



Rapport de recherche

FERTILISATION POTASSIQUE DE L'OIGNON SEC EN SOL ORGANIQUE

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

FASCICULE 13 :
Oignon sec en sol organique
Version finale - Comité scientifique

Date : 17 avril 2024

Responsable scientifique : Christine Landry, agr., biologiste, Ph. D.

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



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

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

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

Question ou commentaire

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

Auteurs du rapport

Auteurs principaux

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

Collaborateurs au contenu

Fertilisation

Stéphanie Houde, agr., M. Sc., IRDA

Base de données

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

Essais

Julie Mainguy, agr., B. Sc., IRDA
Mylène Marchand, agr., M. Sc., IRDA
Aurélien 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., Guillemette, S., Forest-Drolet, J., Jacques, M.M. et Joseph, C.-A. 2024. Fertilisation de l'oignon sec en sol organique. Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation du Québec (2020-2023). Fascicule 13. Version finale. IRDA. 36 pages.

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

Mise en contexte

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

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

Les intervenants qui souhaitent consulter les rapports scientifiques (fascicules) sur lesquels s'appuient les grilles MAPAQ sont invités à consulter la fiche de la chercheuse Christine Landry sur le site web de l'IRDA, où se retrouve l'ensemble des publications, à cette adresse : <https://irda.qc.ca/fr/publications/?r=1745&ett=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	7
1.1	Provenance des données.....	7
1.2	Localisation des sites	7
1.3	Caractérisation physico-chimique des sols des sites d'essais.....	8
1.3.1	Teneur en K en fonction de la méthodologie d'extraction et des facteurs de conversion utilisés	8
1.4	Dispositifs expérimentaux et traitements	9
1.4.1	Dispositifs	9
1.4.2	Traitements.....	9
1.4.3	Doses de potassium.....	9
1.5	Rendements.....	10
1.6	Aspects additionnels pour l'interprétation des résultats	11
1.6.1	Variété culturale	11
1.6.2	Précédent culturel	12
1.6.3	Irrigation	12
1.7	Calculs et analyses statistiques.....	12
1.7.1	Détermination des classes de fertilité des sols.....	13
1.7.2	Détermination des doses optimales de fertilisants	14
1.7.3	Diagnostic nutritionnel, quantités d'éléments nutritifs exportés.....	15
1.7.4	Analyses sur la qualité, les calibres, les pertes à la récolte et les pertes à l'entreposage	16
2	Fertilisation potassique	18
2.1	Portrait et représentativité des données.....	18
2.2	Détermination des doses agronomiques optimales.....	18
2.2.1	Recherche d'indicateurs de fertilité du sol	18
2.2.2	Effet de la dose de potassium sur le rendement	19
2.2.3	Effet de la dose de potassium sur les pertes, le calibre et la qualité à la récolte ...	20
2.2.4	Diagnostic nutritionnel et exportations.....	26
2.2.5	Fertilisation potassique proposée	28
3	Conclusion	31
4	Oignon sec en sol organique – valeurs scientifiques de référence en fertilisation	32
5	Remerciements.....	33
6	Références	34

Liste des tableaux

Tableau 1. Description des traitements selon le programme d'essais et la teneur en potassium Mehlich-3 des sites.....	10
Tableau 2. Statistiques descriptives des rendements de l'oignon sec des essais K.....	10
Tableau 3. Variétés culturales ayant fait l'objet des essais K de l'oignon jaune sec.....	12
Tableau 4. Description des calibres vendables et non vendables de l'oignon sec pour le classement à la récolte dans les essais du PSEFCM et du MIRVRF.....	17
Tableau 5. Répartition des blocs des essais K d'oignons secs selon différentes classes de propriétés de sol après la validation des données.....	18
Tableau 6. Valeurs critiques des indicateurs potentiels de sols significatifs selon les tests de Cate-Nelson pour les essais K d'oignon sec.....	19
Tableau 7. Concentrations et exportations en K_2O des oignons secs selon le diagnostic nutritionnel.....	27
Tableau 8. Fertilisation potassique de l'oignon sec – Valeurs scientifiques de référence en fertilisation.....	29
Tableau 9. Comparaison des recommandations en K_2O pour la production des d'oignons secs au Canada et aux États-Unis.....	30

Liste des figures

Figure 1. Répartition géographique des sites d'essais.....	7
Figure 2. Rendements moyens totaux et vendables par site en fonction des traitements de fertilisation.....	11
Figure 3. Définitions des quadrants d'un test de partition binaire de Cate-Nelson (1971).....	14
Figure 4. Résultats des analyses de variance sur la réponse de l'oignon sec aux doses croissantes de potassium.	20
Figure 5. Effet non significatif de la dose de K_2O sur les calibres de l'oignon sec à la récolte et proportions des calibres vendables toutes doses confondues.....	21
Figure 6. Effet de la dose de K_2O sur les pertes d'oignons secs à la récolte (A) selon la teneur en K_{M3} du sol et (B) toutes teneurs en K_{M3} du sol confondu.	22
Figure 7. Pourcentage de pertes selon la teneur en K_{M3} du sol (courbe) et table des pourcentages prédits de pertes par le modèle pour différentes valeurs de K_{M3}	23
Figure 8. Cause de rejet des oignons secs à la récolte en fonction des traitements de fertilisation.	23
Figure 9. Effet de la dose de K_2O sur la fréquence d'occurrence de cœur double à la récolte.	24
Figure 10. Effet de la dose de K_2O sur les pertes d'oignons secs suivant une période d'entreposage.....	25
Figure 11. Effet de la dose de K_2O sur la fréquence d'occurrence de différents niveaux de problématique de plateau racinaire suivant une période d'entreposage.....	26
Figure 12 Exportations de K_2O de l'oignon sec selon (A) le diagnostic nutritionnel et (B) le cultivar.	28

1 PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES ESSAIS ET DES ANALYSES

1.1 Provenance des données

Dans le cadre du MIRVRF, la détermination des classes de sol des valeurs scientifiques de référence en fertilisation (VSRF) de l'oignon sec cultivé en sols organiques a été calculée à partir des données du PSEFCM (2009-2012) et du MIRVRF (2020-2022).

