proposée

Les VSRF de K_2O proposées pour la culture du radis sont présentées au Tableau 20. La date de semis et la teneur en K_{M3} des sols ont servi d'indicateurs permettant de distinguer les différentes classes de fertilité des sols. Par ailleurs, aucun ajustement des doses proposées comme VSRF n'a été nécessaire sur la base des analyses de calibre ou de pertes (maladie, déformation, calibre trop petit ou autre).

Pour la culture du radis semée avant le 28 mai, trois classes de richesses de sol ont été définies à partir du seuil de 399,7 ppm K_{M3} déterminé par le test de partition de Cate-Nelson et la moitié de sa valeur (méthode Cope-Rouse; voir section 4.2). Les seuils finaux de ces classes ont été arrondis à l'unité : a) inférieure ou égale à 200 ppm; b) 201-400 ppm et c) 401 ppm et plus. Dans les sols dont le niveau de K_{M3} est inférieur ou égal à 200 ppm, la dose de 60 kg K_2O/ha (médiane du groupe de doses 50-60) a été retenue comme dose agronomique optimale, menant à 14,1 % de gains de rendements en moyenne, par rapport au témoin 0K. Toujours pour la 1^e période de semis (avant le 28 mai), dans les sols comportant entre 201 et 400 ppm K_{M3} , la dose agronomique optimale de 30 kg K_2O/ha (médiane du groupe de doses 25-30) est proposée. Au-delà de 399,7 ppm K_{M3} , la fertilisation potassique n'a pas eu d'incidence sur les gains de rendements, lesquels étaient nuls sinon très modestes par rapport au témoin dans cette catégorie de sol fortement pourvue en K_{M3} . La forte teneur en K_{M3} du sol suppose que celui-ci est en mesure de fournir suffisamment de K à la culture. Un apport potassique nul est ainsi suggéré.

Pour la deuxième période de semis (à partir du 28 mai; Figure 18B), en absence d'un seuil déterminé par la méthode Cate-Nelson, le seuil de non-réponse de la 1^e période de semis (400 ppm K_{M3}) a été réutilisé pour l'établissement d'une teneur en K_{M3} au-delà duquel l'apport de potassium ne serait plus bénéfique. Sous le seuil de 66 ppm de K_{M3} (valeur minimale K_{M3} observée), les exportations ont été proposées. Dans les sols dont la teneur en K_{M3} était inférieure à 400 ppm, en absence de différences de ROM entre les groupes de doses, la dose de 30 kg K_2O/ha (médiane du groupe de doses 25-30) est proposée, laquelle permet l'obtention de 8,5 % de gains moyens par rapport à un témoin 0K. Au-delà de 400 ppm K_{M3} , en absence de différence significative entre les doses et l'absence de gains, une dose nulle est proposée. Les doses proposées dans le cadre de cette étude sont inférieures aux recommandations faites actuellement au Québec et ailleurs (Tableau 21).

Note : En vue de faciliter l'utilisation des VSRF dans les grilles officielles MAPAQ, il a adopté en comité scientifique la proposition de l'IRDA consistant à remplacer les périodes de semis 1 et 2 respectivement, par des semis hâtif et tardif définis autour de la date du 1^e juin par arrondi du 147,5^{ème} jour julien qui correspond au 28 mai.

Tableau 20. Fertilisation potassique du radis – Valeurs scientifiques de référence en fertilisation.

| Période de semis ⁽¹⁾ | Classe de fertilité K Mehlich-3 ⁽²⁾ (ppm) | Période d'application | VSRF ⁽³⁾ (kg K ₂ O/ha) |
|---|---|-----------------------|---|
| Semis hâtif (Avant le 1 ^e juin) | ≤ 199,8 | Au semis | 60 ⁽⁴⁾ |
| | 199,9-399,7 | | 30 ⁽⁴⁾ |
| | > 399,7 | | 0 ⁽⁵⁾ |
| Semis tardif (À partir du 1 ^e juin) | ≤ 66 | Au semis | 60 ⁽⁴⁾ |
| | 67-400 | | 30 ⁽⁴⁾ |
| | > 400 | | 0 ⁽⁵⁾ |

- (1) La période de semis correspond au seuil du 147,5^{ème} jour julien déterminé lors du test de partition Cate-Nelson (voir section 4.2) et arrondi au 1^{er} juin.
(2) Les ppm sont utilisées afin d'éviter un biais quant à la masse volumique du sol. **Pour convertir les valeurs de ppm en kg/ha pour un sol organique, appliquer le facteur de conversion de 0,84 (ppm x 0,84 = kg/ha en sol organique).**
(3) VSRF : Valeurs scientifiques de référence en fertilisation – **Recommandations pour un premier semis de radis en tant que première culture de la saison.**
(4) Dose (ou médiane du groupe de doses) agronomique optimale dans cette catégorie de sol.
(5) En absence de différence entre les traitements, la dose médiane du plus petit groupe de doses testées est recommandée.
(6) Dose nulle proposée considérant l'absence de réponse et la richesse du sol en K_{M3}.

