



Rapport de recherche

FERTILISATION DE L'OIGNON VERT EN SOL ORGANIQUE

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

FASCICULE 11 :
Oignon vert 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 **progressé** ensemble dans la même direction : celle d'une agriculture saine, dynamique et performante.

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

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

Question ou commentaire

Christine Landry, biol., agr., Ph. D.
Chercheure
Responsable scientifique et auteure principale
T : 418 643-2380 p. 640
christine.landry@irda.qc.ca

Auteurs du rapport

Auteurs principaux

Christine Landry, agr., biologiste, Ph. D., IRDA
Julie Forest-D., M. Sc., IRDA
Simon Guillemette, M. Sc., IRDA
Mandela M. Jacques, 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., J. Forest-D., S. Guillemette et M. M. Jacques. 2024. Fertilisation de l'oignon vert en sol organique. Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation du Québec (2020-2023). Fascicule 11. Version finale. IRDA. 50 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 retrouvent 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	8
1.1	Provenance des données.....	8
1.2	Localisation des sites	9
1.3	Propriétés physico-chimiques des sols.....	9
1.3.1	Teneur en K en fonction de la méthodologie d'extraction et des facteurs de conversion utilisés	10
1.4	Dispositifs expérimentaux et traitements	10
1.4.1	Dispositifs	10
1.4.2	Traitements.....	11
1.5	Répétitions additionnelles.....	12
1.6	Rendements.....	13
1.7	Aspects additionnels pour l'interprétation des résultats	15
1.7.1	Variété culturale	15
1.7.2	Précédent culturel	15
1.7.3	Irrigation	15
1.7.4	Date de semis	15
1.8	Calculs et analyses statistiques.....	15
1.8.1	Détermination des classes de fertilité des sols.....	16
1.8.2	Détermination des doses optimales de fertilisants	17
1.8.3	Interaction entre N et K	18
1.8.4	Diagnostic nutritionnel, quantités d'éléments nutritifs exportés.....	18
1.9	Analyses sur les calibres et les pertes à la récolte	19
2	Fertilisation azotée	20
2.1	Portrait et représentativité des données.....	20
2.2	Détermination des doses agronomiques optimales.....	20
2.2.1	Recherche d'indicateurs de potentiel de rendement et de fertilité du sol	20
2.2.2	Effet de la dose d'azote sur le rendement	21
2.2.3	Effet de la dose d'azote sur les calibres et les pertes à la récolte.....	23
2.2.4	Diagnostic nutritionnel et exportations en azote	24
2.2.5	Nitrate à la récolte.....	25
2.3	Fertilisation azotée proposée	26
3	Fertilisation phosphatée.....	30
3.1	Portrait et représentativité des données.....	30
3.2	Détermination des doses agronomiques optimales.....	30
3.2.1	Recherche d'indicateurs de fertilité du sol	30
3.2.2	Effet de la dose de phosphore sur le rendement	30
3.2.3	Effet de la dose de phosphore sur les calibres et les pertes à la récolte.....	31
3.2.4	Diagnostic nutritionnel et exportations en phosphore	33
3.2.5	Fertilisation phosphatée.....	33
4	Fertilisation potassique	36
4.1	Portrait et représentativité des données.....	36
4.2	Détermination des doses agronomiques optimales.....	36

4.2.1	Recherche d'indicateurs de fertilité du sol	36
4.2.2	Effet de la dose de potassium sur le rendement	36
4.2.3	Diagnostic nutritionnel et exportations.....	39
4.2.4	Fertilisation potassique proposée	40
5	Conclusion	43
6	Remerciements.....	44
7	Oignon vert en sol organique – valeurs scientifiques de référence en fertilisation	45
8	Références	47

Liste des tableaux

Tableau 1. Description sommaire des sites des essais de fertilisation NPK de l'oignon vert en sol organique.....	8
Tableau 2. Description des traitements des essais de fertilisation N de l'oignon vert	11
Tableau 3. Description des traitements des essais de fertilisation P de l'oignon vert.....	12
Tableau 4. Description des traitements des essais de fertilisation K de l'oignon vert.....	12
Tableau 5. Statistiques descriptives des rendements de l'oignon vert des essais N, P et K.	13
Tableau 6. Variétés culturales présentes selon les essais N, P et K.....	15
Tableau 7. Description des calibres vendables de l'oignon vert pour le classement à la récolte dans les essais du PSEFCM et du MIRVRF.....	19
Tableau 8. Répartition des blocs des essais N d'oignons verts pour différentes classes de propriétés de sol.....	20
Tableau 9. Valeurs critiques des indicateurs de sol significatifs selon les tests de Cate-Nelson pour les essais N d'oignon vert	21
Tableau 10. Concentrations et exportations en N de l'oignon vert selon le diagnostic nutritionnel	24
Tableau 11. Fertilisation azotée de l'oignon vert en sol organique – Valeurs scientifiques de référence en fertilisation	28
Tableau 12. Comparaison des recommandations en N pour la production de l'oignon vert en sol organique au Canada et aux États-Unis.....	28
Tableau 13. Répartition des blocs des essais P d'oignon vert selon différentes classes de propriétés de sol après la validation des données.	30
Tableau 14. Concentrations et exportations en P ₂ O ₅ de l'oignon vert selon le diagnostic nutritionnel.....	33
Tableau 15. Fertilisation phosphatée de l'oignon vert– Valeurs scientifiques de référence en fertilisation.....	34
Tableau 16. Comparaison des recommandations en P ₂ O ₅ pour la production de l'oignon vert en sol organique au Canada et aux États-Unis.	35
Tableau 17. Répartition des blocs des essais K de l'oignon vert en sol organique selon différentes classes de propriétés de sol.....	36
Tableau 18. Indicateurs de sols potentiels de la réponse aux apports de potassium de l'oignon vert	36
Tableau 19. Concentrations et exportations en K ₂ O de l'oignon vert selon le diagnostic nutritionnel.....	40
Tableau 20. Fertilisation potassique de l'oignon vert – Valeurs scientifiques de référence en fertilisation.....	41
Tableau 21. Comparaison des recommandations en K ₂ O pour la production de l'oignon vert en sol organique au Canada et aux États-Unis.	42

Liste des figures

Figure 1. Répartition géographique des sites.	9
Figure 2. Rendements moyens totaux et vendables par site en fonction des traitements de fertilisation.....	14
Figure 3. Définitions des quadrants d'un test de partition binaire de Cate-Nelson (1971).....	17
Figure 4. Résultats des analyses de variance sur la réponse de l'oignon vert aux doses croissantes d'azote.	22
Figure 5. Pertes de rendements à la récolte par rapport au rendement total en fonction des traitements de fertilisation azotée.	23
Figure 6. Catégories de pertes à la récolte selon la teneur en N-NO ₃ du sol au semis pour l'oignon vert en sol organique.....	24
Figure 7. Exportations en N de l'oignon vert, à 91-94 % d'humidité, selon (A) le diagnostic nutritionnel et (B) le cultivar.....	25
Figure 8. Nitrate résiduel à la récolte suivant une fertilisation azotée.....	26
Figure 9. Résultats des analyses de variance sur la réponse aux doses croissantes de P ₂ O ₅	31
Figure 10. Effet des doses de P ₂ O ₅ sur les pertes à la récolte.....	32
Figure 11. Répartition des pertes à la récolte en fonction des doses croissantes de P ₂ O ₅	32
Figure 12. Exportations de P ₂ O ₅ de l'oignon vert selon (A) le diagnostic nutritionnel et (B) le cultivar.	33
Figure 13. Résultats des analyses de variance sur la réponse aux doses croissantes de K ₂ O.	38
Figure 14. Effet des doses de K ₂ O sur les pertes à la récolte A) selon le modèle sans indicateur et B) selon la richesse du sol en K _{M3}	39
Figure 15. Exportations en potassium de l'oignon vert (A) selon le diagnostic nutritionnel et (B) selon le cultivar.....	40

1 PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES ESSAIS ET DES ANALYSES

1.1 Provenance des données

Les valeurs scientifiques de référence en fertilisation (VSRF) en NPK de la culture de l'oignon vert en sol organique ont été établies sur les données générées lors des essais de fertilisation du *Programme de soutien aux essais de fertilisation des cultures maraîchères* (PSEFCM; 2008-2012) et du *Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation* (MIRVRF; 2020-2023). Le Tableau 1 résume les principales caractéristiques des sites d'essais.

Tableau 1. Description sommaire des sites des essais de fertilisation NPK de l'oignon vert en sol organique

ID site ⁽¹⁾	Année	MO _{PAF} ⁽²⁾	Essais N		Richesse ⁽³⁾ mesurée	Essais P		Richesse ⁽⁶⁾ mesurée	Essais K	
			N total (%)	Rdt (kg/ha)		ISP ₃ ⁽⁴⁾ (%)	Rdt ⁽⁵⁾ (kg/ha)		K _{M3} ⁽⁷⁾ (ppm)	Rdt ⁽⁵⁾ (kg/ha)
1	2008	79	2,1	28 118	Riche*	12	29 613	Riche*	868	28 828
2	2008	83	1,6	17 158	Pauvre	3,8	17 083	Riche	1036	17 671
3	2009	74	1,9	22 595	Riche*	24	29 982	Riche*	593	23 681
4	2009	80	nd	nd	Riche	33	nd	Riche	1288	nd
5	2009	78	2,3	nd	Riche*	11	36 632	Pauvre	276	40 966
6	2009	80	2,4	26 452	Riche	16	34 716	Riche	703	34 750
7	2010	77	1,9	9 392	Riche*	11	11 274	Pauvre	455	10 694
8	2010	92	1,9	4 928	Pauvre	13	nd	Pauvre	372	nd
9	2010	93	2,0	nd	Pauvre	15	nd	Riche*	407	nd
10	2010	78	1,9	12 835	Riche*	14	12 234	Riche	636	14 431
11	2011	91	1,7	15 451	Pauvre	5,9	13 587	Riche*	498	10 159
12	2011	91	2,1	22 145	Pauvre	7,7	26 333	Riche*	624	27 186
13	2011	82	2,3	34 302	Pauvre	13	39 347	Pauvre	323	31 791
14	2012	74	nd	nd	Riche*	13	nd	Pauvre	255	nd
15	2012	92	2,0	16 342	Riche*	22	15 280	Riche*	565	15 570
16	2012	87	2,2	34 941	Pauvre	13	38 466	Pauvre	346	33 237
17	2020	79	nd	nd	nd	nd	nd	Pauvre	166	32 000
18	2020	89	2,2	29 127	Pauvre	4,4	27 697	Riche*	472	30 229
19	2021	84	1,6	35 949	Pauvre	9,3	35 281	Riche	701	37 154
20	2021	84	1,8	29 362	Pauvre	7,0	30 004	Pauvre	478	36 258
21	2021	80	1,6	35 465	Pauvre	13	34 463	Riche	656	37 558
22	2021	76	1,6	62 593	Pauvre	4,6	59 949	Pauvre	311	62 071

¹ ID : Numéro d'identification du site. Sites PSEFCM : 1 à 16; sites MIRVRF : 17 à 22.

² MO : Matière organique du sol mesurée par perte au feu (PAF).

³ Les seuils de richesse en P du PSEFCM étaient de 200 kg/ha de P Mehlich-3 (P_{M3}) et du MIRVRF de 5 % d'ISP₃.

⁴ ISP₃ : Indice de saturation du sol en phosphore : $[(P/31)/(Al/27+5 \times Fe/56)]_{\text{Mehlich-3}}$

⁵ Rdt : Rendement vendable sur base fraîche.

⁶ Le seuil de richesse en K des protocoles PSEFCM et MIRVRF était de 400 kg K_{M3}/ha.

⁷ K_{M3} : Teneur du sol en K mesurée par la méthode Mehlich-3 (Mehlich, 1984) utilisant la masse de sol d'une cuillère de 3 cc. Les valeurs de K_{M3} sont exprimées en ppm. Les valeurs en kg/ha peuvent être obtenues en multipliant les résultats de l'analyse (en ppm) par le facteur 0,84.

* Sites pour lesquels la richesse mesurée s'est avérée différente de la richesse présumée basée sur les analyses producteurs lors de l'établissement des essais.

nd : non disponible.

1.2 Localisation des sites

Les essais d'oignon vert en sol organique ont été réalisés exclusivement dans la région de la Montérégie (Figure 1). Bien que le rayon de répartition des essais ait été restreint à une quinzaine de kilomètres, cette répartition a été jugée adéquate considérant qu'environ 95 % des hectares cultivés en oignons verts au Québec sont en Montérégie (Statistique Canada, 2016). Néanmoins, les résultats de la présente étude peuvent ne pas être totalement représentatifs des conditions et de la réalité agropédoclimatiques qui sévissent en dehors de cette région. De plus, l'utilisation de ces grilles par des conseillers et/ou producteurs qui cultivent des oignons verts en sols minéraux n'est pas recommandée.

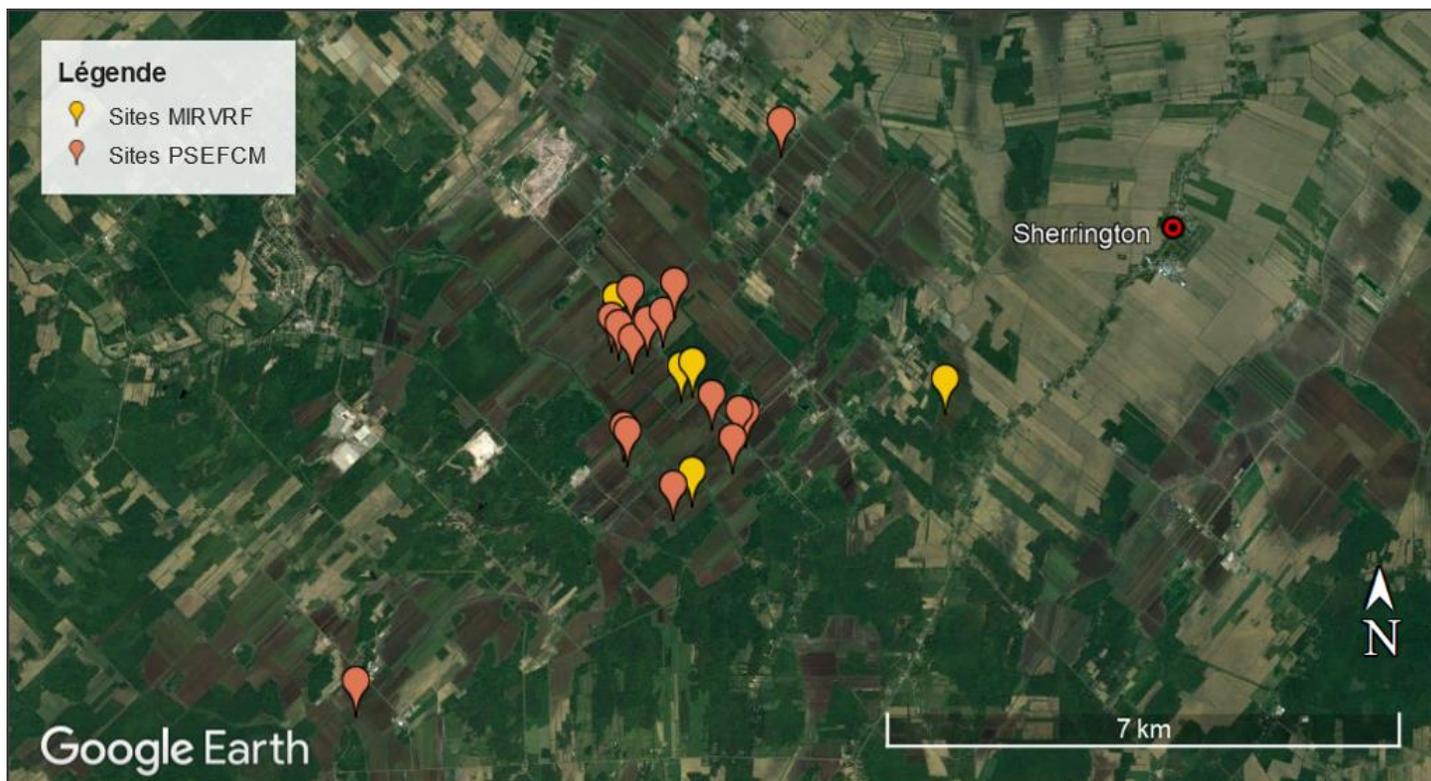


Figure 1. Répartition géographique des sites. L'emplacement des repères est approximatif et vise seulement à représenter la répartition géographique des sites sur le territoire du Québec.