1.2 Localisation des sites

Les essais d'oignon sec cultivé en sol organique ont été réalisés exclusivement dans la région de la Montérégie (Figure 1). En conséquence, les résultats de la présente étude peuvent ne pas être totalement représentatifs des conditions et de la réalité agro-pédoclimatiques qui sévissent en dehors de cette région. De plus, l'utilisation de ces grilles pour une production en sol minéral n'est pas suggérée.

Au Canada, de 2018 à 2022, la superficie cultivée en oignons secs a été en moyenne de 5 856 hectares par année, totalisant un volume d'un peu plus de 250 tonnes métriques annuellement. De ce nombre, une forte proportion de la production se retrouve sur le territoire québécois. En effet, le Québec a produit 46 % (132 249 tonnes métriques) du tonnage canadien de 2022 (Statistiques Canada, 2023). À l'échelle provinciale, la production se trouve concentrée dans le sud-ouest où se situent en majorité les sols organiques du Québec (Asselin, 1992). En 2016, plus de 90 % des hectares cultivés en oignons secs étaient en Montérégie, soit 1 820 ha sur 2000 ha (Télétection et analyse géospatiale, 2018). La répartition géographique des essais s'avère donc représentative des régions administratives concernées par la culture.

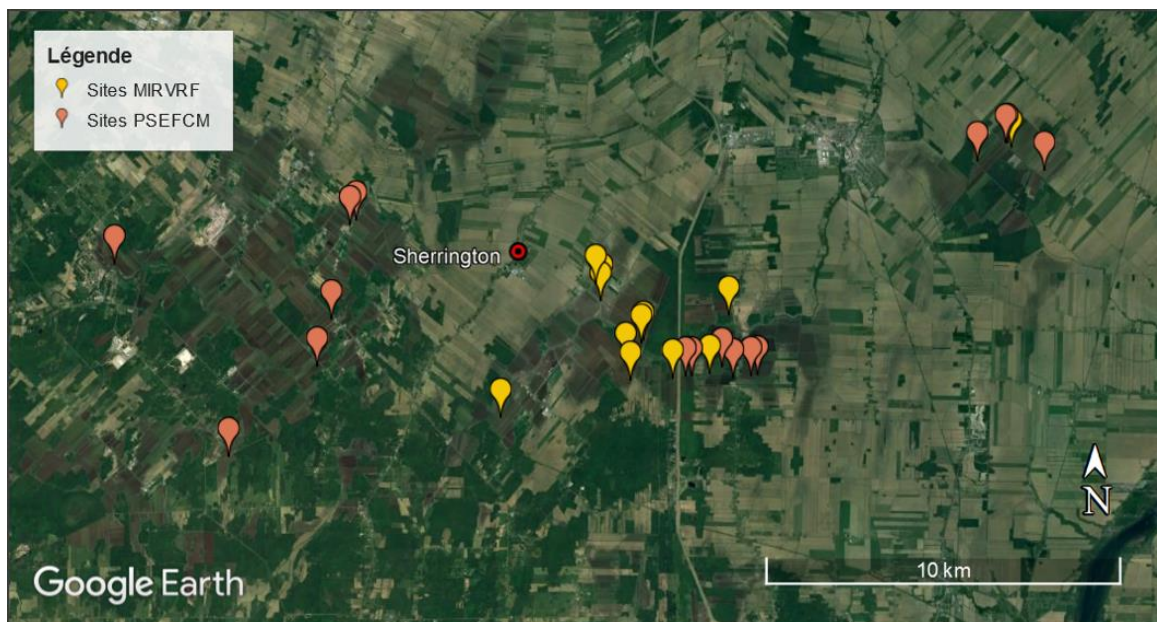


Figure 1. Répartition géographique des sites d'essais.

1.3 Caractérisation physico-chimique des sols des sites d'essais

Les analyses physico-chimiques du sol (0-30 cm) ont été effectuées par bloc afin de pouvoir associer une valeur propre à chacune de ces variables pour chaque valeur de rendement étudiée. Plusieurs paramètres physico-chimiques ont été mesurés, soit le pH_{eau} , le pH_{SMP} , la teneur en matière organique (méthode par perte au feu, MO_{PAF}), la teneur en éléments nutritifs extractibles au Mehlich-3 et la masse volumique apparente. De plus, pour les sites du MIRVRF, une analyse des profils de sol a été réalisée par l'équipe des pédologues de l'IRDA, laquelle a servi à identifier les séries de sols et leurs particularités pédologiques, à valider le groupe de textures et à prendre en considération l'état de santé du sol lors de l'analyse exploratoire. Les caractéristiques physico-chimiques les plus pertinentes à la discussion sont présentées à la section 2.1.

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 lors des calculs la densité moyenne spécifique au type de sols analysés. Dans le cas où la masse des sols minéraux (3 g) est employée pour des sols organiques, les concentrations obtenues en ppm sont alors fortement sous-estimées puisque la quantité d'un élément dosé est extraite à partir d'une masse de sols beaucoup plus petite que ce qui est supposé.