Sols organiques : importance de valider la méthodologie du laboratoire



Une sensibilisation pourrait être faite auprès des conseillers et des producteurs sur l'importance de la méthode employée par les laboratoires d'analyses afin de mieux comprendre comment sont calculées les quantités (kg/ha) d'éléments nutritifs apparaissant sur les rapports d'analyse. Cette étape est primordiale afin d'obtenir des valeurs en ppm adéquates pour la consultation des nouvelles VSRF développées selon la masse de la cuillère de 3 cc pesée. Voir la section 1.3.1 pour les explications détaillées à ce sujet.

Tableau 21. Comparaison des recommandations en K₂O pour la production de radis au Canada et aux États-Unis

| Provinces/États | Indicateurs ² | Dose K ₂ O (kg/ha) | Source |
|-----------------|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| Québec (CAN) | K _{M3} : 0-100 kg/ha | 140 | CRAAQ (2010) |
| | K _{M3} : 101-200 kg/ha | 120 | |
| | K _{M3} : 201-300 kg/ha | 100 | |
| | K _{M3} : 301-400 kg/ha | 80 | |
| | K _{M3} : 401-500 kg/ha | 60 | |
| | K _{M3} : 501-600 kg/ha | 40 | |
| | K _{M3} : 601+ kg/ha | 20 | |
| Ontario (CAN) | 0-30 mg K/L | 100 | MAAARO (2011) |
| | 31-45 mg K/L | 90 | |
| | 46-60 mg K/L | 80 | |
| | 61-80 mg K/L | 60 | |
| | 81-100 mg K/L | 40 | |
| | 101-120 mg K/L | 30 | |
| | 121-180 mg K/L | 20 | |
| | 181+ mg K/L | 0 | |
| Michigan (US) | 100 ppm | 180-205 | Warncke et coll. (2004) |
| | 150 ppm | 95-120 | |
| | 200-240 ppm | 15-35 | |
| | 265 ppm | 5-15 | |
| | 270+ ppm | 0 | |

² La méthode d'analyses de l'indicateur doit être prise en compte pour la comparaison par classe de richesse du sol en potassium.

5 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 du radis cultivé en sol organique, soit la détermination des classes de fertilité et des doses optimales en azote, phosphore et potassium pour cette culture. Ces recommandations reposent sur l'analyse des données validées d'expérimentations scientifiques québécoises réalisées au champ, appuyées de l'expertise agronomique et de principes scientifiques reconnus dans le domaine de la nutrition des cultures. Les nouvelles VSRF viennent compléter le travail entrepris en 2008 dans le cadre du programme PSEFCM et améliorer la portée scientifique des grilles de radis en sol organique publiées en 2010.

Pour chaque élément, les VSRF ont été établies en fonction du gain du rendement total par rapport à un témoin non fertilisé en utilisant les données des essais du PSEFCM (2008-2012) et du MIRVRF (2020-2022). Pour la grille N, les doses ont varié de 30 à 60 kg N/ha en fonction de la période de semis considérée et la classe de richesse en N total. Ce qui constitue globalement une réduction en comparaison à la dose unique de 45 kg N/ha recommandée actuellement (CRAAQ, 2010). Pour ce qui est de la fertilisation phosphatée, la grille a été produite sans tenir compte de la période de semis et l'indice de saturation du sol en P (ISP_3), reconnu pour être un meilleur indicateur agroenvironnemental de la biodisponibilité du P que la concentration du P considérée seule, a permis de moduler la dose par classe de richesse en P du sol. Finalement, pour le potassium, à l'instar de la grille N, les VSRF sont modulées à la fois par la période de semis, mais aussi par un indicateur de fertilité du sol : la teneur en potassium (K_{M3}). Enfin, un biais important a été corrigé par l'usage de la concentration du sol en ppm d'une quantité de sol pesée, plutôt que de la valeur convertie en kg/ha obtenue par le volume d'une cuillère de 3 cc non pesée et le calcul avec le facteur de conversion de 2,24.