1.3 Propriétés physico-chimiques des sols

La caractérisation physico-chimiques du sol (0-30 cm) des sols des sites a été effectuée par bloc afin de relier les valeurs des paramètres de sol à celles des variables de rendement et de qualité. 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.

Certaines caractéristiques physico-chimiques sont présentées plus en détail dans les chapitres sur l'azote (p. 20), le phosphore (p. 30) et le potassium (p. 36).

1.3.1 Teneur en K en fonction de la méthodologie d'extraction et des facteurs de conversion utilisés

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 la densité moyenne spécifique au type de sols analysés lors des calculs. 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 suggérée, 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.

Ces notions 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)). Les calculs utilisent donc 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 corrigée (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 (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 fertilisation N, P et K ont été menés en conditions réelles de production, directement sur les entreprises 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 blocs complètement aléatoires (3 à 5 blocs), excepté de 2008 à 2010 alors que qu'ils 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 1,7 à 2 m de largeur. Les semis ont eu lieu de la mi-mai à la fin juillet, et la durée moyenne des essais a été de 66 jours.

1.4.2 Traitements

Contrairement aux essais N pour lesquels les doses testées n'étaient pas ajustées selon des critères de sol (Tableau 2), les doses croissantes de P et K ont été choisies en fonction de la classe de fertilité du sol pour l'élément testé (Tableau 3, Tableau 4). 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 P_2O_5 ou de K_2O 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 agro-environnementaux de fertilisation des producteurs) et les teneurs en P_{M3} et K_{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. À cela s'ajoute que le résultat du dosage du K_{M3} peut différer selon la méthodologie employée lors de l'analyse Mehlich-3 (section 1.3.1). Au final, pour toutes ces raisons, environ 30 % des vingt-deux sites d'oignon vert ont été mal classés quant à leur teneur en P_{M3} ou en K_{M3} . Cela a pu limiter l'analyse de la réponse de la culture à la fertilisation puisqu'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. Inversement, dans les sols à fortes teneurs mal classés, le plateau de production pourrait être atteint dès l'application du plus faible niveau de traitement. Enfin, pour tous les essais, seul l'élément testé variait, les autres éléments nutritifs majeurs étant fixés au 3^e niveau (PSEFCM) ou au 4^e niveau (MIRVRF) de traitement de chaque élément afin qu'ils ne soient pas limitants.

1.4.2.1 Doses d'azote

Les doses de N testées, les modes et les périodes d'application testés sont présentés au Tableau 2. Les doses ont varié de 0 à 90 kg N/ha de 2008 à 2010, et de 0 à 120 kg N/ha pour les années 2011, 2012, 2020 et 2021. Les engrais azotés employés étaient le nitrate d'ammonium calcique (CAN, 27-0-0) et/ou le phosphate monoammoniacal (MAP, 11-52-0).

Tableau 2. Description des traitements des essais de fertilisation N de l'oignon vert

Essais N			Doses de N (kg/ha)				
Chercheur (Année)	Nombre de sites ¹	Mode et période d'application	T1	T2	T3	T4	T5
PSEFCM (2008-2010)	10	En bande au semis	0	30	30	60	
		En bande 30 jrs après le semis	0	0	30	30	
		Apport total	0	30	60	90	
PSEFCM (2011-2012)	6	En bande au semis	0	30	30	60	60
		En bande 30 jrs après le semis	0	0	30	30	60
		Apport total	0	30	60	90	120
MIRVF (2020-2021)	6	En bande au semis	0	30	30	60	60
		En bande 21-28 jrs après le semis	0	0	30	30	60
		Apport total	0	30	60	90	120

Doses de phosphore

Les doses de P testées, les modes et les périodes d'application sont présentés au Tableau 3. Les doses ont varié de 0 à 80 kg P_2O_5 /ha ou de 0 à 120 kg P_2O_5 /ha. Le fertilisant minéral employé était le phosphate monoammoniacal (MAP, 11-52-0) ou le superphosphate triple (0-46-0).

Tableau 3. Description des traitements des essais de fertilisation P de l'oignon vert

Essais P					Doses de P ₂ O ₅ (kg/ha)			
Chercheur (Année)	Nombre de sites	ISP ₃ (%)	P _{M3} (kg/ha)	Mode et période d'application	T5	T6	T7	T8
PSEFCM (2008-2012)	14		≤ 200	En bande au semis	0	30	60	120
				Apport total	0	30	60	120
	2		> 200	En bande au semis	0	20	40	80
				Apport total	0	20	40	80
MIRVRF (2020-2021)	5	≤ 5		En bande après la levée	0	30	60	120
				Apport total	0	30	60	120
	0		> 5	En bande après la levée	0	20	40	80
				Apport total	0	20	40	80

1.4.2.2 Doses de potassium

Les doses de K testées, les modes et les périodes d'application sont présentés au Tableau 4. Les doses ont varié de 0 à 120, de 0 à 240 ou de 0 à 300 kg K₂O/ha. Les doses ont été apportées sous forme muriate de potassium (0-0-60).

Tableau 4. Description des traitements des essais de fertilisation K de l'oignon vert

Essais K				Doses de K ₂ O (kg/ha)						
Chercheur (Année)	Nombre de sites ¹	K _{M3} (kg/ha)	Mode et période d'application	T9	T10	T11	T12	T13	T14	
PSEFCM (2008-2012)	12	≤ 400	À la volé avant le semis	0	0	60	160			
			En bande au semis	0	70	70	70			
			En bande 30 jrs après le semis	0	30	70	70			
				Apport total	0	100	200	300		
	4	> 400	À la volé avant le semis	0	0	0	0			
		En bande au semis	0	0	60	60				
		En bande 30 jrs après le semis	0	40	20	60				
			Apport total	0	40	80	120			
MIRVRF (2020-2021)	4	≤ 400	À la volé après la levée		0	0	0	40	120	
			En bande après la levée		0	40	50	50	50	
			En bande 21-28 jrs après le semis		0	0	30	70	70	
				Apport total		0	40	80	160	240
	2	> 400	À la volée après la levée		0	0	0	0	0	
		En bande après la levée		0	20	40	60	60		
		En bande 21-28 jrs après le semis		0	0	0	20	60		
			Apport total		0	20	40	80	120	

1.5 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.

1.6 Rendements

Les statistiques descriptives des rendements totaux, des rendements vendables et des pourcentages de pertes à la récolte sont présentées au Tableau 5. Les rendements moyens des essais (totaux ou vendables) étaient similaires entre eux. Cependant, deux sites ont obtenu des rendements totaux moyens supérieurs à 60 000 kg/ha, équivalent à environ deux fois le rendement moyen observé par essai. Inversement, quatre sites ont obtenu des rendements n'atteignant pas le rendement minimal de référence (Figure 2).

Les pertes à la récolte, c.-à-d. la différence entre les rendements totaux et les rendements vendables, ont été en moyenne de 20 à 25 % (Tableau 5). Des variations considérables ont été observées au niveau des taux de pertes entre les sites, mais également en fonction de l'élément à l'essai. Pour les essais N, 10 sites ont connu des pertes moyennes supérieures à 30 % et plusieurs parcelles ont subies des pertes allant jusqu'à 100 %. Dans les essais P et K, respectivement six et sept sites ont accusé des pertes moyennes supérieures à 30 %. En considérant les moyennes pour l'ensemble des sites, les pertes causées par des calibres trop petits ont été de première importance. Ces pertes ont représenté en moyenne de 22 % à 25 % du rendement total selon l'élément testé, alors que la deuxième cause de rejet la plus importante a été le déclassement dû aux feuilles jaunes dans les essais N, affectant environ 3 % du rendement total.

Tableau 5. Statistiques descriptives des rendements de l'oignon vert des essais N, P et K.

Essai		N _{obs}	Moyenne	Écart-type	Minimum	Maximum
N	Rendement total (kg/ha)	278	35 267	14 555	8 125	76 168
	Rendement vendable (kg/ha)	254	26 861	14 474	0	72 383
	Pertes (%)	251	25	25	0	100
P	Rendement total (kg/ha)	252	35 330	15 277	4 450	76 603
	Rendement vendable (kg/ha)	210	29 799	12 506	7 246	71 437
	Pertes (%)	208	22	16	0	65
K	Rendement total (kg/ha)	290	36 591	13 773	5 550	78 043
	Rendement vendable (kg/ha)	258	31 266	13 126	2 681	77 581
	Pertes (%)	239	20	18	0	84

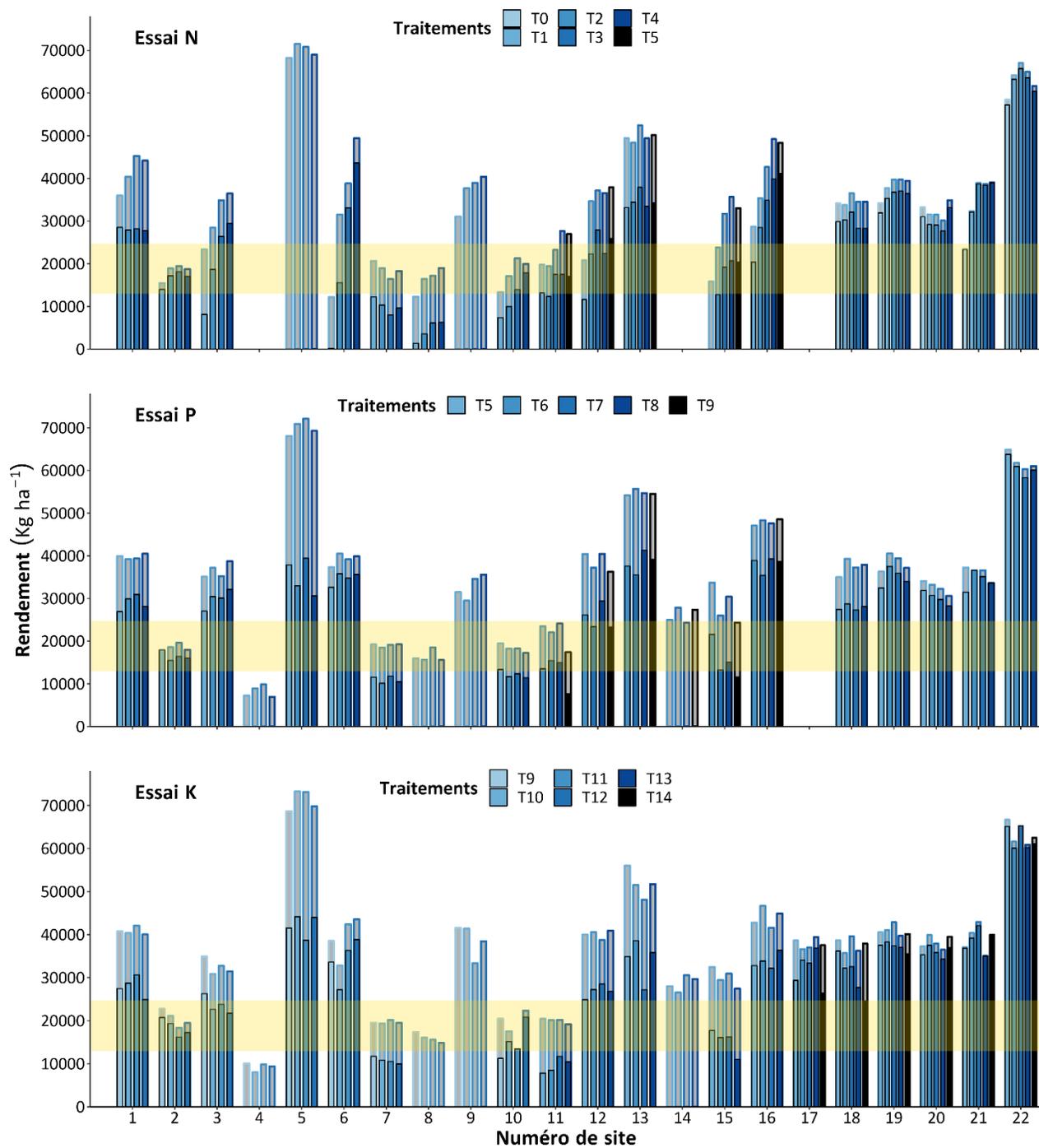


Figure 2. Rendements moyens totaux et vendables par site en fonction des traitements de fertilisation. Les doses testées sont détaillées à la section 1.4.2. Les barres grisées représentent le rendement total, et les barres pleines le rendement vendable. La plage de rendement de référence moyenne de la culture est présentée par le rectangle jaune.

1.7 Aspects additionnels pour l'interprétation des résultats

1.7.1 Variété culturale

Dans le cadre des essais, six variétés différentes ont été utilisées et l'information était manquante pour 15 % des observations (Tableau 6). Les deux variétés les plus utilisées étaient la variété White Gem (26-37 %), suivie de Tokyo Long White (18-24 %). Les autres variétés comptaient pour environ 15 % ou moins du jeu de données chacune.

Tableau 6. Variétés culturales présentes selon les essais N, P et K

Variété	Proportion des essais sur lesquels était testée chaque variété (%)			Rendement vendable moyen (kg/ha)		
	Essais N	Essais P	Essais K	Essais N	Essais P	Essais K
Kaïgaro	10	7	7	10 361	29 646	25 854
Kiyotaki Long White	17	18	16	26 984	27 193	26 814
SSR-B0-06	10	9	9	35 507	34 976	37 182
Tokyo Long White	20	24	18	19 754	23 482	22 429
White Gem	27	26	37	38 726	39 296	39 767
Manquant	28	15	13	24 980	26 736	26 455
Total	100 %	100 %	100 %			

1.7.2 Précédent cultural

Les essais d'oignon verts suivaient majoritairement une culture de radis (27 %), de carotte (18 %) ou d'oignon vert (14 %), et dans une moindre mesure, une combinaison de radis et de carotte ou une culture de pomme de terre. Le précédent cultural était inconnu pour 27 % 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.

1.7.3 Irrigation

Environ 20 % des essais d'oignons verts étaient irrigués. Autrement, les sites étaient non irrigués (14 %) ou l'information est manquante (68 %).

1.7.4 Date de semis

Tel que mentionné à la section 1.4.1, les dates de semis ont été très variables. Celles-ci se sont échelonnées sur près de deux mois et demi (18 mai au 30 juillet) pour une culture récoltée en moyenne après 60 jours de croissance. Bien que les oignons verts puissent être transplantés ou semés à partir du printemps jusqu'à la fin de l'été, une telle variabilité, en interaction avec les conditions climatiques, pourrait avoir un effet sur la réponse à la fertilisation.

1.8 Calculs et analyses statistiques

Hormis les cultures de prairies en entretien (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.

1.8.1 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 ($Rendement_{Témoin}$) par le rendement vendable maximal ($Rendement_{Maximal}$) 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.

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

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 (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) : $(VN+VP) / (VN+FN+VP+FP)$.

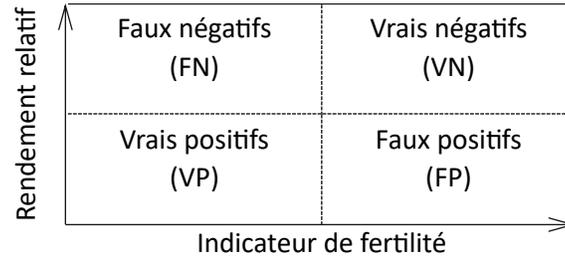


Figure 3. Définitions des quadrants d'un test de partition binaire de Cate-Nelson (1971).

1.8.2 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 (p. 16).

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) :

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

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. En termes de rendement, puisque l'oignon vert s'est avéré être une culture très sensible au manque d'azote, les rapports de rendements ont été calculés avec les rendements totaux. En effet, 6 % des témoins 0 N comptaient un rendement vendable nul ou excessivement faible (2 t/ha et moins) pour cause d'un calibre trop petit, ce qui rendait impossible ou inapproprié le calcul sur la base des rapports de rendements vendables (voir le calcul du ROM, Éq. 2). Afin de maintenir l'emploi du ROM dans les calculs, diverses alternatives ont été considérées, telles que l'inclusion des oignons verts 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 oignons verts permettent, lorsque requis, d'ajuster les doses selon ces critères qui déterminent le rendement vendable. Ainsi, dans un premier temps, la réponse de l'oignon vert 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.

L'ANOVA est effectuée en utilisant la procédure *mixed* de SAS® (SAS Institute Inc., 2023) 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 (voir section 1.4.2), 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 : 1-40-60. Dans ce cas, par exemple, il s'agit du 1^{er} groupe de doses testées (1-40-60) et les doses qui le composent vont de 40 à 60 kg/ha de l'élément testé (1-40-60). La VSRF proposée pour une catégorie de sol donnée est basée sur la répartition des doses testées à l'intérieur du groupe correspondant.