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

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

2,24 devient **444 ppm** une fois 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 8). 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 ont été menés en conditions réelles de production par des entreprises agricoles exploitant des sols organiques et entretenus selon une régie de production conventionnelle. Les oignons ont été produits à partir de semence, tels que généralement faits par les producteurs (PRISME, 2015b.). Dans tous les essais, les traitements (doses d'engrais testées) étaient disposés selon un plan en 3 à 5 blocs complètement aléatoires, selon l'année de réalisation de l'essai et l'espace disponible. Les parcelles constituant les unités expérimentales mesuraient de 6 à 8 m de longueur et de 1,8 à 2,3 m de largeur. Les semis ont eu lieu entre le 21 avril et le 24 mai, et la durée moyenne des essais a été de 120 jours.

1.4.2 Traitements

Dans un souci de complémentarité des essais, le choix des traitements des essais du MIRVRF a été réalisé tel qu'inscrit au protocole officiel du PSEFCM, ayant servi à réaliser la majorité des essais contenus dans la base de données des essais de fertilisation du MAPAQ. Ainsi, la teneur du sol en K_{M3} a été utilisée *a priori* afin de classer les sols comme étant « à faible teneur » ou « à haute teneur » en K de part et d'autre du seuil préétabli du PSEFCM de 400 kg/ha de K_{M3} (section 1.4.3). Des doses plus élevées de K_2O ont donc été testées dans les sols dits « à faibles teneurs en K_{M3} » que dans les sols dits à « fortes teneurs en K_{M3} ». 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 K_{M3} et P_{M3} des aires d'essais n'étaient validées qu'après l'implantation de ceux-ci, c'est-à-dire pendant la caractérisation des sites. Conséquemment, certains sites ont été mal classés et n'ont pas reçu les doses prévues au protocole. Environ la moitié des vingt-cinq sites ont finalement été mal classés quant à leur teneur en K_{M3} . Ceci 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 troisième niveau de traitement de chaque élément afin qu'ils ne soient pas limitants.

1.4.3 Doses de potassium

Les traitements des essais potassiques du PSEFCM correspondaient à quatre doses de K_2O variant de 0 à 120 kg/ha ou de 0 à 300 kg/ha. Pour les essais du MIRVRF, cinq doses étaient testées et celles-ci variaient de 0 à 160 kg/ha ou de 0 à 320 kg/ha (Tableau 1). Les parcelles ont également reçu des doses complémentaires de 50 kg/ha de P_2O_5 et de 100 kg/ha de N, qui se voulaient non limitantes. Cependant, *a posteriori*, selon la mise à jour 2010 de la grille de référence en fertilisation azotée du CRAAQ (2010), les doses recommandées selon la

teneur en N total du sol varient de 60 à 180 kg N/ha. Puisque la nutrition en K est influencée par la nutrition en N, il a été vérifié que la dose de 100N n'a pas empêché de mesurer adéquatement la réponse en K (voir section 1.7.2.1). Les doses de K₂O testées, ainsi que les modes et les périodes d'applications sont présentés au Tableau 1. Ces doses ont été apportées sous forme de muriate de potassium (0-0-60).

Tableau 1. Description des traitements selon le programme d'essais et la teneur en potassium Mehlich-3 des sites

Essais K				Doses de K ₂ O (kg/ha)						
Chercheur (Année)	Nombre de sites	K _{M3} (kg/ha)	Mode et période d'application	T9	T10	T11	T12	T13	T14	
PSEFCM (2009-2012)	12	≤ 400	À la volée avant semis	0	0	100	200			
			En bande au semis	0	60	60	60			
			En bande au stade 15 cm (30-40 jours après semis)	0	40	40	40			
	Apport total				0	100	200	300		
	2	> 400	À la volée avant semis	0	0	0	0			
			En bande au semis	0	25	50	70			
En bande au stade 15 cm (30-40 jours après semis)			0	15	30	50				
Apport total				0	40	80	120			
MIRVRF (2020-2022)	5	≤ 400	À la volée au semis		0	0	40	120	200	
			En bande au semis		0	60	60	60	60	
			En bande au stade 15 cm (30-40 jours après semis)		0	20	60	60	60	
	Apport total				0	80	160	240	320	
	6	> 400	À la volée au semis		0	0	0	0	0	
			En bande au semis		0	25	50	70	90	
En bande au stade 15 cm (30-40 jours après semis)				0	15	30	50	70		
Apport total				0	40	80	120	160		

1.5 Rendements

Les statistiques descriptives des rendements totaux, des rendements vendables et des pourcentages de pertes à la récolte sont présentées au Tableau 2. Le rendement total était en moyenne de 74 294 kg/ha. Quelques sites ont contribué de façon importante aux écarts observés. Par exemple, deux sites ont obtenu des rendements totaux moyens supérieurs à 90 000 kg/ha, alors que 4 sites ont obtenu des rendements inférieurs, en dessous de 60 000 kg/ha, mais qui demeure au-dessus du rendement de référence minimale considéré pour les années d'essai (Figure 2).

Tableau 2. Statistiques descriptives des rendements de l'oignon sec des essais K

Variables	Nobs	Moyenne	Écart-type	Minimum	Maximum
Rendement total (kg/ha)	381	74 294	14 147	44 493	124 408
Rendement vendable (kg/ha)	381	68 079	15 316	21 775	121 785
Pertes (%)	381	9	6	0	51

Les pertes à la récolte, c.-à-d. la différence entre les rendements totaux et les rendements vendables, ont été de 9 % en moyenne pour l'ensemble des essais, mais d'importantes variations ont été observées, avec des valeurs par unités expérimentales allant de zéro à 51 % (Tableau 2). Néanmoins, seuls deux sites ont eu des pertes moyennes supérieures à 20 %. De plus, le déclassé causé par des calibres trop petits, qui est en moyenne de 7 % pour l'ensemble de nos essais, est la seule catégorie de pertes dont la moyenne est supérieure à un %. La deuxième et troisième causes de déclassé en considérant les moyennes pour l'ensemble des essais sont les causes autres (0,6 %) et les insectes (0,6%). Il y a donc globalement eu peu de problématique menant à des pertes importantes au moment de la récolte.