Les travaux de l'IRDA permettront aux acteurs du milieu agricole de bénéficier de recommandations et d'informations reliées à la nutrition du radis qui sont propres aux sols et au climat québécois, lesquelles permettront de mieux concilier la productivité et la conservation des ressources.

6 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.

7 RADIS EN SOL ORGANIQUE – VALEURS SCIENTIFIQUES DE RÉFÉRENCE EN FERTILISATION

| AZOTE | | | |
|---|---|-----------------------|----------------------------------|
| Période de semis ⁽¹⁾ | Classe de fertilité N total ⁽²⁾ (%) | Période d'application | VSRF ⁽³⁾ (kg N/ha) |
| Semis hâtif (Avant le 1 ^e juin) | ≤ 1,66 | Au semis | 40-60 ⁽⁴⁾ |
| | > 1,66 | | 30 ⁽⁵⁾ |
| Semis tardif (À partir du 1 ^e juin) | ≤ 1,43 | Au semis | 40 ⁽⁶⁾ |
| | > 1,43 | | 30 ⁽⁵⁾ |

- (1) La période de semis correspond au seuil du 140^{ème} jour julien déterminé lors du test de partition Cate-Nelson (voir section 2.2.1) et arrondi au 1^{er} juin.
 (2) Le N_{total} est mesuré par combustion au LECO.
 (3) VSRF : Valeurs scientifiques de référence en fertilisation.
 (4) Dose intermédiaire entre celle qui minimise les pertes et celle qui optimise l'augmentation de rendement.
 (5) En absence de différence entre les traitements, la dose médiane du plus petit groupe de doses testées est recommandée.
 (6) Dose (ou médiane du groupe de doses) agronomique optimale dans cette catégorie de sol.

| PHOSPHORE | | |
|--|-----------------------|---|
| Classe de fertilité ISP ₃ (%) ⁽¹⁾ | Période d'application | VSRF ⁽²⁾ (kg P ₂ O ₅ /ha) |
| ≤ 5,0 | Au semis | 30 ⁽³⁾ |
| 5,1 – 15,0 | | 0-30 ⁽⁴⁾ |
| > 15,0 | | 0 ⁽⁵⁾ |

- (1) ISP₃ : indice de saturation en phosphore = $(PM3/31) / ((AIM3/27) + 5 \times (FeM3 / 56)) \times 100 \%$, éléments extraits au Mehlich-3 (Mehlich, 1984)
 (2) VSRF : Valeurs scientifiques de référence en fertilisation – **Recommandations pour un premier semis de radis en tant que première culture de la saison.**
 (3) Dose optimale de 30 P₂O₅ obtenue par l'analyse de variance.
 (4) Intervalle de 0 à 30 P₂O₅ proposé. Suivant le contexte de production, la dose de 30 P₂O₅ permet d'avoir moins de variabilité dans la réponse.
 (5) En absence de différence entre les traitements et réponse, la dose nulle est recommandée.

| POTASSIUM | | | |
|---|---|-----------------------|---|
| Période de semis ⁽¹⁾ | Classe de fertilité K Mehlich-3 ⁽²⁾ (ppm) | Période d'application | VSRF ⁽³⁾ (kg K ₂ O/ha) |
| Semis hâtif (Avant le 1 ^e juin) | ≤ 199,8 | Au semis | 60 ⁽⁴⁾ |
| | 199,9-399,7 | | 30 ⁽⁴⁾ |
| | > 399,7 | | 0 ⁽⁵⁾ |
| Semis tardif (À partir du 1 ^e juin) | ≤ 66 | Au semis | 60 ⁽⁴⁾ |
| | 67-400 | | 30 ⁽⁴⁾ |
| | > 400 | | 0 ⁽⁵⁾ |

- (1) La période de semis correspond au seuil du 147,5^{ème} jour julien déterminé lors du test de partition Cate-Nelson (voir section 4.2) et arrondi au 1^{er} juin.
 (2) Les ppm sont utilisées afin d'éviter un biais quant à la masse volumique du sol. **Pour convertir les valeurs de ppm en kg/ha pour un sol organique, appliquer le facteur de conversion de 0,84 (ppm x 0,84 = kg/ha en sol organique).**
 (3) VSRF : Valeurs scientifiques de référence en fertilisation – **Recommandations pour un premier semis de radis en tant que première culture de la saison.**
 (4) Dose (ou médiane du groupe de doses) agronomique optimale dans cette catégorie de sol.
 (5) En absence de différence entre les traitements, la dose médiane du plus petit groupe de doses testées est recommandée.
 (6) Dose nulle proposée considérant l'absence de réponse et la richesse du sol en K_{M3}.