1.8.3 Interaction entre N et K

A posteriori, considérant les nouvelles recommandations en fertilisation azotée de l'oignon vert (30 à 120 kg N/ha; Tableau 11), il a été vérifié que les doses complémentaires de N appliquées dans les essais K (60 kg N/ha dans le PSEFCM, 90 kg N/ha dans le MIRVRF) n'étaient pas limitantes à la réponse potassique. Pour ce faire, les rapports de rendements ont été mis en relation avec le ratio N/K de la biomasse et la dose de K₂O appliquée dans un modèle de régression linéaire. Comme aucune tendance n'a été observée, il est présumé que les apports en N n'ont pas entraîné de biais dans l'analyse.

1.8.4 Diagnostic nutritionnel, quantités d'éléments nutritifs exportés

Douze oignons verts sains et représentatifs de l'unité expérimentale ont été prélevés à la récolte, nettoyés puis regroupés par traitement afin de former un échantillon composite pour l'analyse de la concentration en éléments nutritifs de la biomasse. Les échantillons ont été séchés à l'étuve à une température de 60-70 °C pendant 72 heures ou jusqu'à l'atteinte d'une masse constante.

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 le plant entier de l'oignon vert. 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.

À partir du diagnostic nutritionnel et en considérant le rendement moyen de la population de tête, le calcul des exportations fournit de nouvelles valeurs scientifiques liées à la nutrition de l'oignon vert 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.

1.9 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 oignons verts à la récolte. 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 oignons verts ont été classés selon les critères présentés au Tableau 7. Les pertes à la récolte, i.e. le rendement non-vendable, ont également été étudiées. Dans le PSEFCM, les causes de déclassement des oignons verts étaient : un calibre trop petit (diamètre inférieur à 9,5 mm et/ou longueur inférieure à 30 cm), le jaunissement du feuillage, la présence de maladies et toutes autres causes de rejet. Dans le MIRVRF, les causes de déclassement à la récolte ont été déclinées en fonction de plus de critères. S'ajoutant à celles mentionnées ci-haut, les oignons verts dans les essais MIRVRF pouvaient être déclassés pour cause d'oignons bulbés et d'oignons déformés. Des analyses de variance (modèles linéaires mixtes) ont servi à déterminer si la fertilisation affectait ces paramètres. Des tests de comparaison des moyennes ont permis de préciser les conclusions au besoin.

Tableau 7. Description des calibres vendables de l'oignon vert pour le classement à la récolte dans les essais du PSEFCM et du MIRVRF.

Calibre vendable	Diamètre (mm)
Moyen	> 9,5 à ≤ 12,7
Gros	> 12,7 à ≤ 19,1
Jumbo	> 19,1

2 FERTILISATION AZOTÉE

2.1 Portrait et représentativité des données

Les résultats des analyses physico-chimiques de la couche de sol de surface (0-30 cm) pour les essais N sont résumés au Tableau 5. Les pH_{eau} des sols ont varié de 4,2 à 6,6, bien que la très grande majorité se situait entre 5,5 et 6,5. Une plus grande acidité du sol peut ralentir l'activité biologique du sol et mène généralement à une plus faible minéralisation de la matière organique, diminuant la fourniture du sol en azote (MAAARO, 2022). Les sols étaient composés de 71 à 94 % de MO_{PAF} , avec une médiane de 83 %. Les teneurs en nitrate ($N\text{-NO}_3$) au printemps étaient bien réparties à travers les différents sites et couvraient un large intervalle de valeurs entre 5 et 192 ppm, avec une médiane de 62 ppm et une moyenne de 71 ppm. Les teneurs en azote total du sol ont varié de 1,5 à 2,4 %, avec 60 % des données sous 2 %. Le ratio C/N a varié de 17 à 28 (médiane de 23,6), avec la totalité des blocs sous le ratio de 29 suggérant une bonne capacité de minéralisation des sols (Puustjärvi, 1970). Dans l'ensemble, les sites ont été établis *a priori* sur des sols qui permettaient l'étude de la réponse à la fertilisation azotée.

Tableau 8. Répartition des blocs des essais N d'oignons verts pour différentes classes de propriétés de sol

pH_{eau} ¹	Blocs (%)	MO_{PAF} (%) ²	Blocs (%)	$N\text{-NO}_3$ (ppm) ³	Blocs (%)	N total (%)	Blocs (%)	Ratio C/N	Blocs (%)
≤ 5,5	30	≤ 70	0	≤ 25	5	≤ 1,75	30	≤ 18	5
5,5 – 6,0	37	70- 80	24	25 – 50	15	1,75 – 2	30	18 - 22	12
6,0 – 6,5	33	80-90	52	50-100	52	2-2,25	26	22 - 24	29
6,5 – 7,0	0	> 90	24	100-150	8	2,25-2,5	14	24 - 26	35
> 7,0	0			>150	6	>2,5	0	> 26	20
				ND	15				

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

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

2.2 Détermination des doses agronomiques optimales

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

Le potentiel de plusieurs variables à expliquer la réponse à la fertilisation a été testé par le test de partition de Cate-Nelson (1971) : la teneur en nitrate du sol ($N\text{-NO}_3$) au semis, le N total du sol, le rapport C/N (carbone/azote) et la teneur en matière organique du sol. De plus, comme les dates de semis couvraient une large plage de temps (du 17 mai au 29 juillet, soit du 138^e au 211^e jour julien), la date de semis exprimée en jours juliens a été testée afin de vérifier si l'ampleur de la réponse variait selon la période de semis.

Afin d'alléger la présentation des résultats, seuls les tests dont la valeur de P est inférieure à 0,12 sont présentés (Tableau 9) avec leurs valeurs critiques et leurs paramètres statistiques. Les valeurs critiques obtenues sont ensuite utilisées pour les analyses de variance en tant que seuils de réponse agronomique. Le rapport C/N du sol, sa teneur en matière organique et en $N\text{-NO}_3$ au semis se sont révélés être des indicateurs potentiels de la réponse des oignons verts aux apports en N. De plus, la date de semis exprimée en jours juliens a présenté une tendance à prédire l'ampleur de la réponse mesurée. Contrairement à ce qui est généralement attendu en sol organique (Parent et Pellerin, 2006; CRAAQ, 2010), la teneur en N total du sol ne s'est pas révélée un bon indicateur de prédiction de la fertilisation azotée pour l'oignon vert.

Tableau 9. Valeurs critiques des indicateurs de sol significatifs selon les tests de Cate-Nelson pour les essais N d'oignon vert

Indicateur de sol ⁽¹⁾	N _{obs} ⁽²⁾	Valeur critique	RRel ⁽³⁾ (%)	Sensitivité	Spécificité	Précision	Valeur de P
Ratio C/N	46	19,0	0,83	0,57	0,95	0,89	0,003
N-NO ₃ au semis (ppm)	42	55,0	0,54	0,77	0,67	0,74	0,013
MO _{PAF} (%)	46	85,3	0,78	1,00	0,53	0,65	0,001
Période de semis (jours juliens)	46	183,5	0,68	0,44	0,82	0,67	0,092

⁽¹⁾ Le nitrate (N-NO₃) au semis a été déterminée par la méthode au KCl 2M et dosé par colorimétrie (Isaac et Johnson, 1976). MO_{PAF} : Matière organique déterminée par perte au feu. La période de semis en jours juliens a pour référence le 1^e janvier.

⁽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

Comme mentionné dans la section 1.8.2, les analyses de variance (ANOVA) de l'effet de la fertilisation sur la productivité des cultures ont été effectuées en utilisant les logarithmes naturels des rapports de rendements (log_ROM) afin de pallier aux problèmes d'hétérogénéité de la variance. Les comparaisons multiples de moyennes ont servi à sélectionner le meilleur traitement. Sur les graphiques en forêt (Figure 4), la présentation des ROM plutôt que des logarithmes du ROM vise à faciliter l'interprétation des résultats. Les ROM se situant à droite de la ligne rouge (> 1) témoignent d'une augmentation de rendement due à un apport d'engrais, par rapport à une parcelle témoin non fertilisée en N. Inversement, les moyennes à gauche de cette ligne (ROM < 1) témoignent d'une diminution de rendement. En absence de différences significatives entre les traitements, les intervalles de confiances à 90 % permettent de déterminer si le rendement obtenu pour un traitement donné est numériquement différent du témoin.

Le modèle sans indicateur (A) (Figure 4) démontre un effet significatif ($P = 0,001$; N_{obs} = 339) de l'apport des doses croissantes de N sur les ROM. Le test de comparaison des moyennes indique que la dose agronomique optimale, c'est-à-dire la plus petite dose menant au meilleur rendement, se situe dans le groupe 60-84 kg N/ha. Cette dernière a permis d'obtenir des rendements de 22 à 48 % supérieurs (35 % en moyenne) par rapport aux rendements des parcelles sans engrais azoté.

La division en deux du jeu de données par le seuil de N-NO₃ déterminé lors du test de partition de Cate-Nelson (modèle B) révèle que ce sont les cultures produites dans les sols dont la teneur en N-NO₃ est inférieure à 55 ppm que la réponse est importante. Pour ces sols, le groupe de doses menant au rendement optimal est de 90-106 kg N/ha et a permis d'obtenir des gains moyens de 67,5 % (ROM = 1,675) par rapport au témoin 0N ($P < 0,001$; N_{obs} = 82). Au-dessus du seuil, les gains obtenus suivant les apports azotés sont plus faibles, soit de l'ordre de 20 à 26 % en moyenne et la dose agronomique optimale tend plutôt vers 60-84 kg N/ha ($P = 0,050$; N_{obs} = 212).

L'emploi de seuils supplémentaires (modèle C) obtenus en divisant ou en multipliant par deux le seuil de 55 ppm (méthode de Cope-Rouse, 1971), et menant à la création de quatre classes de fertilité, précise encore davantage la réponse de la culture à l'azote. Dans la première classe de fertilité (teneur en N-NO₃ inférieure à 27,5 ppm), il n'a pas été possible de détecter des différences significatives entre les différents groupes de doses, bien que ceux de 60-84 kg N/ha et plus présentent des ROM en moyenne de 86 %, comparativement à 58 % pour le groupe de dose 30-56 kg N/ha. Le faible nombre d'observations (N_{obs} = 19) explique probablement en partie ce résultat. Cette catégorie de sol enregistre néanmoins les plus fortes réponses aux apports azotés par rapport au témoin 0N, avec des gains de rendement moyens qui varient de 58 à 90 % (ROM de 1,581 et 1,899). Dans les sols ayant de 27,5 à 55 ppm N-NO₃, l'oignon vert a aussi grandement bénéficié des apports azotés. La dose agronomique optimale de 90-106 kg N/ha ($P < 0,001$) présente les meilleurs gains de rendement, de l'ordre de 61 % (33 à 88 %) en moyenne. Dans la classe de fertilité suivante (55 à 110 ppm N-NO₃), la dose agronomique optimale se situe plutôt dans le groupe de doses 60-84 kg N/ha ($P = 0,042$), menant à des gains variant de 15 à 43 % par rapport au témoin. Enfin, dans les sols montrant une teneur en N-NO₃ supérieure à 110 ppm, les différentes doses n'ont pas mené à des différences significatives de ROM ($P = 0,700$, N_{obs} = 50). Les gains

obtenus varient de 0 à 5 % par rapport au témoin sans engrais et la plus petite dose testée (30-56 kg/ha) est retenue comme dose agronomique optimale.

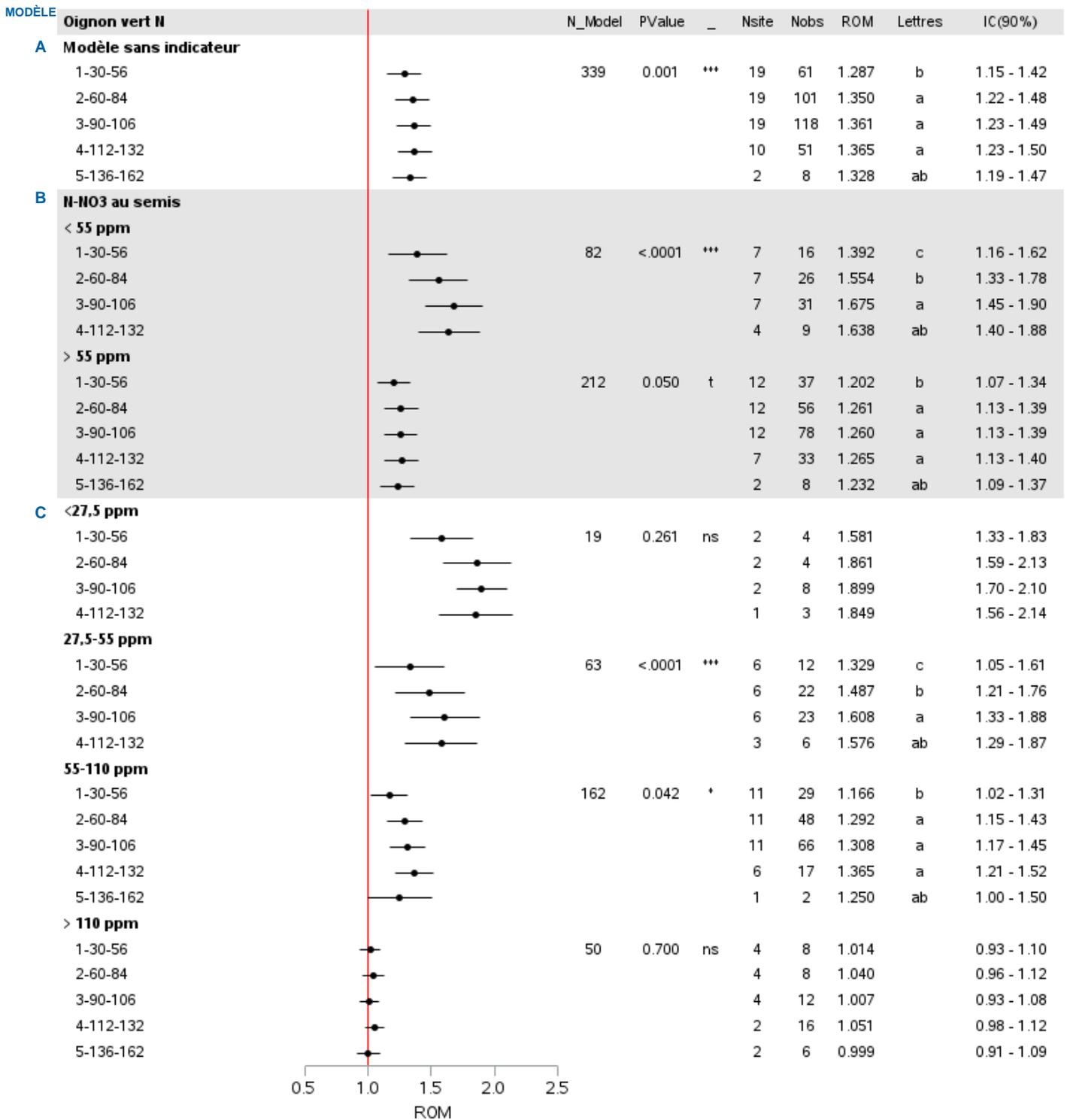


Figure 4. Résultats des analyses de variance sur la réponse de l'oignon vert aux doses croissantes d'azote. N_model : nombre d'observations du modèle; Nsite : nombre de sites; Nobs : nombre d'observations; ROM : rapport de rendement (rendement parcelle fertilisée/rendement parcelle témoin); IC : Intervalle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

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

2.2.3.1 Calibres à la récolte

À la récolte, les oignons verts ont été classés et pesés selon les calibres décrits au Tableau 7 (p. 19). L'analyse des calibres a été produite sur les proportions des calibres vendables, et n'inclut donc pas les oignons verts de trop petit diamètre (< 9,5 mm), lesquels sont déclassés selon les normes du marché. Une ANOVA de l'effet de la dose de N sur les proportions de calibres a été effectuée sur l'ensemble du jeu de données ($N_{\text{obs}} = 218$). La dose de N n'a pas eu d'incidence sur les proportions relatives des calibres des oignons verts formant le rendement vendable ($P = 0,844$). Indépendamment de la dose, le rendement vendable était constitué à 89 % d'oignons verts de taille moyenne (diamètre entre 9,5 et 12,7 mm), et de 11 % d'oignons verts de plus grande taille (diamètre entre 12,8 et 19,1 mm). Aucun oignon vert de calibre jumbo (diamètre > 19,1 mm) n'a été récolté. De plus, les calibres n'ont pas été influencés par la variété culturale ni par la teneur du sol en nitrate au semis (données non présentées). Par conséquent, aucune contrainte par rapport aux calibres n'a été prise en compte dans l'élaboration de la VSRF.