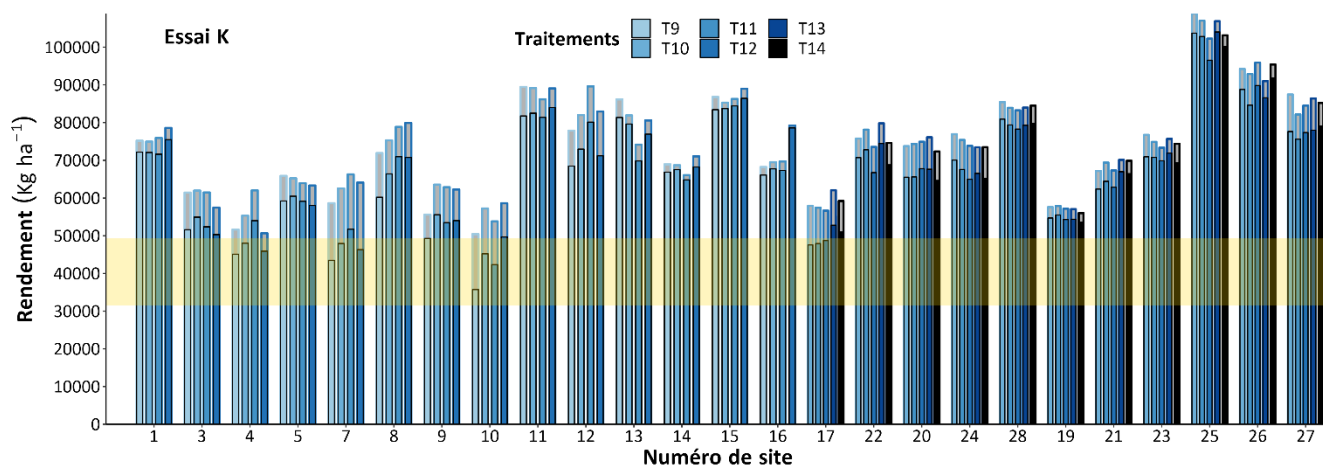


Figure 2. Rendements moyens totaux et vendables par site en fonction des traitements de fertilisation. Les traitements de fertilisation sont les doses croissantes d'engrais de l'élément à l'essai sont détaillés à la section 1.4.2. La superposition des sections grises et colorées des barres représente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

1.6 Aspects additionnels pour l'interprétation des résultats

1.6.1 Variété culturale

Dans le cadre des essais, neuf variétés différentes ont été utilisées et l'information est manquante pour 15 % des observations (Tableau 3). La variété la plus utilisée était la 'Trail blazer' (27 %), suivie de 'Lasalle' (14 %) et de 'Cartier' (13 %). Les autres variétés comptaient pour moins de 10 % du jeu de données chacune.

Tableau 3. Variétés culturales ayant fait l'objet des essais K de l'oignon jaune sec

Variété	Proportion d'essais réalisés avec chacune des variétés (%)	Rendement vendable moyen de chacune des variétés (kg/ha)
Adventure	3	48 249
Cartier	13	78 624
Fortress	9	55 014
Frontier	5	64 665
Hamlet	3	84 499
Lasalle	14	62 702
Oneida	7	64 623
Rubillon	4	70 574
Trail blazer	27	75 540
<i>Manquant</i>	15	60 747
Total : 100 %		Moyenne : 66 524

1.6.2 Précédent cultural

Les essais d'oignon sec suivaient majoritairement une culture de laitue (32 %), de bébé épinard (16 %), d'oignon de type inconnu (huit %) ou de carotte (huit %), et dans une moindre mesure, une culture de céleri, de chou chinois ou un mélange de laitue/sarrasin/trèfle. L'absence de répétitions pour certains précédents culturaux n'a pas permis de tirer des conclusions fiables concernant leurs effets sur la réponse de la culture à la fertilisation.

1.6.3 Irrigation

Plus de la moitié (52%) des sites d'essais étaient irrigués. Autrement, les sites étaient soit non irrigués (12 %) ou l'information est manquante (36 %).

1.7 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 aux autres cultures maraîchères révisées dans le cadre du MIRVRF (Landry et al., 2021-2023). Lorsque des ajustements spécifiques à une culture ont été nécessaires, 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. Dans le cas spécifique de l'oignon sec, ces échanges avec les spécialistes ont permis la validation du mode d'application des engrais, la prise en compte de sensibilités nutritionnelles connues et des caractéristiques édaphiques favorisant spécifiquement le bon établissement de la culture, la considération des méthodes de récolte et des critères liés aux calibres et à la mise en marché.

1.7.1 Détermination des classes de fertilité des sols

La détermination des classes de fertilité des sols est effectuée en se basant sur la partition binaire de Cate-Nelson (Cate et Nelson, 1971; IRDA, 2020a). Ce test de partition consiste à mettre en relation le rendement relatif de la culture (RRel, %) et l'indicateur de prédiction de la fertilité du sol (ex. la teneur en K_{M3}). Le RRel est calculé par bloc, en divisant le rendement vendable du témoin (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.