8 RÉFÉRENCES

- Atlantic Provinces Agriculture (1988). *Radish*. VEGETABLE CROPS PRODUCTION GUIDE FOR THE ATLANTIC PROVINCES. <https://www.gov.nl.ca/ffa/files/agrifoods-plants-pdf-radish.pdf>
- Bélanger, G., Ziadi, N., Walsh, J. R., Richards, J. E. et Milburn, P. H. (2003). Residual soil nitrate after potato harvest. *Journal of environmental quality*, 32(2), 607-612.
- Black, C. A. (1993). *Soil Fertility Control and Evaluation*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.
- 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.
- Cate Jr, R. et Nelson, L. (1971). A simple statistical procedure for partitioning soil test correlation data into two classes. *Soil Science Society of America Journal*, 658-660.
- Cope, J. T., Rouse, R. D., Walsh, L. M. et Beaton, J. D. (1973). Interpretation of soil test results. *Soil testing and plant analysis*, 35-54.
- 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.
- Culman, S., Fulford, A., Camberato, J. et Steinke, K. (2020). Tri-State Fertilizer Recommendations for Corn, Soybean, Wheat, and Alfalfa.
- De Bauw, P., Van Asten, P., Jassogne, L. et Merckx, R. (2016). Soil fertility gradients and production constraints for coffee and banana on volcanic mountain slopes in the East African Rift: A case study of Mt. Elgon. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 231, 166-175.
- Defra, A. (2010). *Fertiliser manual (RB209)*. Department of the Environment, Food and Rural Affairs, TSO (The Stationary Office), London.
- Guérin, J. (2009). Diagnostic agroenvironnemental de la fertilisation phosphatée des cultures *cultures maraîchères en sols organiques*. Thèse de doctorat. Université Laval.
- Hubert, M. et Debruyne, M. (2010). Minimum covariance determinant. *Wiley Interdisciplinary Reviews Computational Statistics*, 2(1), 36-43.
- 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>
- Isaac, R. A. et Johnson, W. C. (1976). Determination of total nitrogen in plant tissue, using a block digester. *Journal of the Association of Official Analytical Chemists*, 59(1), 98-100.
- 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., Gallichand, J. et Bouzlama, S. (2017). Volume or weight soil sampling for extracting Mehlich III elements with routine analyses? *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 48(15).

- Krull, E. S., Skjemstad, J. O. et Baldock, J. A. (2004). Functions of soil organic matter and the effect on soil properties (p. 129). *Canberra: Cooperative Research Centre for Greenhouse Accounting.*
- Landry, C., Joseph, C.-A., Houde, S., Forest-Drolet, J. et Grenier, M. (2021a). *Fascicule 01 : Fertilisation de la carotte en sol minéral.* Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation du Québec (2020-2023). Présenté au ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation.
https://irda.blob.core.windows.net/media/6133/mirvrf_fasc-01_carottesm_webirda_clandryetcoll.pdf
- Landry, C., Forest-Drolet, J., Houde, S., Joseph, C.-A. et Grenier, M. (2021b). *Fascicule 02 : Fertilisation du haricot frais.* Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation du Québec (2020-2023). Présenté au ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation.
https://irda.blob.core.windows.net/media/6134/mirvrf_fasc-02_haricot_webirda_clandryetcoll.pdf
- Landry, C., Houde, S., Forest-Drolet, J., Joseph, C.-A. et Grenier, M. (2021c). *Fascicule 03 : Fertilisation du pois.* Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation du Québec (2020-2023). Présenté au ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation. https://irda.blob.core.windows.net/media/6135/mirvrf_fasc-03_pois_webirda_clandryetcoll.pdf
- Landry, C., Joseph, C.-A., Houde, S., Forest-Drolet, J. et Grenier, M. (2021d). *Fascicule 04 : 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). Présenté au ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation.
https://irda.blob.core.windows.net/media/6136/mirvrf_fasc-04_ble-orge-avoine_webirda_clandryetcoll.pdf
- Landry, C., Joseph, C.-A., Houde, S., Forest-Drolet, J. et Grenier, M. (2022a). *Fascicule 05 : Fertilisation de la betterave potagère.* Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation du Québec (2020-2023). Présenté au ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation.
https://irda.blob.core.windows.net/media/6227/mirvrf_betterave_fasc05_version-finale_avril2022.pdf
- Landry, C., Joseph, C., Houde, S., Forest-Drolet, J. et Grenier, M. (2022b). *Fascicule 06 : Fertilisation de l'oignon espagnol en sol minéral.* Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation du Québec (2020-2023). Présenté au ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation.
https://irda.blob.core.windows.net/media/6228/mirvrf_oignon-esp_fasc06_version-finale_avril2022.pdf
- Landry, C., Joseph, C.-A., Houde, S., Forest-Drolet, J. et Grenier, M. (2022c). *Fascicule 07 : Fertilisation de la citrouille.* Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation du Québec (2020-2023). Présenté au ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation.
https://irda.blob.core.windows.net/media/8164/irda_mirvfr_fascicule_07_citrouille.pdf
- Landry, C., Joseph, C., Houde, S., Forest-Drolet, J. et Grenier, M. (2022d). *Fascicule 08 : Fertilisation du rutabaga en sol minéral.* Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation du Québec (2020-2023). Présenté au ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation.
https://irda.blob.core.windows.net/media/8165/irda_mirvfr_fascicule_08_rutabaga.pdf
- Landry, C., Forest-Drolet, J., Joseph, C.-A. et Houde, S. (2022e). *Fascicule 09 : Fertilisation du concombre de transformation.* Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation du Québec (2020-2023).
https://irda.blob.core.windows.net/media/8968/irda_mirvfr_fascicule_09_cornichon.pdf
- Landry, C., Forest-Drolet, J., Joseph, C.-A., Jacques, M. M. et Laroche J.-P. (2023). *Fertilisation des plantes fourragères pérennes : production. Fascicule 10 : Prairies de graminées et de légumineuses.* Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation du Québec (2020-2023). Présenté au ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation.
https://irda.blob.core.windows.net/media/8967/mirvrf_prairies_en_production_clandry-et-coll-22fev2024-vfinale.pdf