2.2.3.2 Pertes à la récolte

Une fertilisation azotée inadéquate pourrait mener à un déclassement excessif des légumes à la récolte, occasionnant des pertes économiques. Dans les essais N, la proportion du rendement non commercialisable a fortement diminué avec les apports azotés. Dans les parcelles 0 N, 42 % des oignons verts ont été déclassés comparativement à 26 % en moyenne pour les doses de 60 kg N/ha et plus. Trois sites ont enregistré des parcelles 0 N avec un déclassement complet des oignons verts dû à une importante carence azotée et 10 sites ont enregistré plus de 30 % de pertes. Ces observations appuient le fait que le système racinaire peu profond de la culture, jumelé aux températures fraîches du début de la saison, rend l'oignon vert sensible à la fertilisation azotée (WIFSS, 2016).

Les catégories de pertes sont illustrées à la Figure 6. Toutes doses de N confondues, la cause de rejet la plus fréquente était sans contredit un trop petit calibre, lesquels étaient en moyenne plus fréquents dans les sols à faible teneur en N-NO_3 au semis. La fertilisation azotée a favorisé la formation d'oignons verts de taille moyenne et, par conséquent, augmenté le rendement commercialisable dans les catégories de sols de 27 ppm N-NO_3 et moins.

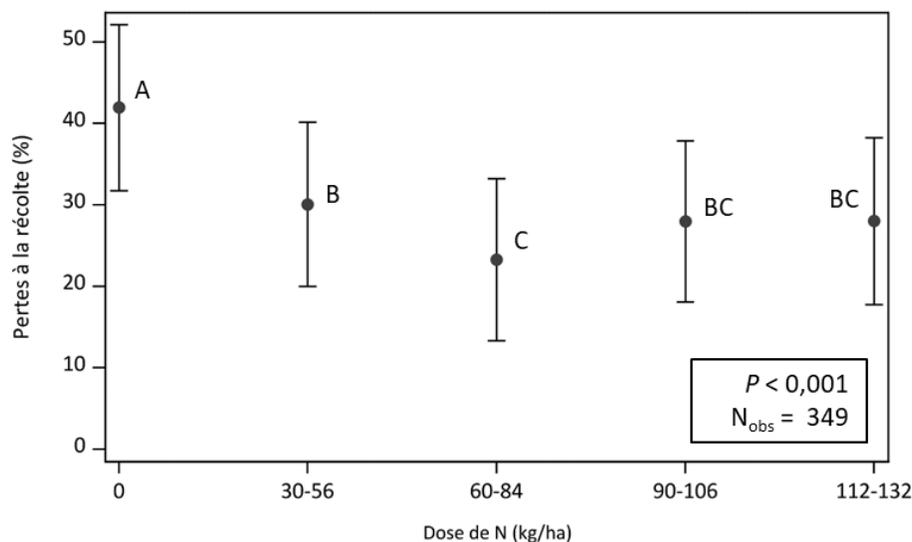


Figure 5. Pertes de rendements à la récolte par rapport au rendement total en fonction des traitements de fertilisation azotée. Les moyennes présentées sont les valeurs estimées du modèle statistique. Les moyennes ne sont pas statistiquement différentes entre elles (LSD; $P < 0,10$). Les barres représentent les erreurs-types. N_{obs} : Nombre d'observations.

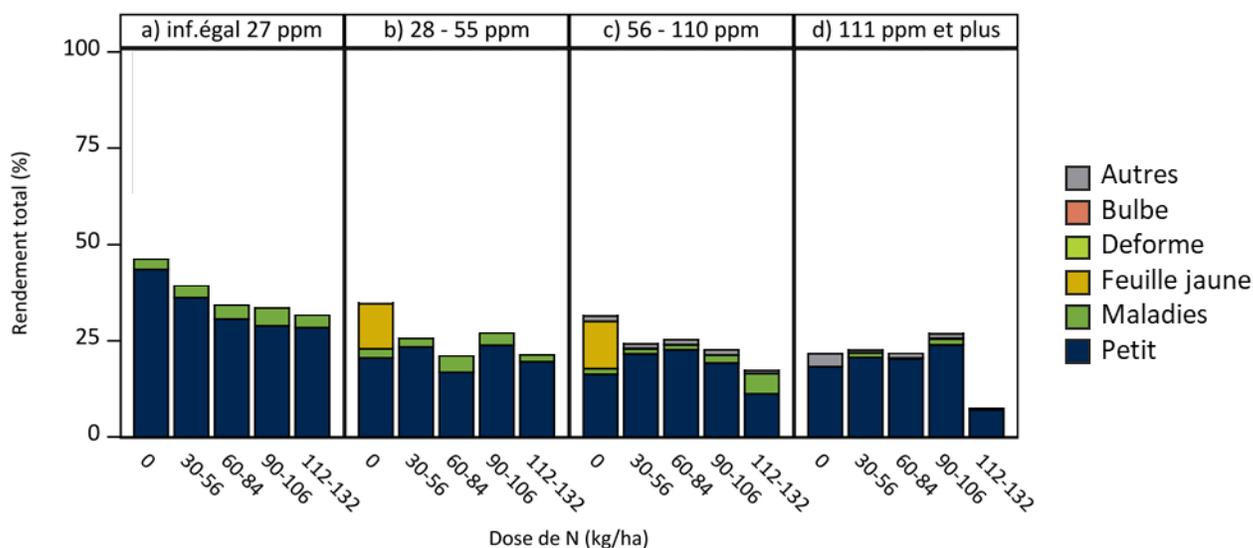


Figure 6. Catégories de pertes à la récolte selon la teneur en N-NO₃ du sol au semis pour l'oignon vert en sol organique.

2.2.4 Diagnostic nutritionnel et exportations en azote

Les concentrations et les exportations de N de l'oignon vert en fonction du diagnostic nutritionnel sont présentées au Tableau 10. La population de tête (groupe d'individus à haut rendement et à l'équilibre nutritionnel) a eu une concentration moyenne de $2,03 \pm 0,19$ kg N/t humide à 93 % d'humidité. Le Québec ne dispose pas encore de valeurs de référence pour les teneurs en N de la biomasse de l'oignon vert. Ces valeurs constituent donc de nouvelles connaissances qui pourront désormais constituer des valeurs de référence.

En considérant le rendement total moyen de la population de tête, soit 61 565 kg/ha, les exportations de tête ont été en moyenne de 127 kg N/ha, et ont varié entre 81 et 177 kg N/ha. Les exportations, présentées à la Figure 7, ont généralement varié de façon linéaire en fonction du rendement à l'exception du cultivar 'SSR-B0-06', lequel avait des teneurs moyennes près de deux fois plus élevées dans ses tissus que les autres cultivars. Il reste important de souligner que les rendements obtenus dans le cadre de cette étude (60 000 kg/ha) sont élevés comparativement aux valeurs de référence en contexte de production commerciale, soit environ 40 000 kg/ha (rendement vendable) (FADQ, 2014-2018).

Tableau 10. Concentrations et exportations en N de l'oignon vert selon le diagnostic nutritionnel

	Humidité ⁽¹⁾		Exportations ⁽²⁾				
	(%)	(kg N/t)		(kg N/ha)			
		Moy	Éc-T	Moy	Med	Min	Max
Haut rendement et équilibre nutritionnel (« population de tête »)	93	2,03	0,19	127	131	81	177
Faible rendement et équilibre nutritionnel	93	2,16	0,36	74	74	32	126
Faible rendement et déséquilibre nutritionnel	91	2,49	0,98	68	56	16	221
Haut rendement et déséquilibre nutritionnel	94	1,84	0,18	124	134	96	142

(1) Teneur en eau à la récolte.

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

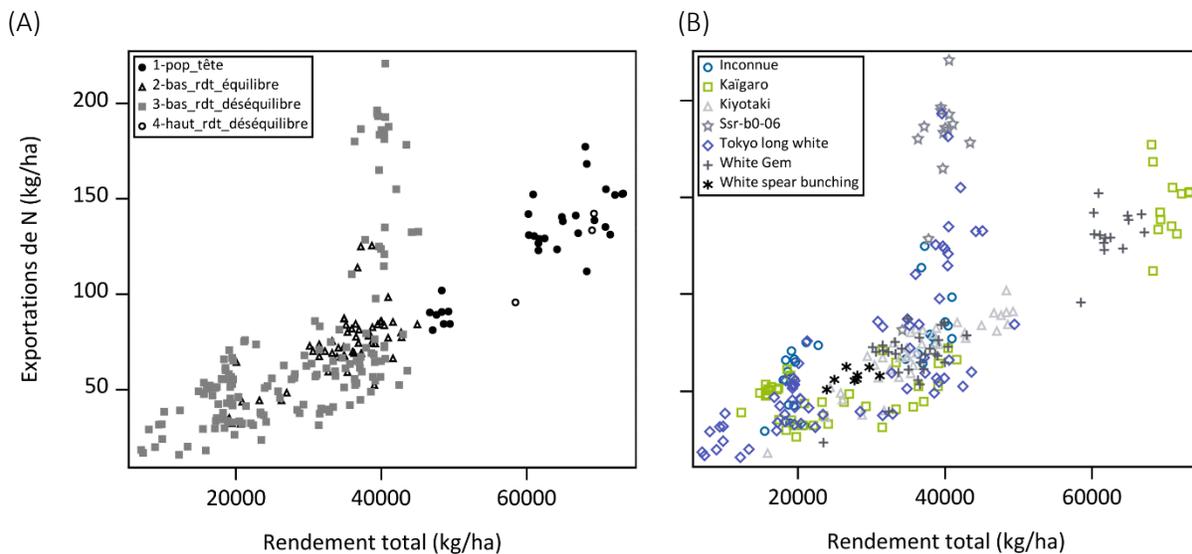


Figure 7. Exportations en N de l'oignon vert, à 91-94 % d'humidité, selon (A) le diagnostic nutritionnel et (B) le cultivar.

2.2.5 Nitrate à la récolte

Le N apporté par fertilisation n'est pas absorbé en totalité par les cultures. Ainsi, une partie de ce N restera au niveau du sol à la fin du cycle cultural, à risque de diffuser 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 8. La fertilisation azotée a entraîné une hausse des teneurs en N-NO_3 aux deux profondeurs considérées. Les teneurs en N-NO_3 des témoins étaient similaires en surface et en profondeur, soit en moyenne de 40,4 ppm et de 37,4 ppm, respectivement. Ces valeurs, bien qu'elles soient élevées, restent courantes dans les sols organiques, lesquels sont naturellement bien pourvus en nitrate, d'autant plus que les sols dans le cadre de cette étude avaient des taux de MO dépassant les 70 %. Tant en surface (0-30 cm) qu'en profondeur (30-60 cm), les teneurs en N-NO_3 ont fortement augmenté dès l'application de 60 kg N/ha. Les groupes de doses de 60 kg N/ha et de 90-106 kg N/ha ont donné des hausses somme toute comparables, mais le groupe de doses de 112-132 kg N/ha a mené à des teneurs particulièrement élevées (plus de 200 ppm N-NO_3) dans la couche de sol 0-30 cm.

Ces résultats démontrent que malgré la réponse importante de la culture aux apports d'engrais azoté, une partie de celui-ci demeure non-prélevée et à risque d'être perdue par lessivage. Les plants d'oignon vert disposent d'un système racinaire peu profond, ce qui cause une efficacité de prélèvement des éléments nutritifs relativement faible (Brewster, 2008). En vue d'atténuer le risque environnemental, il serait pertinent d'évaluer l'impact de l'implantation d'une culture de couverture avec un système racinaire ramifié qui pourrait agir comme piège à nitrate. En effet, comme l'oignon vert est une culture à cycle rapide (environ 60 jours) et récoltée généralement en août-septembre, l'implantation d'un second cycle de culture (ex.: radis) ou d'une culture de couverture est encouragée. De plus, afin d'atténuer l'impact de la fertilisation sur l'environnement, la dose totale d'azote appliquée pourrait être réduite en fonction d'un indice de fertilité. Enfin, il est préconisé de fractionner la dose totale en plusieurs apports, de même que de synchroniser les apports avec les besoins de la culture (Reid et Morton, 2019).

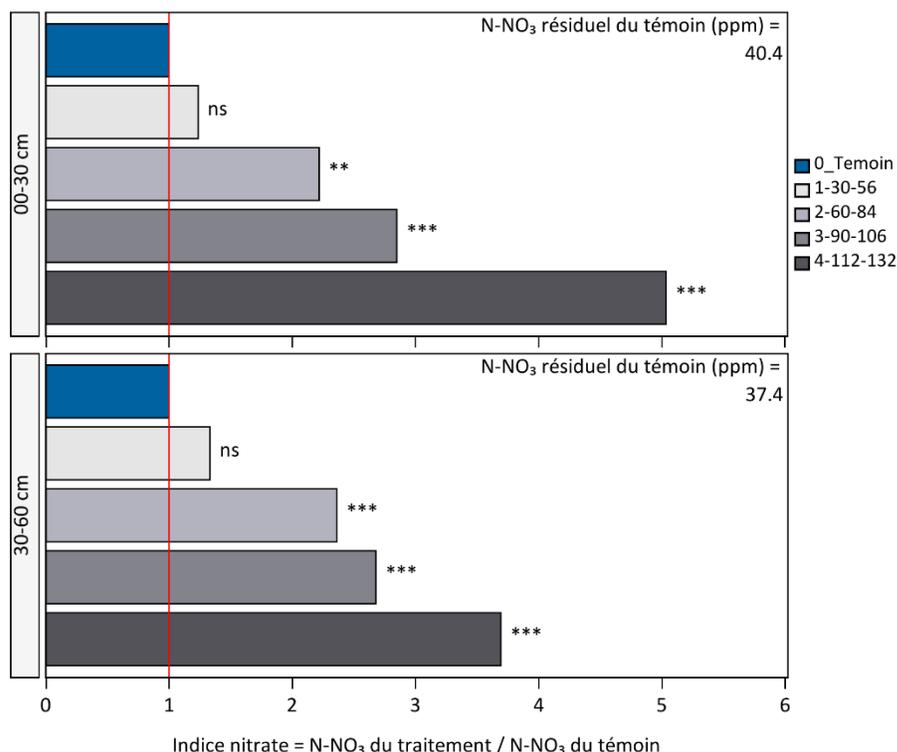


Figure 8. Nitrate résiduel à la récolte suivant une fertilisation azotée. La statistique présentée à droite des barres horizontales indique si le traitement est différent du témoin 0 N. NS : non significatif. t : tendance à $P < 0,12$. * : P entre 0,05 et 0,01. ** : P entre 0,01 et 0,001. *** : $P < 0,001$.

2.3 Fertilisation azotée proposée

Les valeurs scientifiques de référence en fertilisation (VSRF) en azote proposées pour l'oignon vert en sol organique sont présentées au Tableau 11. Ces VSRF reposent sur l'effet des doses de N sur la quantité et la qualité des rendements obtenus.

En absence d'indicateur de fertilité du sol, la dose de 60 kg N/ha s'est montrée comme la dose agronomique optimale. Cet apport a permis d'obtenir des gains de rendements moyens de 35 % par rapport aux rendements des parcelles sans engrais azoté. Lorsque les données étaient étudiées selon la teneur en N-NO₃ du sol au semis, le besoin en apports de N croissait avec la diminution des teneurs en N-NO₃. Quatre classes ont été créées à partir du seuil de 55 ppm N-NO₃ (section 2.2.1). Sous 27,5 ppm N-NO₃, les données en quantité insuffisante n'ont pas permis de spécifier une dose optimale. Toutefois, toutes doses confondues, il s'agit de la classe de fertilité qui enregistre les plus fortes réponses aux apports en N, avec des rendements des plants fertilisés en N de 58 à 90 % supérieurs aux témoins sans azote. Considérant la forte réponse et la valeur des exportations de 127 kg N/ha, la dose de 120 kg N/ha, fractionnée en deux applications, est proposée. Dans la classe de fertilité suivante, soit entre 27,5 et 55 ppm N-NO₃, la dose agronomique optimale de 90 kg N/ha a été retenue. Cette dernière a entraîné des gains de rendement de 67,5 % par rapport au témoin. De 55 à 110 ppm, la dose agronomique optimale de 60 kg N/ha a mené à des gains variant de 15 à 43 %. Au-delà de 110 ppm N-NO₃, aucune différence de rendement n'a été enregistrée et la plus petite dose testée, 30 kg N/ha, est retenue. Dans le cas où la teneur en N-NO₃ du sol ne peut pas être évaluée au semis par la méthode proposée, la dose totale recommandée varie de 60 à 90 kg N/ha selon l'historique du champ et le jugement de l'agronome.