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

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

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

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

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

Afin de s'assurer de la performance des seuils déterminés avec le test de Cate-Nelson, les valeurs du P de Fisher des partitions ainsi que les mesures de précision, sensibilité et spécificité sont calculées et maximisées (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) : $(VN+VP)/(VN+FN+VP+FP)$.

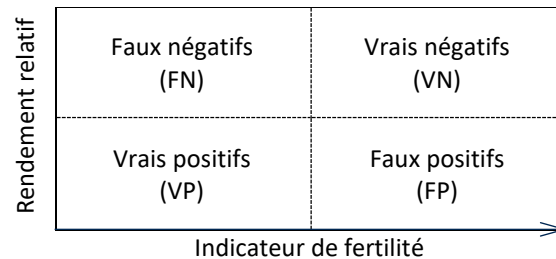


Figure 3. Définitions des quadrants d'un test de partition binaire de Cate-Nelson (1971).

1.7.2 Détermination des doses optimales de fertilisants

Les doses optimales de fertilisants pour chaque classe de fertilité de sol sont calculées par analyses de régressions et de variances (ANOVA). Ces analyses sont réalisées sur le jeu de données sans indicateur, mais également selon différents seuils agronomiques. La méthode des régressions n’ayant pas donné de bénéfices additionnels à celles des ANOVA, la méthode utilisée pour une majorité des cultures précédentes a été retenue. Ainsi, les ANOVA sont effectuées séparément pour les sols se trouvant de part et d’autre des seuils agronomiques de réponse déterminés avec la procédure expliquée précédemment à la section 1.7.1.

L’effet de l’apport des doses croissantes de fertilisants est étudié en tenant compte du rapport de rendements (ROM, Éq. 2). L’utilisation du ROM permet d’éviter les biais causés par les grandes variations qui pourraient être observées entre les rendements produits en grandes surfaces en contexte de production et ceux obtenus en parcelles de recherche. Comme expliqué précédemment pour le rendement relatif, l’utilisation du ROM permet également d’atténuer les effets des sites et des conditions météorologiques annuelles sur la productivité. Le ROM est calculé pour chaque parcelle fertilisée d’un bloc, en utilisant l’équation suivante (Éq. 2) :

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

De plus, les logarithmes naturels des rapports de rendement (\log_ROM) ont été utilisés dans les ANOVA afin de pallier les problèmes d’hétérogénéité de la variance. L’ANOVA est effectuée en utilisant la procédure *mixed* de SAS® (SAS Institute Inc., 2013) et en considérant les blocs et les sites comme des effets aléatoires. Lorsque l’ANOVA indique un effet significatif ($P < 0,05$) ou une tendance ($P < 0,12$) à un effet de la dose sur le ROM, des tests de Student (test *t*) sont réalisés afin de faire les comparaisons multiples des moyennes des traitements permettant de déterminer les doses agronomiques optimales menant aux meilleurs rendements. Il est important de souligner qu’en raison de la considération des rendements sur une base relative (ROM), le test de Student

permet de faire une comparaison multiple des moyennes des traitements entre elles sans tenir compte de l'effet de la fertilisation par rapport au témoin. Ainsi, l'absence de différence significative entre les traitements ne traduit pas nécessairement une absence de différence par rapport au témoin. Le calcul des intervalles de confiance à 90 % permet de déterminer si l'augmentation de rendement obtenue pour un traitement donné est numériquement différente en comparaison au témoin.

Puisque les doses testées dans les divers essais varient (voir section 1.4.1), les doses similaires ont dû être regroupées afin d'équilibrer les jeux de données et d'augmenter la puissance de l'ANOVA. Ainsi, les groupes de doses ont été considérés comme des variables catégoriques plutôt que numériques continues dans le modèle statistique. Les groupes de doses sont exprimés sous cette forme dans le présent document : 1-30-60. Dans ce cas, par exemple, il s'agit du 1^{er} groupe de doses testées (1-30-60) et les doses qui le composent vont de 30 à 60 kg/ha de l'élément testé (1-30-60). La VSRF proposée pour une catégorie de sol donnée est basée sur la répartition des doses testées à l'intérieur du groupe correspondant.

1.7.2.1 Vérification de l'interaction N : K

Tel que discuté précédemment à la section 1.4.3, les parcelles ont reçu un apport de 100 kg N/ha, se voulant non limitantes, afin que les essais ne présentent pas de carence en N qui pourrait causer un biais dans la mesure de la réponse à la fertilisation potassique. Afin de s'assurer que cette prémisse a été respectée (aucune carence en N lors des essais potassiques PSEFCM et MIRVRF), le ROM des rendements vendables a été mis relation avec le ratio N/K contenu dans les bulbes d'oignons. Pour ce faire, une régression linéaire entre le ROM vendable et le ratio N/K contenu dans la biomasse (bulbes seulement) a été réalisée, de même qu'une évaluation visuelle de la dispersion des teneurs en K dans le nuage de points (donnée non présentée). Cette régression linéaire s'est avérée non significative ($P > 0,05$) et aucun patron problématique quant au teneur de K du sol dans le nuage de point n'a été observé, signifiant que les différents niveaux de richesse en K semblaient bien répartis à travers la plage de données des ratios N/K. Conséquemment, basé sur ces analyses, il n'y a pas eu de problématique importante de carence en azote lors des essais, et donc cela ne représente pas un biais pouvant expliquer le peu de réponses observées à la fertilisation potassique.