- MAPAQ. (2017). *Portrait-Diagnostic sectoriel des légumes frais au Québec*. Gouvernement du Québec. Dépôt légal : 2017. Bibliothèque et Archives nationales du Québec. Bibliothèque et Archives Canada. ISBN : 978-2-550-80122-1
- 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.
- 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
- 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.
- Nelson, L. A. et Anderson, R. L. (1977). Partitioning of soil test—Crop response probability. *Soil testing: Correlating and interpreting the analytical results*, 29, 19-38.
- Parent, L., Grenon, L. et Buteau, P. (1991). Effet de plusieurs décennies d'exploitation intensive sur les propriétés des sols organiques dans le sud-ouest du Québec. Acte Symposium, 92-98.
- Parent, L. et Dafir, M. (1992). A Theoretical Concept of Compositional Nutrient Diagnosis. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 117(2), 239-242.
- Parent, S.-E., Parent, L. E., Rozane, D.-E. et Natale, W. (2013). Plant ionome diagnosis using sound balances: case study with mango (*Mangifera Indica*). *Frontiers in Plant Science*, 4, 63683.
- Pellerin, A. P. (2006). Environmental Mehlich-III soil phosphorus saturation indices for Quebec acid to near neutral mineral soils varying in texture and genesis. *Canadian Journal of Soil Science*, 86(4), 711-723.
- Puustjärvi, V. (1970). Mobilization of nitrogen in peat culture. *Peat Plant News*, 3, 35-42.
- R Core Team. (2023). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. [en ligne] <https://www.R-project.org/>.
- Reid, J. B. et Morton, J. (2019). *Nutrient management for vegetable crops in New Zealand*. Wellington: Horticulture New Zealand. [en ligne] <http://www.doi.org/10.5281/zenodo.2401910> Consulté le 1 novembre 2023.
- SAS Institute inc. (2023). *SAS/STAT® 15.1 User's guide*. SAS Institute inc.
- Statistique Canada. (2016). *Superficie en radis selon les divisions de recensement (DR)*. [en ligne] <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/95-634-x/2017001/article/54905/catm-ctra-160-fra.htm> Consulté le 4 novembre 2023.
- Statistiques Canada. (2023). *Tableau 32-10-0365-01 Superficie, production et valeur à la ferme des légumes commercialisés*. <https://doi.org/10.25318/3210036501-fra> (site consulté le 15 novembre 2023).
- 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
- Warncke, D., Dahl, J. et Zandstra, B. (2004). *Nutrient Recommendations for Vegetable Crops in Michigan (E2904)*. Michigan State University Extension Bulletin, (E2934), 1-32.
- Wetselaar, R., Smith, G. D., Angus, J. F. (1998). Field measurement of soil nitrate concentrations. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 29(5-6):729-739.