La fertilisation azotée s'est révélée importante pour la qualité des récoltes, principalement le calibre. Comme expliqué à la section 2.2.3, une forte proportion (jusqu'à 100 %) des plants récoltés dans les parcelles témoins étaient de trop petits calibres et présentaient des symptômes de carence azotée. Les applications de 60 kg N/ha et plus ont permis de minimiser

les pertes en comparaison au témoin. Autrement, les autres causes de déclassement comme la présence de maladies, d'oignons bulbés ou d'oignons déformés n'ont pas été affectés par la fertilisation azotée.

Aucune recommandation n'existe actuellement au Québec pour l'oignon vert en sol organique. En fait, peu de recommandations existent quant à la production d'oignon vert, et la plupart ne distinguent pas les sols organiques des sols minéraux. Au Québec, la règle d'usage est d'appliquer les recommandations de l'oignon sec, lesquelles varient de 60 à 180 kg N/ha selon la teneur en N_{total} du sol (CRAAQ, 2010). Les doses agronomiques proposées à l'issue de cette étude sont donc légèrement inférieures à celles actuellement utilisées au Québec, et sont similaires sinon légèrement inférieures aux recommandations de l'Ontario et du Michigan (Tableau 12). Les résultats de la présente étude démontrent la pertinence de considérer l'oignon vert et l'oignon sec comme deux cultures avec différents besoins en apports de fertilisants.

Bien que la teneur en nitrate du sol au moment du semis se soit révélée un bon indicateur de fertilité et qu'il permet de moduler les recommandations en azote, certaines complexités en conditions de production d'analyse jouent en défaveur de son adoption. Par exemple, le prélèvement des échantillons alors que la saison de production est déjà entamée ainsi que les délais de réception des résultats dans le cas d'analyses en laboratoire. Le fractionnement de la dose, permettant l'attente des analyses afin de compléter les apports au semis, pourrait être une option facilitant son emploi, de même que sa mesure directement au champ (mesure sur le terrain). Cependant, aucun test rapide ne fait encore référence au Québec comme indicateur. Le nitrate s'avère pourtant à avoir un fort potentiel d'indicateur de fertilité azoté, comme c'est le cas en Ontario pour les recommandations azotées du maïs (MAAARO, 2017) de même que dans plusieurs cultures traitées dans le cadre du MIRVRF (Landry et al., 2020-2023).

Dans le cas où le $N\text{-NO}_3$ au semis serait jugé inadéquat comme indicateur de fertilité, les recommandations pourraient être présentées en fonction de la teneur en N total (N_{tot}) du sol selon les valeurs de 17,0 et 20,0 g N_{tot} /kg actuellement en usage pour les grilles azotées des cultures maraîchères en sol organique (CRAAQ, 2010). Ces seuils ont en effet été retenus pour toutes cultures confondues lors de la mise à jour en 2010 des autres cultures maraîchères faisant partie des essais du PSEFCM, malgré certaines incongruences du modèle proposé (Parent et Pellerin, 2006). Ainsi, cette alternative permettant d'uniformiser les grilles de référence N des cultures maraîchères organiques est suggérée dans la boîte de réflexion (p. 29). Cependant, il demeure que dans la présente étude, sur la base du jeu de données (section 2.2.1), le contenu en N_{tot} du sol ne s'est pas présenté comme un indicateur de fertilité intéressant puisqu'aucune valeur seuil n'a pu être déterminée. De plus, la corrélation observée entre le N_{tot} et le $N\text{-NO}_3$ s'est avérée négative ($r = -0,325$; $P = 0,026$; $N_{\text{site}} = 14$; $N_{\text{obs}} = 47$). Cette proposition ne repose donc pas sur des calculs, mais sur l'usage commun accepté des seuils pour les cultures maraichères révisées en 2010. D'autres alternatives à l'indicateur $N\text{-NO}_3$ ont été investiguées, à savoir le nombre de jours juliens ou encore la matière organique du sol, mais aucun de ces modèles n'était cohérent ou aussi performant que celui des teneurs en $N\text{-NO}_3$. De plus, il n'y a pas eu de corrélation entre les teneurs en $N\text{-NO}_3$ et le nombre de jours juliens ou avec la teneur en matière organique (données non présentées).

Telles que présentées à la section 2.2.5, les teneurs en nitrate post-récolte ont augmenté dès l'application de 60 kg N/ha. Les groupes de doses de 60 et 90 donnant des hausses comparables, c'est principalement la dose de 120 kg N/ha qui a entraîné des teneurs particulièrement élevées, de plus de 200 ppm $N\text{-NO}_3$ en moyenne dans la couche de surface. En vue d'atténuer le risque environnemental, comme l'oignon vert est récolté généralement au plus tard en août-septembre, il serait donc requis de recommander l'implantation de cultures de couverture, en particulier lorsque la dose totale appliquée est de 60 kg N/ha et plus. De plus, si un deuxième cycle de culture suit la récolte des oignons verts, il serait à envisager que la dose de N de la culture subséquente soit réduite. Cette option n'a toutefois pas été testée et reposerait sur le jugement de l'agronome en fonction de l'historique de réponse du site. Enfin, une alternative serait d'étirer la recommandation de 90 N à la classe $< 27,5$ ppm puisque l'ANOVA sur toutes les données sous le seuil de 55 ppm indique la dose de 90 N comme étant la dose optimale. Cependant, étant donné la sensibilité de l'oignon vert à la fertilisation azotée, le peu de données sous 27,5 ppm et la très forte réponse mesurée sous ce seuil (58 – 90 %), cette option n'a pas été privilégiée.

Tableau 11. Fertilisation azotée de l'oignon vert en sol organique – Valeurs scientifiques de référence en fertilisation

Classe de fertilité N-NO ₃ au semis (ppm) ⁽¹⁾	Période d'application ⁽²⁾	Fractionnement ⁽³⁾ (kg N/ha)	VSRF ^(4,5) (kg N/ha)
< 27,5	Au semis	(90)	(120) ⁽⁶⁾
	Au stade 30 jours après le semis	(30)	
27,5 – 55	Au semis	60	90 ⁽⁷⁾
	Au stade 30 jours après le semis	30	
55 – 110	Au semis	30	60 ⁽⁷⁾
	Au stade 30 jours après le semis	30	
> 110	Au semis	–	30 ⁽⁸⁾

Note : Dans le cas où la teneur en N-NO₃ du sol ne peut pas être évaluée au semis par la méthode proposée, la dose totale recommandée varie de 60 à 90 kg N/ha.

(1) Le N-NO₃ a été dosé au KCl 2M en laboratoire sur la profondeur 0-30 cm.

(2) Les périodes d'application sont suggérées telles que testées.

(3) Dans le cas où un producteur souhaite doser le N-NO₃ au printemps par la méthode de laboratoire, il est suggéré d'appliquer 60 kg N au semis puis d'ajuster la dose au moment du fractionnement.

(4) Valeur scientifique de référence en fertilisation.

(5) Les VSRF ont été établies en totalité sur la base de données ayant une MO_{PAF} de plus de 70 %.

(6) Dans cette classe de fertilité la plus pauvre, dose supérieure à la dose de 90 N qui permet de réduire les pertes et de couvrir la majorité des exportations.

(7) Dose agronomique optimale dans cette catégorie de sol.

(8) Correspond à la plus petite dose testée.

Tableau 12. Comparaison des recommandations en N pour la production de l'oignon vert en sol organique au Canada et aux États-Unis

Provinces/États	Mode et période d'application	Fractionnement	Dose N (kg/ha)	Source
Québec (CAN)	-	-	-	-
Ontario (CAN)	Avant le semis	90	120	MAAARO (2011)
	En saison	30		
Michigan (É-U)			80	Warncke et al. (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. Néanmoins, les VSRF ont été proposées en fonction de la teneur en N-NO₃ puisque l'agronome en charge de la recommandation pourrait ajuster la dose au fractionnement en fonction des résultats des teneurs en N-NO₃ du sol au semis.



Alternative à l'indicateur de fertilité du sol proposé

Puisque la teneur en nitrate du sol au semis demeure un indicateur difficilement applicable sur le terrain, les recommandations pourraient être présentées en fonction de la teneur en N total du sol. Les valeurs actuellement reconnues de 17,0 et 20,0 g N_{tot}/kg de sol (CRAAQ, 2010), obtenues lors de l'analyse des essais N du PSEFCM des cultures de la carotte, du céleri, du chou chinois, de la laitue, de l'oignon sec et de la pomme de terre cultivés en sol organique, sont présentées à titre de suggestion. Il demeure que le contenu en N_{tot} du sol ne s'est pas présenté comme un indicateur de fertilité intéressant pour l'oignon vert puisqu'aucune valeur seuil n'a permis de moduler la dose de N en fonction du N_{tot} du sol (section 2.2.1). Cette proposition ne repose donc pas directement sur des calculs et demande à être considérée sur la base du jugement agronomique. Cette alternative s'inscrit dans l'ordre de grandeur des doses recommandées pour les cultures révisées en 2010.

Classe de fertilité g N _{tot} /kg	Période d'application	Fractionnement (kg N/ha)		VSRF (kg N/ha)
< 17,0	Au semis	60		120
	30 jours après le semis	30		
17,1 – 20,0	Au semis	60		90
	30 jours après le semis	30		
20,1 et +	Au semis	30	60	60
	30 jours après le semis	30	0	

D'autres alternatives à l'indicateur N-NO₃ ont été investiguées, à savoir le nombre de jours juliens ou encore la matière organique du sol, mais aucun de ces modèles n'était cohérent ou aussi performant que celui des teneurs en N-NO₃. De plus, il n'y a pas eu de corrélation entre les teneurs en N-NO₃ et le nombre de jours juliens ou avec la teneur en matière organique (données non présentées).



Atténuation de la pollution par le nitrate

Telles que présentées à la section 2.2.5, les teneurs en nitrate à la récolte ont augmenté dès l'application de 60 kg N/ha. Cependant, les teneurs se démarquaient fortement après une dose de 120 kg N/ha où les valeurs ont grimpé à plus de 200 ppm N-NO₃ en moyenne dans la couche 0-30 cm. En vue d'atténuer le risque environnemental, il serait pertinent de conseiller l'implantation de cultures de couverture lorsque des doses de 60 kg N/ha et plus sont appliquées. Il serait aussi pertinent de vérifier si les apports ne pourraient pas être réduits pour une culture produite en 2^e cycle, selon l'historique de réponse du site.

Dans le cas où le risque environnemental serait jugé prioritaire, la recommandation de 90 N pourrait être étirée à la classe < 27,5 ppm puisque l'ANOVA sur toutes les données sous le seuil de 55 ppm indique la dose de 90 N comme étant la dose optimale. Cependant, étant donné la sensibilité de l'oignon vert à la fertilisation azotée, ses valeurs d'exportations de N, le peu de données sous 27,5 ppm et la très forte réponse mesurée sous ce seuil (58 – 90 %), cette option n'a pas été privilégiée.

3 FERTILISATION PHOSPHATÉE

3.1 Portrait et représentativité des données

La répartition des sites en fonction de différentes propriétés de sol est présentée au Tableau 13. Le pH_{eau} du sol a varié de 4,4 à 6,6. Les sites du MIRVRF, lesquels avaient des ISP_3 de 3 à 14 %, ont grandement amélioré la répartition de la richesse des sols. Ainsi, un peu plus des trois quarts des essais P présentaient une saturation en phosphore (ISP_3) inférieur à 15 %.

Tableau 13. Répartition des blocs des essais P d'oignon vert selon différentes classes de propriétés de sol après la validation des données.

$pH_{\text{eau}}^{(1)}$	Bloc (%)	$MO_{\text{PAF}} (\%)^2$	Bloc (%)	ISP_3	Blocs (%)	P_{M3} (ppm)	Bloc (%)
$\leq 5,5$	30	≤ 70	0	≤ 5	14	≤ 100	24
5,5 – 6,0	37	70- 80	41	5 – 10	24	100 – 200	31
6,0 – 6,5	33	80-90	39	10 – 15	41	200 – 300	29
6,5 – 7,0	0	> 90	20	15-20	7	300 – 400	5
> 7,0	0			> 20	13	> 400	11

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

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

² ISP_3 : Indice de saturation du sol en phosphore : $[(P/31)/(Al/27+5 \times Fe/56)]$, éléments extraits au Mehlich-3 (Mehlich, 1984) utilisant la masse de sol d'une cuillère de 3 cc.

3.2 Détermination des doses agronomiques optimales

3.2.1 Recherche d'indicateurs de fertilité du sol

Dans la littérature scientifique, plusieurs indicateurs de sol permettent de prédire la biodisponibilité du P du sol et la réponse à la fertilisation phosphatée des cultures (Khiari et Parent, 2005 ; Menon et Chien, 1995 ; Parent et al., 2002). Parmi ceux-ci, le P_{M3} , l' ISP_3 et le pH_{eau} ont été vérifiés par test de partition (Cate et Nelson, 1971). Cependant, parmi les indicateurs de fertilité testés, aucun seuil n'a permis de prédire la réponse phosphatée. Les seuils de 5, 10 et 15 % d' ISP_3 (Guérin, 2009), ont donc été retenus pour conduire les analyses. 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

Les résultats des analyses de la variance (ANOVA) sont illustrés à la Figure 9. Comme mentionné dans la section 1.8.2, les rendements totaux ont été utilisés et les ANOVA de l'effet de la fertilisation sur la productivité des cultures ont été effectuées en utilisant les logarithmes naturels des rapports de rendements (\log_{ROM}). Les comparaisons multiples de moyennes ont servi à sélectionner le meilleur traitement. Sur les graphiques en forêt (Figure 9), la présentation des ROM plutôt que des logarithmes du ROM vise à faciliter l'interprétation des résultats. Deux modèles sont présentés : (A) sans indicateur et (B) selon l' ISP_3 . Pour plus d'explications concernant l'interprétation de la figure, consulter la section 2.2.2.

La fertilisation phosphatée n'a pas eu un effet marqué sur le rendement total de l'oignon vert. Dans le modèle sans indicateur (A, sans indicateur, $N_{\text{obs}} = 295$), les gains de rendements ont varié de 0,4 à 4,1 % (ROM moyens de 1,004 à 1,041) sans différence entre les doses appliquées. Lorsqu'analysés selon l' ISP_3 (modèle B), les gains de rendements n'ont pas été particulièrement plus importants dans les sols à faibles ISP_3 en comparaison aux sols plus saturés. Les gains de rendements, bien que généralement positifs, demeurent faibles dans les classes de fertilité < 5 %, 5-10% et 10-15% d' ISP_3 . La plus petite dose testée ressort donc comme suffisante afin d'obtenir les meilleurs gains de rendement. Dans les sols à $ISP_3 > 15 \%$, considérant l'inconsistance dans les moyennes et la plus grande étendue des intervalles de confiance, la tendance ($P = 0,104$) observée semble plutôt provenir d'un effet aléatoire non contrôlé. Et quoi qu'il en soit, la plus petite dose testée permet également les meilleurs gains.