1.7.3 Diagnostic nutritionnel, quantités d'éléments nutritifs exportés

Le taux d'humidité, la concentration en éléments nutritifs (majeurs et mineurs) dans les tissus et les exportations en N, P₂O₅ et K₂O ont été calculés en considérant exclusivement la biomasse qui quitte le champ à la récolte. Le diagnostic nutritionnel a donc été effectué sur la base de la teneur en éléments nutritifs des bulbes seulement dans le cas de l'oignon sec, sans tenir compte de l'analyse du feuillage. Cette considération tient compte du fait qu'en contexte de production commerciale au Québec, les oignons sont séchés au champ après la récolte. Ainsi, le feuillage et les racines secs et friables restent au champ lors du ramassage mécanique.

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 S^n , 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 (cndMethodRobustIrda ; 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 Debruynne, 2010). L'utilisation des MCD permet, entre autres, l'obtention d'une composition équilibrée par l'exclusion des individus en déséquilibre nutritif.

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

1.7.4 Analyses sur la qualité, les calibres, les pertes à la récolte et les pertes à l'entreposage

Des analyses complémentaires visant tester des différences de fréquence à l'aide de test de Khi-2 ont été effectuées. Ces analyses ont permis d'évaluer l'effet des traitements de fertilisation sur les calibres vendables, les pourcentages de pertes à la récolte, les calibres non vendables, de même que sur la qualité des oignons vendables (évaluée par une évaluation interne et visuelle). Les pourcentages de pertes suivant l'entreposage et la qualité des oignons sains à la suite de celui-ci ont également été analysés par des analyses de fréquence.

À la récolte, les causes de déclassement des oignons lors des essais PSEFCM concernaient le calibre, les maladies et autres causent. Celles-ci sont résumées au Tableau 4. Lors des essais subséquents du MIRVRF, les causes de déclassement à la récolte ont été déclinées en fonction de plus de critères, également énumérés au Tableau 4.

Une évaluation plus précise visant à évaluer la qualité interne des oignons commercialisable a aussi été effectuée. Cette évaluation était réalisée sur un sous échantillon de 10 oignons sains de catégorie moyenne représentatifs de la parcelle. Les critères évalués lors de cette évaluation de la qualité à la récolte sont: la pourriture bactérienne, la pourriture du collet, les cœurs doubles, les tuniques translucides et le fusarium.

Suivant l'entreposage des oignons, d'une durée moyenne de 195 jours (169 à 230 jours), ceux-ci ont été classés selon les catégories suivantes : oignons sains (seule catégorie considérée vendable), cœur double, déchirement du plateau racinaire, éclatement, fusarium, pelure tachée, pourriture bactérienne, pourriture du collet, pourriture racinaire, sclérotinia et autre cause de rejet. Puis une évaluation de leur qualité a été faite. Les paramètres de qualité évalués étaient la proportion d'oignons éclatés, la grosseur du collet, la fermeté, la rétention des pelures et l'occurrence de tuniques translucides (pour le MIRVRF seulement).

Tableau 4. Description des calibres vendables et non vendables de l'oignon sec pour le classement à la récolte dans les essais du PSEFCM et du MIRVRF

Type de rendement	Projet	Calibre	Diamètre	
			Pouces (po)	Centimètres (cm)
Vendable	PSEFCM (2009-2012) MIRVRF (2020-2022)	Petit	> 2 ¼ à ≤ 2 ½	> 5,72 à ≤ 6,35
		Moyen	> 2 ½ à ≤ 2 ¾	> 6,35 à ≤ 7
		Gros	> 2 ¾ à ≤ 3	> 7 à ≤ 7,62
		Jumbo	> 3	> 7,62
Non-vendable	PSEFCM (2009-2012) MIRVRF (2020-2022)	Trop petit	≤ 2 ¼	≤ 5,72
		Maladie		
		Autres		
		Fusarium		
	MIRVRF (2020-2022)	Pourriture du collet		
		Pourriture bactérienne		

2 FERTILISATION POTASSIQUE

2.1 Portrait et représentativité des données

La répartition des blocs des essais selon différentes classes de propriété de sol est présentée au Tableau 5. Les essais ont été réalisés majoritairement sur des sols présentant un pH adéquat pour la culture de l'oignon sec (84 % des blocs ayant un pH entre 5,5 et 6,5) puisque le pH optimal recommandé pour cette culture est de 5,5 (Leblanc, 2015). Bien que 16 % des blocs aient un pH inférieur à 5,5, la valeur minimale étant de 5,25, un biais dans la réponse à la fertilisation dû à un sol trop acide apparaît peu probable, particulièrement en sol riche en matière organiques, puisque celle-ci peut modérer les effets négatifs d'un sol trop acide. (Lierop, 1980; Smr et Nr, 2013).

Dans le cas du potassium, plus de la moitié des blocs des essais (69 %) se trouvaient dans des sols contenant de 240 à 480 ppm de K_{M3} et 23 % à plus de 480 ppm. En rappel, les valeurs de K_{M3} (ppm) présentées utilisent la masse volumique réelle des sols organiques (voir section 1.3.1). Seulement 9 % des blocs se retrouvaient dans un sol avec une teneur en K_{M3} inférieure à 240 ppm (valeur minimale de K_{M3} = 141 ppm). Il aurait été préférable d'avoir une plus grande proportion d'essais sous ce seuil (< 240 ppm) afin de pouvoir étudier la réponse à la fertilisation potassique sur davantage de sols de plus faibles teneurs en K_{M3} . Cela dit, ceci suggère que la prévalence de sites présentant une teneur en K_{M3} < 240 ppm est faible pour les terres noires de Montérégie, ce qui serait conséquent avec l'usage des grilles de référence en fertilisation potassique actuelle des cultures maraîchères (CRAAQ, 2010) qui recommandent toutes des apports élevés de K dans les sols de plus faibles teneurs en potassium (≤ 100 kg/ha de K_{M3} : apports de 140 – 370 kg/ha de K_2O ; $101 \leq 200$ kg/ha de K_{M3} (100 – 340 kg/ha de K_2O), ce qui peut contribuer à long terme à un rehaussement des teneurs dans les sols.

Tableau 5. Répartition des blocs des essais K d'oignons secs selon différentes classes de propriétés de sol après la validation des données.

pH ⁽¹⁾	Blocs (%)	Teneur en K_{M3} ppm ^(2,3)	Blocs (%)	CEC	Blocs %
$\leq 5,5$	16	≤ 120	0	≤ 80	5
5,5 – 6,0	57	> 120 – 240	9	> 80 – 90	22
6,0 – 6,5	26	> 240 – 360	40	> 90 – 100	6
6,5 – 7,0	1	> 360 – 480	28	> 100 – 110	21
> 7,0	0	> 480	23	> 110	8
				ND	38

⁽¹⁾ Le pH optimal (CRAAQ, 2022).

⁽²⁾ K_{M3} : K extrait par la méthode Mehlich-3 (Mehlich, 1984) utilisant la masse de sol d'une cuillère de 3 cc.

⁽³⁾ Une valeur de K_{M3} en kg/ha obtenue sans pesée de cuillère et utilisant un facteur de conversion ppm vers kg/ha de 2,24 peut être convertie en ppm obtenue via une analyse avec pesé de cuillère en utilisant un facteur de conversion de 1,11 (voir section 1.3.1).

2.2 Détermination des doses agronomiques optimales

2.2.1 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 la culture aux apports d'engrais potassique. Cette section présente les indicateurs retenus et leurs paramètres

statistiques suivant les tests de partition (Cate et Nelson, 1971), soit la teneur du sol en K extrait par la méthode Mehlich-3 (K_{M3}) et la CEC calculée à partir des valeurs de pH et des teneurs en K, Ca et Mg (CRAAQ 2010) (Tableau 6).

Tableau 6. Valeurs critiques des indicateurs potentiels de sols significatifs selon les tests de Cate-Nelson pour les essais K d'oignon sec

Indicateur de sol ⁽¹⁾	N _{obs} ⁽²⁾	Valeur critique	RRel ⁽³⁾ (%)	Sensitivité	Spécificité	Précision	Valeur de P
K_{M3} (ppm)	75	236	0,73	0,94	0,50	0,92	0,030
CEC	49	83	0,74	0,95	0,60	0,92	0,005

(1) K_{M3} : teneur en potassium extrait au Mehlich-3 (Mehlich, 1984) utilisant la masse de sol d'une cuillère de 3 cc. CEC : capacité d'échange cationique (CRAAQ 2010).

(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 de potassium sur le rendement

Les ANOVA les plus pertinentes à la discussion (section 2.2.5) sont regroupées à la Figure 4. Sur les graphiques en forêt (Figure 4), la présentation des ROM plutôt que des logarithmes du ROM vise à faciliter l'interprétation des résultats. Tout d'abord, l'ANOVA effectuée sans indicateur de fertilité (modèle A), qui permet de visualiser globalement l'effet de la fertilisation sur le rapport de rendements (ROM) de la culture (Figure 4.A), indique une absence de réponse ($P = 0,319$; N_{obs} = 296) à l'apport des doses croissantes de K_2O . Le deuxième modèle (modèle B), qui considère la réponse à la fertilisation potassique des sols sous et au-dessus du seuil de 236 ppm de K_{M3} identifié par les tests de partition (Tableau 6), ne permet davantage de désigner une dose d'apport spécifique au sol de part et d'autre de celui-ci (≤ 236 ppm : $P = 0,263$ (N_{obs} = 26); > 236 ppm : $P = 0,458$ (N_{obs} = 270)). Toutefois, rappelons que dans le cadre de ces essais, peu de données étaient disponibles sous le seuil de 236 K_{M3} (N_{obs} = 26), avec une valeur minimale de 141 ppm, ce qui limite l'analyse de l'effet de la fertilisation. Cela dit, la réponse est beaucoup plus élevée sous le seuil de 236 ppm qu'au-dessus de celui-ci (ROM moyen de 1,16 (≤ 236 ppm) vs 1,015 (> 236 ppm)). Enfin, l'usage de la procédure de Cope-Rouse (seuil divisé par 2; seuil multiplié par 2) (modèle C), ne permet pas d'étudier davantage les sols sous 236 ppm puisque l'entièreté des données se retrouve entre la valeur de 141 ppm (valeur minimale en K_{M3}) et celui de 236 ppm, soit au-dessus du seuil de 118 qui serait obtenu en divisant par 2. La procédure permet toutefois de valider que l'absence de réponse au-dessus du seuil de 236 ppm (ROM moyen de 1,015) n'est pas due aux sols les plus pourvus en K_{M3} (> 472 ppm), mais prévaut aussi pour les sols entre 236 – 472 ppm (ROM moyen de 1,019).