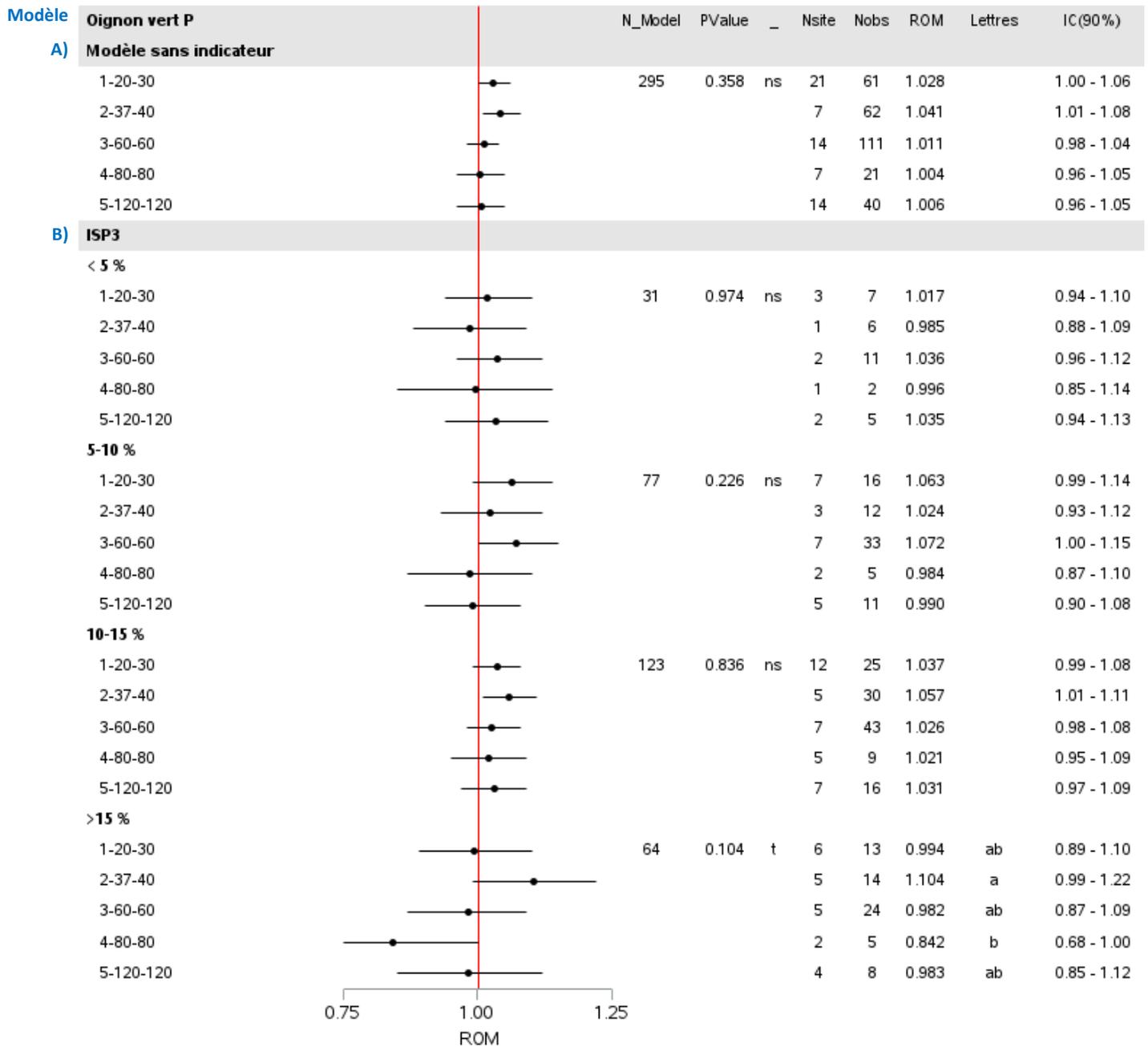


Figure 9. Résultats des analyses de variance sur la réponse aux doses croissantes de P_2O_5 . N_model : nombre d'observations du modèle; Nsite : nombre de sites; Nobs : nombre d'observations; ROM : rapport de rendement (rendement parcelle fertilisée/rendement parcelle témoin); IC : Intervalle de confiance; Lettres : résultats du test de comparaison des moyennes.

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

3.2.3.1 Calibres à la récolte

À la récolte, les oignons verts ont été classés et pesés selon les calibres décrits au Tableau 7 (p. 19). L'analyse des calibres est produite sur les proportions des calibres vendables, et n'inclut donc pas les oignons verts de trop petit diamètre (< 9,5 mm), lesquels sont déclassés selon les normes du marché. Dans l'ensemble des essais P, 100 % des oignons verts

récoltés étaient de calibre Moyen. Par conséquent, aucune ANOVA n'a été nécessaire et aucune contrainte par rapport aux calibres n'a été prise en compte dans l'élaboration de la VSRF.

3.2.3.2 Pertes à la récolte

Des ANOVA ont été produites sur les proportions d'oignons verts rejetés à la récolte. La dose de phosphore appliquée n'a pas entraîné de différence significative sur les pertes enregistrées ($P = 0,333$, Nobs = 307), lesquelles s'élevaient en moyenne de 25 à 28 %. Dans l'ensemble des traitements de fertilisation, les pertes ont été majoritairement causées par des oignons verts de trop petit calibre, soit ayant un diamètre de moins de 9,2 mm, tandis que l'occurrence de maladies est restée faible. Par conséquent, aucune ANOVA n'a été nécessaire et aucune contrainte par rapport aux pertes n'a été prise en compte dans l'élaboration de la VSRF.

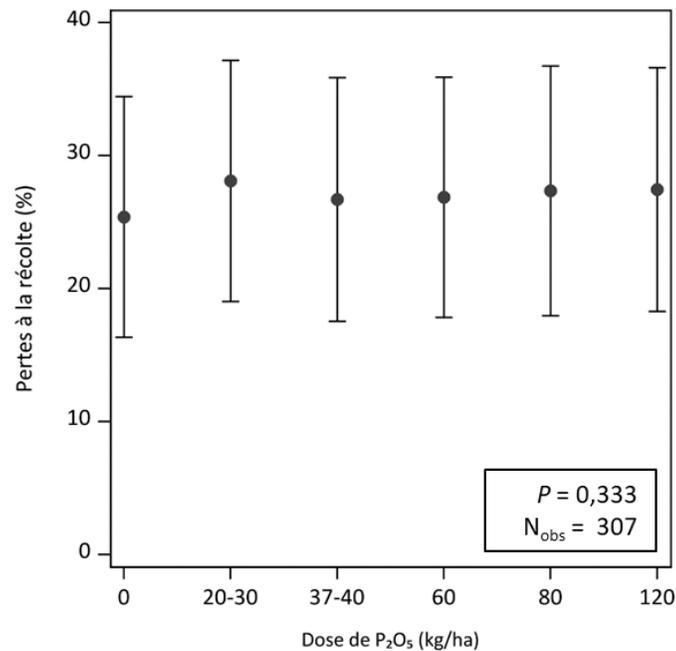


Figure 10. Effet des doses de P₂O₅ sur les pertes à la récolte.

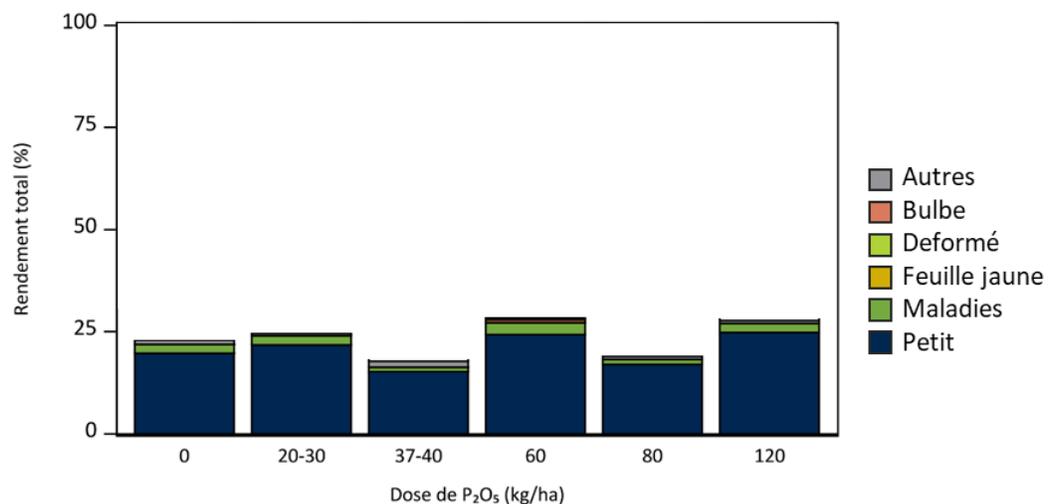


Figure 11. Répartition des pertes à la récolte en fonction des doses croissantes de P₂O₅.

3.2.4 Diagnostic nutritionnel et exportations en phosphore

Les valeurs calculées d'humidité, de concentrations et d'exportations en P_2O_5 de l'oignon vert en fonction du diagnostic nutritionnel sont présentées au Tableau 14. En considérant le rendement total moyen de la population de tête, soit 61 565 kg/ha, les exportations de tête ont été en moyenne de 44 kg P_2O_5 /ha, et ont varié entre 32 et 66 kg P_2O_5 /ha. Les exportations (Figure 9) ont généralement varié de façon linéaire en fonction du rendement à l'exception du cultivar 'SSR-B0-06', lequel avait des teneurs moyennes près de deux fois plus élevées dans ses tissus que les autres cultivars.

Tableau 14. Concentrations et exportations en P_2O_5 de l'oignon vert selon le diagnostic nutritionnel

	Humidité ⁽¹⁾			Exportations ⁽²⁾			
	(%)	(kg P_2O_5 /t)		(kg P_2O_5 /ha)			
		Moy	Éc-T	Moy	Med	Min	Max
Haut rendement et équilibre nutritionnel (« population de tête »)	93	0,71	0,09	44	40	32	66
Faible rendement et équilibre nutritionnel	93	0,75	0,14	26	25	11	51
Faible rendement et déséquilibre nutritionnel	91	0,92	0,35	26	20	9	79
Haut rendement et déséquilibre nutritionnel	94	0,83	0,17	56	65	37	66

(1) Teneur en eau à la récolte.

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

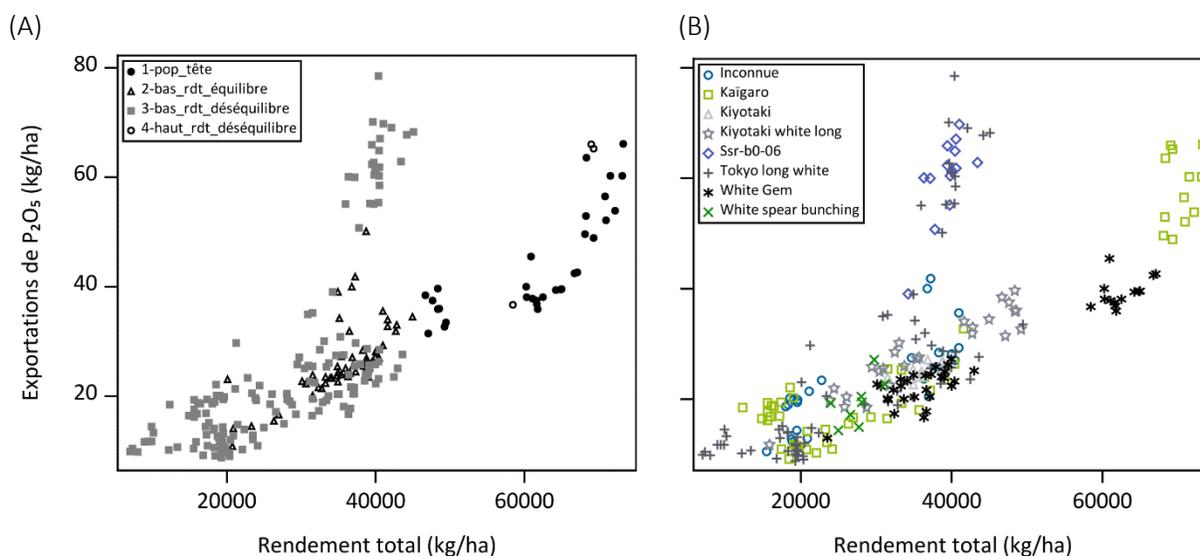


Figure 12. Exportations de P_2O_5 de l'oignon vert selon (A) le diagnostic nutritionnel et (B) le cultivar.

3.2.5 Fertilisation phosphatée

Les VSRF de P_2O_5 proposées pour la culture de l'oignon vert sont présentées au Tableau 15. Considérant l'impossibilité d'établir un indicateur de fertilité du sol sur la base du jeu de données, des VSRF sont proposées en fonction des seuils d'ISP₃ publiés par Guérin et al. (2007) et utilisés pour les cultures maraîchères dont les grilles ont été mises à jour en 2010 à partir des essais du PSEFCM sur les cultures en sol organique (carotte, céleri, chou chinois, laitue, oignon sec et pomme de terre) menées conjointement avec les essais d'oignon vert. Sous le seuil de 5 %, une dose unique de 40 kg P_2O_5 /ha (voir section 3.2.4) est jugée suffisante pour couvrir les besoins en P de la culture sur ces sols faiblement saturés puisque les exportations moyennes se situent à 44 kg P_2O_5 /ha. De 5,1 à 10 % d'ISP₃, considérant l'absence de différences entre les traitements, la médiane du plus petit groupe de doses testées, soit 30 kg P_2O_5 , est jugée suffisante. De 10 à 15 % d'ISP₃, considérant le peu de gains et le faible impact des apports de phosphore sur la qualité des rendements de l'oignon vert,

une dose comprise dans l'intervalle de 0 à 30 kg P₂O₅/ha est recommandée, selon le jugement de l'agronome en fonction de l'historique de fertilité du champ. Enfin, au-delà du seuil de 15 % d'ISP₃, une dose nulle est recommandée. Dans l'ensemble, l'ordre de grandeur des VSRF proposées est inférieur aux recommandations de l'Ontario et du Michigan (Tableau 16).

Tableau 15. Fertilisation phosphatée de l'oignon vert– Valeurs scientifiques de référence en fertilisation.

Classe de fertilité ISP ₃ (%) ⁽¹⁾	Période d'application	VSRF ⁽²⁾ (kg P ₂ O ₅ /ha)
≤ 5,0	Au semis	45 ⁽³⁾
5,1 – 10,0		30 ⁽⁴⁾
10,1 – 15,0		0-30 ⁽⁵⁾
> 15,0		0 ⁽⁶⁾

Note : Cette recommandation s'applique pour un premier semis d'oignon vert en tant que première culture de la saison.

- (1) ISP₃ : Indice de saturation du sol en phosphore : $[(P/31)/(Al/27+5 \times Fe/56)]$, éléments extraits au Mehlich-3 (Mehlich, 1984) utilisant la masse de sol d'une cuillère de 3 cc.
- (2) VSRF : Valeurs scientifiques de référence en fertilisation.
- (3) En absence de données dans cette catégorie de sol la plus pauvre, dose permettant de couvrir la moyenne des exportations de la population de tête (voir section 3.2.4).
- (4) En absence de différence entre les traitements, la dose médiane du plus petit groupe de doses testées est recommandée.
- (5) En absence de différence entre les traitements, l'intervalle entre une dose nulle et la dose médiane du plus petit groupe de doses testées est recommandée. Considérer l'historique du champ.
- (6) En absence de gains de rendements et considérant l'ISP élevé, une dose nulle est recommandée dans cette catégorie de sol.

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 l'oignon vert en sol organique au Canada et aux États-Unis.

Provinces/États	Indicateurs	Dose P ₂ O ₅ (kg/ha)	Source
Ontario (CAN)	P Olsen du sol (mg/L)		MAAARO (2011)
	0-9	100	
	10-15	90	
	16-20	80	
	21-25	70	
	26-30	60	
	31-40	50	
	41-50	30	
	51-60	20	
	61-80	0	
Michigan (É-U)	P Olsen du sol (ppm)		Warncke et al. (2004)
	Recommandation pour une récolte d'oignons de 20 à 30 t/ac.		
	40	235 à 265	
	80	150 à 175	
	100	100 à 130	
	120-135	60 à 90	
150	0		

4 FERTILISATION POTASSIQUE

4.1 Portrait et représentativité des données

La répartition des blocs des essais K de l'oignon vert selon différentes classes de propriétés de sol (0-30 cm) est présentée au Tableau 17. De manière générale, les sols du PSEFCM étaient relativement bien pourvus en K_{M3} , mais les essais supplémentaires réalisés dans le cadre du MIRVRF ont permis d'étudier davantage la réponse en sols de plus faibles teneurs en K. En rappel, les valeurs de K_{M3} (ppm) présentées utilisent la masse volumique réelle des sols organiques (voir section 1.3.1).

Tableau 17. Répartition des blocs des essais K de l'oignon vert en sol organique selon différentes classes de propriétés de sol.

pH _{eau} ⁽¹⁾	Bloc (%)	MO _{PAF} (%) ⁽²⁾	Bloc (%)	Teneur en K_{M3} (ppm) ⁽³⁾	Blocs (%)
≤ 5,5	29	≤ 70	0	≤ 200	4
5,5 – 6,0	31	70 – 80	46	200 – 400	28
6,0 – 6,5	39	80 – 90	35	400 – 600	29
6,5 – 7,0	1	> 90	20	600 – 800	25
> 7,0	0			> 800	14

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

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

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

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

4.2 Détermination des doses agronomiques optimales

4.2.1 Recherche d'indicateurs de fertilité du sol

Plusieurs facteurs peuvent influencer la biodisponibilité du K dans le sol et par conséquent, influencer la réponse de l'oignon vert aux apports d'engrais potassique. Le potentiel de plusieurs indicateurs à expliquer la réponse à la fertilisation des sols a donc été vérifié par test de partition (Cate et Nelson, 1971) soit : la teneur du sol en K extrait par la méthode Mehlich-3 (K_{M3}), la MO_{PAF}, la CEC et différents ratios de K_{M3} sur des teneurs de bases échangeables (CEC, Ca, Mg). Pour alléger la présentation des résultats, seuls les indicateurs dont la valeur de *P* du test de partition est inférieure à 0,12 sont présentés Tableau 18, accompagnés des seuils de réponse (valeur critique), ainsi que des paramètres statistiques des tests. Dans l'oignon vert cultivé en sol organique, la teneur en K_{M3} du sol et la CEC se sont révélées être les indicateurs démontrant le meilleur potentiel pour prédire le niveau de réponse aux apports de K_2O .

Tableau 18. Indicateurs de sols potentiels de la réponse aux apports de potassium de l'oignon vert

Indicateur de sol ⁽¹⁾	N _{obs} ⁽²⁾	Valeur critique	RRel ⁽³⁾ (%)	Sensitivité	Spécificité	Précision	Valeur de <i>P</i>
K_{M3} (ppm)	51	714,5	87	0,29	0,94	0,51	0,075
CEC (meq/100g)	44	97,9	89	0,58	0,83	0,68	0,012

(1) K_{M3} : Teneur en potassium extrait au Mehlich-3 (1984). CEC : Capacité d'échange cationique.

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

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

4.2.2 Effet de la dose de potassium sur le rendement

Les résultats des analyses de la variance (ANOVA) sont illustrés à la Figure 13. Comme mentionné dans la section 1.8.2, les ANOVA de l'effet de la fertilisation sur la productivité des cultures ont été effectuées en utilisant les logarithmes naturels des rapports de rendements (log_ROM) afin de pallier aux problèmes d'hétérogénéité de la variance. Les

comparaisons multiples de moyennes ont servi à sélectionner le meilleur traitement. Sur les graphiques en forêt (Figure 13), la présentation des ROM plutôt que des logarithmes du ROM vise à faciliter l'interprétation des résultats.

Dans l'ensemble, la fertilisation potassique n'a pas eu un effet significatif sur les rendements. Ainsi, lorsque les données sont analysées sans indicateur de fertilité du sol (Figure 13A), aucun gain de rendement n'est engendré par l'apport des doses allant de 30 à 240 kg K₂O/ha, par rapport au témoin 0K et les rapports de rendement (ROM) ne dépassent pas 1,015. En fait, les apports de K₂O ont plutôt eu tendance à faire diminuer les rendements lorsque les plus fortes doses (270-300 kg K₂O/ha) étaient appliquées ($P = 0,081$, $N_{obs} = 326$). Par rapport au témoin, la diminution de rendement observée est en moyenne de 5,7 % (ROM = 0,943). Ce résultat pourrait traduire une sensibilité de l'oignon à un déséquilibre N/K causé par la forte dose de K₂O jumelée à une dose relativement modérée de N (60 ou 90 N dépendamment de l'année) (Li, 2022) ou encore à une surfertilisation qui aurait nuit au développement de la plante (Lee, 2012).

Dans le modèle suivant (Figure 13B), la limite inférieure du jeu de données a été utilisée afin de créer des seuils de richesse en K_{M3}. Ainsi, la valeur de 128 ppm (plus petite valeur de sol) a été multipliée par 2 (256 ppm) et par 3 (384 ppm), formant un total de quatre classes de fertilité. Sous 128 ppm K_{M3}, aucune donnée n'était disponible pour étudier la réponse de la culture aux apports de K₂O. La valeur moyenne des exportations (178 kg K₂O/ha), soit le K qui quitte le site de production, est donc retenue. De 128 à 256 ppm, bien que la dose de K n'ait pas eu d'effet significatif sur le ROM, il appert que les groupes de doses 30-42 et 75-82 kg K₂O/ha affichent un ROM inférieur à 1, tandis que la dose de 100 kg K₂O/ha est la plus petite dose qui mène à un ROM supérieur à 1 (ROM = 1,085), indiquant un possible gain de rendement malgré le faible nombre d'observations. La dose de 100 kg K₂O/ha est donc proposée. Ce choix repose également sur la constitution du jeu de données qui ne permet pas hors de tout doute de conclure qu'un apport moindre est suffisant. Cette dose permet aussi de réduire l'écart entre les doses de la catégorie inférieure (178 kg K₂O/ha) et supérieure (30-42 kg K₂O/ha) en plus de couvrir un peu plus de la moitié des exportations. Dans la classe de fertilité suivante (256-384 ppm), aucune différence n'a été notée entre les doses. La plus petite dose testée, soit 30-42 kg K₂O/ha, est donc retenue. Dans les sols dont les teneurs en K_{M3} sont de 384 ppm et plus, en absence d'effet significatif, le sol est considéré en mesure de fournir suffisamment de K à la culture et une dose nulle est retenue.

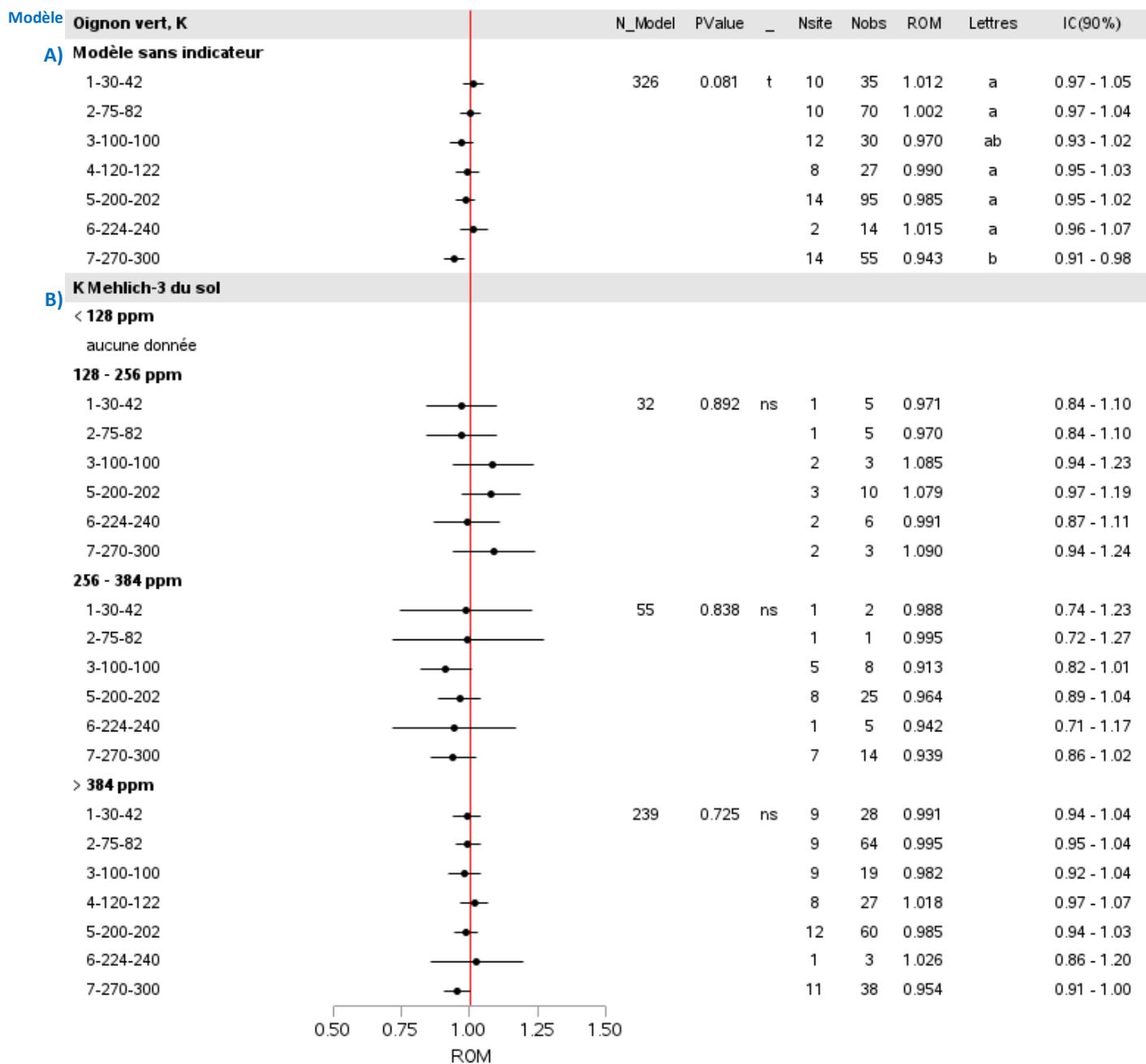


Figure 13. Résultats des analyses de variance sur la réponse aux doses croissantes de K_2O . N_model : nombre d'observations du modèle; Nsite : nombre de sites; Nobs : nombre d'observations; ROM : rapport de rendement (rendement parcelle fertilisée/rendement parcelle témoin); IC : Intervalle de confiance; Lettres : résultats du test de comparaison des moyennes.

4.2.2.1 Calibres à la récolte

Tel que décrit à la section 1.9, les oignons verts ont été classés et pesés à la récolte selon les calibres décrits au Tableau 7 (p. 19). L'analyse des calibres a été produite sur les proportions des calibres vendables, et n'inclut donc pas les oignons verts de trop petit diamètre (< 9,5 mm), lesquels sont déclassés selon les normes du marché. Dans l'ensemble, les oignons verts récoltés étaient presque en totalité de calibre Moyen avec seulement quatre parcelles ayant produit des oignons verts de calibre Gros avec des doses de 0 (2 fois), 80 et 270 kg K_2O /ha. L'occurrence des calibres Gros est donc considérée comme anecdotique. En somme, il a été considéré que la fertilisation potassique n'a pas influencé les proportions de calibres récoltés et aucun ajustement des VSRF n'a été fait sur ce critère.

4.2.2.2 Pertes à la récolte

Dans le cadre des essais, les rendements totaux et vendables ont été mesurés afin d'évaluer les pertes à la récolte (voir la section 1.9 pour plus de détails). Lorsque toutes les données sont analysées ensemble, sans indicateur de sol, la proportion des pertes a varié de 22,5 % pour le groupe de doses 30-42 kg K₂O/ha, à 32,7 % pour le groupe de doses 224-240 kg K₂O/ha ($P = 0,001$; $N_{\text{obs}} = 331$; Figure 14A). Les résultats sont cependant inconsistants d'un groupe de doses à l'autre. L'analyse des sols selon leur catégorie de richesse en K ne permet pas de dégager davantage d'information. Dans les trois catégories, les pertes moyennes sont autour de 25 %. Un effet significatif de la fertilisation est perceptible dans les sols comportant de 128 à 256 ppm K_{M3} (Figure 14B, b), mais celui-ci reste encore une fois inconsistant, probablement à cause du faible nombre d'observations ($N_{\text{obs}} = 30$). Dans les sols dont la teneur en K_{M3} dépasse 256 ppm (Figure 14B, c et d), la fertilisation potassique n'a pas influencé les pertes à la récolte ($P = 0,896$ et $P = 0,385$ respectivement pour les catégories (c) 257-384 ppm et (d) 385 ppm et plus). À l'instar des essais N et P, les pertes à la récolte étaient un calibre trop petit, et en moindre importance pour cause de maladie (données non présentées). Aucun ajustement de VSRF n'est donc proposé sur ce critère.

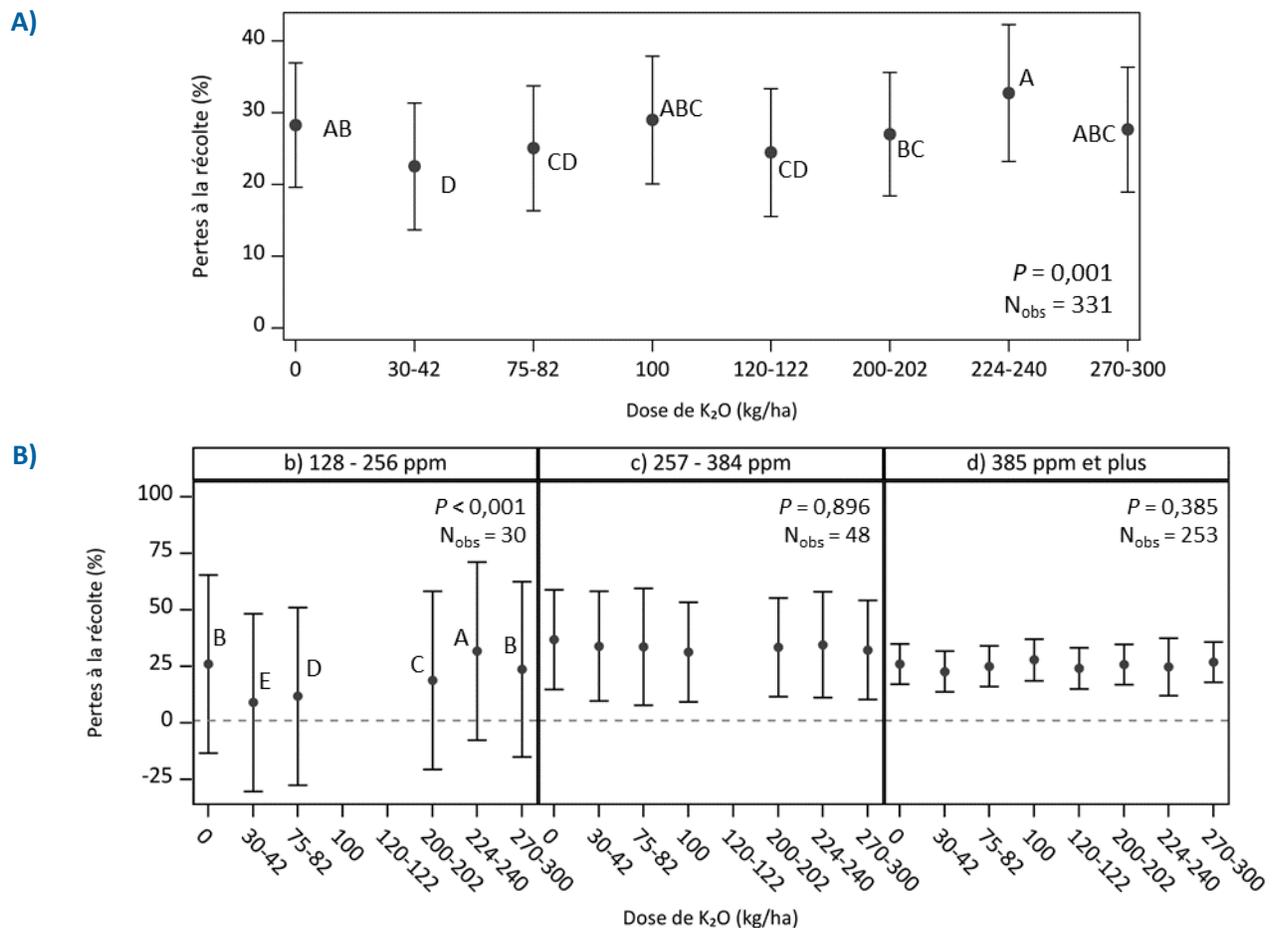


Figure 14. Effet des doses de K₂O sur les pertes à la récolte A) selon le modèle sans indicateur et B) selon la richesse du sol en K_{M3}.

4.2.3 Diagnostic nutritionnel et exportations

À l'instar des essais précédents (N et P), le diagnostic nutritionnel a été effectué sur la biomasse récoltée (consulter les sections 1.8.4 et 2.2.4 pour plus de détails sur l'analyse et l'interprétation de ses résultats). Les concentrations et les

exportations en K₂O de l'oignon vert en fonction du diagnostic nutritionnel sont présentées au Tableau 19 et à la Figure 15. La valeur médiane des exportations est de 165 kg K₂O/ha, bien qu'elles peuvent atteindre 261 K₂O/ha selon le cultivar produit. Le cultivar présentant une plus grande valeur d'exportations en K₂O est le 'Ssr-b0-06'.

Tableau 19. Concentrations et exportations en K₂O de l'oignon vert selon le diagnostic nutritionnel

	Humidité ⁽¹⁾			Exportations ⁽²⁾			
	(%)	(kg K ₂ O/t)		(kg K ₂ O/ha)			
		Moy	Éc-T	Moy	Med	Min	Max
Haut rendement et équilibre nutritionnel (« population de tête »)	93	2,85	0,34	178	165	124	261
Faible rendement et équilibre nutritionnel	92	3,15	0,56	108	104	49	201
Faible rendement et déséquilibre nutritionnel	91	3,76	1,24	106	85	28	304
Haut rendement et déséquilibre nutritionnel	94	2,93	0,48	196	194	155	241

(1) Teneur en eau à la récolte.

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

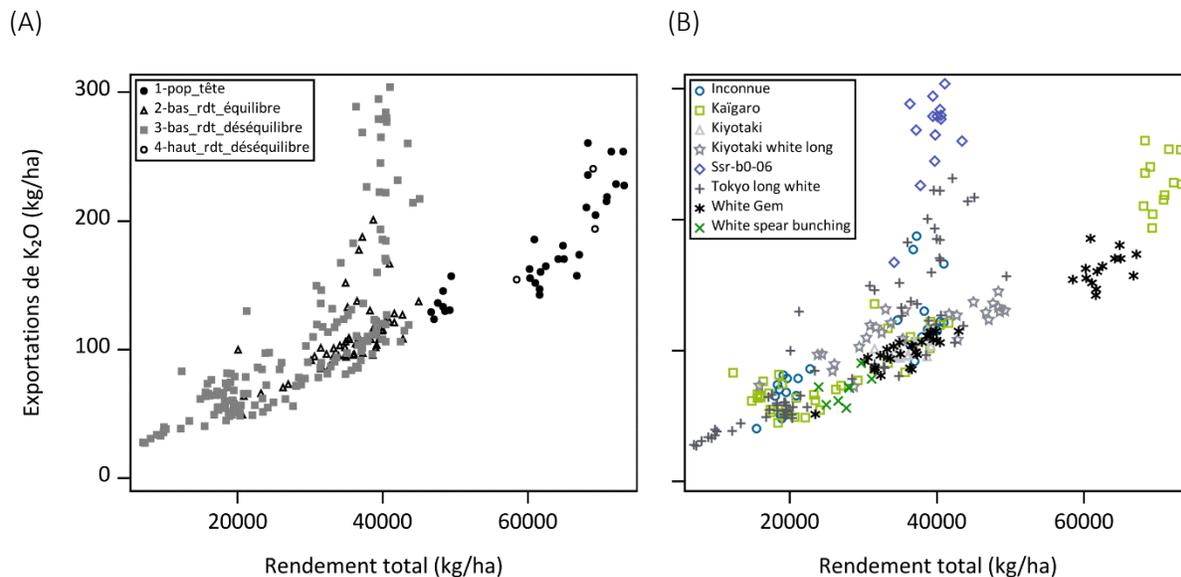


Figure 15. Exportations en potassium de l'oignon vert (A) selon le diagnostic nutritionnel et (B) selon le cultivar.

4.2.4 Fertilisation potassique proposée

Les VSRF de K₂O proposées pour la culture de l'oignon vert sont présentées au Tableau 20. Bien qu'il n'ait pas été possible de déterminer des seuils critiques par les tests de partition (section 4.2.1), considérant la très faible proportion de données en sol moins bien pourvu et l'importance des quantités de K qui quittent le site de production, le jeu de données a tout de même été divisé en quatre plages pour définir quatre classes distinctes de fertilité selon la teneur en K_{M3} des sols (voir section 4.2.2). Pour ce faire, la limite inférieure du jeu de données (128 ppm) a été multipliée par 2 (256 ppm) et par 3 (384 ppm) afin de créer des seuils de richesse en K_{M3}. Par ailleurs, aucun ajustement des VSRF n'a été nécessaire sur la base des analyses de qualité (calibres) ou de pertes (maladies, feuille jaune, déformation, etc.).

Ainsi, en absence de données pour les sols de teneur en K_{M3} inférieure à 128 ppm, afin de diminuer les risques de pertes, et considérant les exportations de K dont la valeur médiane est de 165 kg K₂O/ha (voir section 4.2.3), la dose de 160 kg K₂O/ha est proposée. Dans les sols dont la teneur en K_{M3} se situe de 128 à 256 ppm, la dose de 100 kg K₂O/ha, soit la plus

petite dose qui mène à un ROM supérieur à 1 (ROM = 1,085) est retenue malgré l'absence d'un effet significatif de la fertilisation sur les rendements. Ce choix repose également sur la constitution du jeu de données qui ne permet pas hors de tout doute de conclure qu'un apport moindre serait suffisant. De plus, cette dose permet de réduire l'écart entre les doses des catégories inférieure (160 kg K₂O/ha) et supérieure (30-42 kg K₂O/ha) en plus de couvrir un peu plus de la moitié des exportations. Dans la classe de fertilité suivante (256-384 ppm), en absence de différence entre les doses et l'absence de gain, la dose médiane du plus petit groupe de doses testées (40 kg K₂O/ha) est retenue comme VSRF. Dans les sols dont les teneurs en K_{M3} sont de 384 ppm et plus, en l'absence d'effet significatif et l'absence de gains, une dose nulle est proposée. En effet, la forte teneur en K_{M3} du sol suppose que celui-ci est en mesure de fournir suffisamment de K à la culture. Ces recommandations sont similaires sinon inférieures aux recommandations de l'Ontario et du Michigan (Tableau 21).

Tableau 20. Fertilisation potassique de l'oignon vert – Valeurs scientifiques de référence en fertilisation.

Classe de fertilité K Mehlich-3 (ppm) ⁽¹⁾	Période d'application ⁽²⁾	Fractionnement ⁽²⁾ (kg K ₂ O/ha)	VSRF ⁽³⁾ (kg K ₂ O/ha)
< 128	Au semis	90	160 ⁽⁴⁾
	30 jours après le semis	70	
128 – 256	Au semis	70	100 ⁽⁵⁾
	30 jours après le semis	30	
256 – 384	Au semis	-	40 ⁽⁶⁾
> 384	-	-	0 ⁽⁷⁾

Note : Cette recommandation s'applique pour un premier semis d'oignon vert en tant que première culture de la saison.

(1) Les ppm sont utilisées afin d'éviter un biais quant à la masse volumique du sol.

(2) Les périodes d'application et les fractionnements sont proposés tels que testés.

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

(4) En absence de données dans cette catégorie de sol la plus pauvre, dose permettant de couvrir la majorité de la moyenne des exportations de la population de tête (voir section 4.2.3).

(5) En absence de différence entre les traitements, dose permettant d'obtenir le meilleur gain de rendement.

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

(7) 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 l'oignon vert en sol organique au Canada et aux États-Unis.

Provinces/États	Indicateurs	Dose K ₂ O (kg/ha)	Source
	K du sol (mg/L)		
Ontario (CAN)	0-15	230	MAAARO (2011)
	16-30	220	
	31-45	210	
	46-60	200	
	61-80	170	
	81-100	150	
	101-120	120	
	121-150	80	
	151-180	40	
	181-210	0	
	211-250	0	
	250+	0	
	K du sol (ppm)	Recommandation pour une récolte d'oignons de 20 à 30 t/ac.	
Michigan (É-U)	100-150	335	Warncke et al. (2004)
	200	275 à 330	
	250	190 à 245	
	300-360	110 à 160	
	380	55 à 80	
	400	0	

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 de l'oignon vert 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. Conjointement avec les VSRF de radis (NPK) et d'oignon sec (K), ces VSRF finalisent le travail entrepris en 2008 dans le cadre des essais du PSEFCM sur les cultures maraichères en sol organique.

Les VSRF ont été déterminées à partir des données des essais du PSEFCM (2008-2012) et du MIRVRF (2020-2021). Celles-ci ont été établies sur la base des gains en rendement total par rapport à un témoin non fertilisé selon quatre classes de fertilité en N-NO₃ du sol au semis. La dose recommandée varie de 30 à 120 kg N/ha, ce qui est une diminution par rapport aux doses actuellement d'usage (60 à 180 kg N/ha, oignon sec en sol organique; CRAAQ, 2010). En considérant que le N-NO₃ du sol extrait au KCl ne fait actuellement pas partie des analyses de routine des entreprises agricoles, une alternative basée sur la teneur en N total du sol est suggérée, bien que ce paramètre ne s'est pas montré un indicateur de fertilité performant. Quant à la fertilisation phosphatée, elle est précisée par l'indice de saturation du sol en P (ISP₃) lequel est reconnu pour être un meilleur indicateur agroenvironnemental de la biodisponibilité du P que la concentration du P considérée seule. Finalement, pour le potassium, les VSRF sont modulées selon la teneur en potassium (K_{M3}) du sol comme indicateur de fertilité. 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 de l'oignon vert 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 OIGNON VERT EN SOL ORGANIQUE – VALEURS SCIENTIFIQUES DE RÉFÉRENCE EN FERTILISATION

AZOTE			
Classe de fertilité N-NO ₃ au semis (ppm) ⁽¹⁾	Période d'application ⁽²⁾	Fractionnement (kg N/ha)	VSRF ^(3,4) (kg N/ha)
< 27,5	Au semis	(90)	(120) ⁽⁵⁾
	Au stade 30 jours après le semis	(30)	
27,5 – 55	Au semis	60	90 ⁽⁶⁾
	Au stade 30 jours après le semis	30	
55 – 110	Au semis	30	60 ⁽⁶⁾
	Au stade 30 jours après le semis	30	
> 110	Au semis	–	30 ⁽⁷⁾

PHOSPHORE		
Classe de fertilité ISP ₃ (%) ⁽⁸⁾	Période d'application ⁽²⁾	VSRF ⁽³⁾ (kg P ₂ O ₅ /ha)
≤ 5,0	Au semis	45 ⁽⁹⁾
5,1 – 10,0		30 ⁽¹⁰⁾
10,1 – 15,0		0-30 ⁽¹¹⁾
> 15,0		0 ⁽¹²⁾

POTASSIUM			
Classe de fertilité K Mehlich-3 (ppm) ⁽¹³⁾	Période d'application ⁽²⁾	Fractionnement (kg K ₂ O/ha)	VSRF ⁽³⁾ (kg K ₂ O/ha)
< 128	Au semis	90	160 ⁽¹⁴⁾
	30 jours après le semis	70	
128 – 256	Au semis	70	100 ⁽¹⁵⁾
	30 jours après le semis	30	
256 – 384	Au semis	-	40 ⁽¹⁰⁾
> 384	-	-	0 ⁽¹⁶⁾

Note : Ces recommandations s'appliquent pour un premier semis d'oignon vert en tant que première culture de la saison.

- (1) Le N-NO₃ a été dosé au KCl 2M en laboratoire sur la profondeur 0-30 cm. Dans le cas où la teneur en N-NO₃ du sol ne peut pas être évaluée au semis par la méthode proposée, la dose totale recommandée varie de 60 à 90 kg N/ha.
- (2) Les périodes d'application sont suggérées telles que testées.
- (3) Valeur scientifique de référence en fertilisation.
- (4) Les VSRF ont été établies pour des sols ayant une MO_{PAF} de plus de 70 %.
- (5) Dans cette classe de fertilité la plus pauvre, dose supérieure à la dose de 90 N qui permet de réduire les pertes et de couvrir la majorité des exportations.
- (6) Dose agronomique optimale dans cette catégorie de sol.
- (7) Correspond à la plus petite dose testée.
- (8) ISP₃ : Indice de saturation du sol en phosphore : [(P/31)/(Al/27+5×Fe/56)], éléments extraits au Mehlich-3 (Mehlich, 1984) utilisant la masse de sol d'une cuillère de 3 cc.
- (9) En absence de données dans cette catégorie de sol la plus pauvre, dose permettant de couvrir la moyenne des exportations de la population de tête (voir section 3.2.4).
- (10) En absence de différence entre les traitements, la dose médiane du plus petit groupe de doses testées est recommandée.
- (11) En absence de différence entre les traitements, l'intervalle entre une dose nulle et la dose médiane du plus petit groupe de doses testées est recommandée. Considérer l'historique du champ.

- (12) En absence de gains de rendements et considérant l'ISP élevé, une dose nulle est recommandée dans cette catégorie de sol.
- (13) Les ppm sont utilisées afin d'éviter un biais quant à la masse volumique du sol.
- (14) En absence de données dans cette catégorie de sol la plus pauvre, dose permettant de couvrir la majorité de la moyenne des exportations de la population de tête (voir section 4.2.3).
- (15) En absence de différence entre les traitements, dose permettant d'obtenir le meilleur gain de rendement.
- (16) Dose nulle proposée considérant l'absence de réponse et la richesse du sol en K_{M3} .



Ces tableaux présentent les résultats scientifiques d'essais de fertilisation. La grille officielle du MAPAQ, établie par le Comité scientifique, fait l'objet d'une publication séparée. Celle-ci peut différer des valeurs scientifiques de référence en fertilisation obtenues par l'IRDA et présenter dans ce document, en raison de la prise en compte de considérations agronomiques ou techniques autres que les données des présents essais.

8 RÉFÉRENCES

- 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.
- Brewster, J.L. (2008). *Onions and other vegetable alliums*, 2^e ed. Crop production science in horticulture series. 432 pages. Disponible sur <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/pdf/10.5555/20083197696>.
- 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, R. et Nelson, L. (1971). A Simple Statistical Procedure for Partitioning Soil Test Correlation Data Into Two Classes. *Soil Science Society of America Journal*, 35(4), 658-660.
- 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* (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.
- FADQ. (2014-2018). La Financière agricole du Québec. Assurance récolte - Rendements de référence. [en ligne] <https://www.fadq.qc.ca/statistiques/assurance-recolte/rendements-de-reference> Consulté le 1 novembre 2023.
- Guérin, J., Parent, L. É., et Abdelhafid, R. (2007). Agri-environmental thresholds using Mehlich III soil phosphorus saturation index for vegetables in histosols. *Journal of environmental quality*, 36(4), 975-982.
- Guérin, J. (2009). *Diagnostic agroenvironnemental de la fertilisation phosphatée des cultures maraîchères en sols organiques*. Thèse de doctorat. Université Laval.
- Hubert, M. et Debryne, 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., 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., Pellerin, A., Alimi, A. R. A., Tremblay, C., Simard, R. R. et Fortin, J. (2000). An Agri-Environmental Phosphorus Saturation Index for Acid Coarse-Textured Soils. *Journal of Environmental Quality*, 29(5), 1561-1567.
- Khiari, L., Parent, L. et Tremblay, N. (2001a). Critical Compositional Nutrient Indexes for Sweet Corn at Early Growth Stage. *Agronomy Journal*, 93(4), 809-814.
- Khiari, L., Parent, L. et Tremblay, N. (2001b). Selecting the High-Yield Subpopulation for Diagnosing Nutrient Imbalance in Crops. *Agronomy Journal*, 93(4), 802-808.
- Khiari, L. et Parent, L. (2005). Phosphorus transformations in acid light-textured soils treated with dry swine manure. *Canadian Journal of Soil Science*, 85(1), 75-87.

- Khiari, L., Gallichand, J. et Bouslama, S. (2017). Volume or weight soil sampling for extracting Mehlich III elements with routine analyses? *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 48(15).
- 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
- MAAARO (2011). Recommandations pour les cultures légumières 2010-2011. Publication 363F. Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario.
- MAAARO (2017). Guide agronomique des grandes cultures. Publication 811F. Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario. C. Brown, J. Follings, M. Moran, et B. Rosser, Eds., 492 pages.
- MDDEP (2010). Règlement sur les exploitations agricoles (REA). Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs. http://www.environnement.gouv.qc.ca/milieu_agri/agricole/index.htm

- Mehlich, A. (1984). Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. *Communications in soil science and plant analysis*, 15(12), 1409-1416.
- Menon, R. G. et Chien, S. H. (1995). Soil testing for available phosphorus in soils where phosphate rock-based fertilizers are used. *Fertilizer research*, 41(3), 179-187.
- 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, L., Pellerin, A. et Khiari, L. (2002). Le flux et la dynamique du phosphore dans les sols agricoles québécois. Colloque sur le phosphore.
- Parent, L. et Pellerin, A. (2006). Fertilisation azotée en terre noire dans le Sud-Ouest du Québec (2002-2006). Département de sols et de génie agroalimentaire. Université Laval-MAPAQ, Québec, Canada. Pages 10-19. [en ligne] <https://www.agrireseau.net/documents/79957/fertilisation-azotee-en-terre-noire-dans-le-sud-ouest-du-quebec-2002-2006>
- Parent, L., Natale, W. et Ziadi, N. (2009). Compositional nutrient diagnosis of corn using the Mahalanobis distance as nutrient imbalance index. *Canadian Journal of Soil Science*, 89(4), 383-390.
- Parent, 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*, vol. 4, p. 63683.
- Pellerin, A., Parent, L., Fortin, J., Tremblay, C., Khiari, L. et Giroux, M. (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.
- 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 échalotes et oignons verts selon les divisions de recensement (DR). [en ligne] <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/95-634-x/2017001/article/54905/catm-ctra-162-fra.htm> consulté le 1^{er} 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.

WIFSS (2016). The Western Institute for Food Safety and Security. *Green onions*. University of California, Davis. [en ligne]
https://www.wifss.ucdavis.edu/wp-content/uploads/2016/10/GreenOnions_PDF.pdf 5 pages.