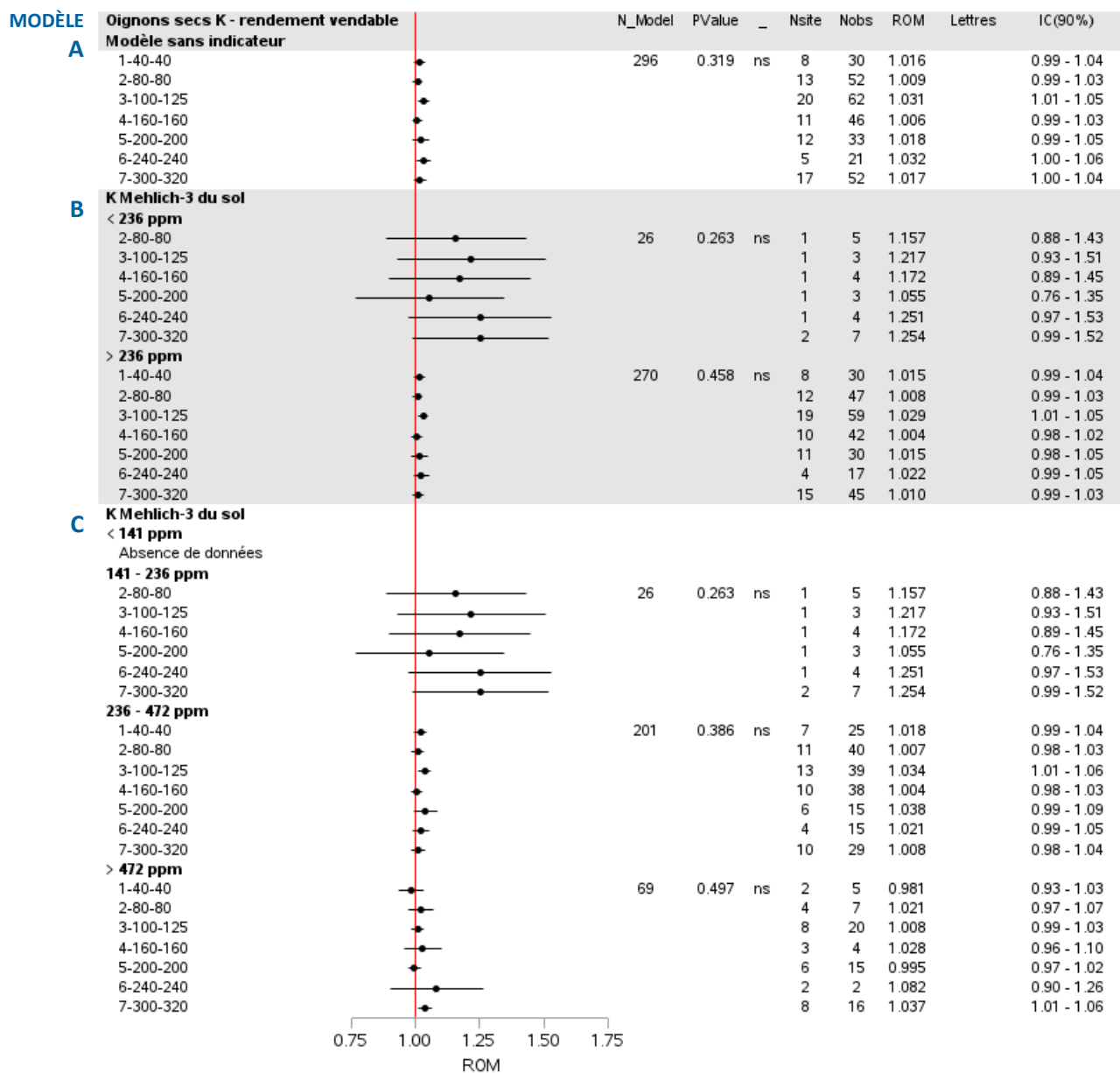


Figure 4. Résultats des analyses de variance sur la réponse de l'oignon sec aux doses croissantes de potassium. N_model : nombre d'observations du modèle ; Nsite : nombre de sites ; Nobs : nombre d'observations ; ROM : rapport de rendements (rendement parcelle fertilisée/rendement parcelle témoin) ;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

2.2.3 Effet de la dose de potassium sur les pertes, le calibre et la qualité à la récolte

Les analyses testant l'impact de la fertilisation sur les calibres vendables (section 2.2.3.1), les pourcentages de pertes à la récolte (section 2.2.3.2), la qualité des oignons vendables, de même que sur les pourcentages de pertes (section 2.2.3.4) et la qualité des oignons sains suite à l'entreposage (sections 2.2.3.3 et 2.2.3.4) ont montré que ces paramètres sont globalement peu affectés par les doses de K_2O apportées. Cependant, il en ressort que les pertes sont plus importantes à la récolte dans les sols moins bien pourvus en K_{M3} (11 % de plus en moyenne) (Figure 6) et que l'occurrence de cœur double à la récolte (Figure 9) ou l'occurrence de problématique

de plateau racinaire à l'entreposage (Figure 10) ne diminue pas en fonction de la dose de K_2O reçue. Plus de précisions sur l'ensemble de ces analyses se retrouvent aux sections qui suivent.

2.2.3.1 Effet de la dose de potassium sur les calibres des oignons à la récolte

Tel que mentionné dans la section 1.7.4, les oignons récoltés et séchés ont été classés selon leur taille afin d'évaluer l'effet de la fertilisation potassique sur les calibres vendables obtenus. Les détails concernant les calibres sont présentés au Tableau 4. Les analyses ont été effectuées sur les proportions de rendements obtenus des différents calibres, selon la dose de K_2O apportée. Dans un premier temps, des analyses ont été effectuées pour les différentes classes de teneur en K_{M3} du sol déterminé à la section 2.2 (données non présentées). Étant donné l'absence de réponse, une analyse supplémentaire a été effectuée en considérant l'ensemble des données (Figure 5). Peu importe les regroupements considérés, la dose de K_2O n'a pas influencé le calibre des oignons de manière significative. Cela appuie les conclusions du modèle initial (aucun effet significatif), indiquant qu'il ne semble pas y avoir d'effet bénéfique important de la fertilisation potassique sur les calibres vendables de l'oignon sec. Boyhan et al. (2007) avait également observé que la dose de fertilisant potassique n'influçait pas les rendements par calibre, au vu d'une faible association entre les rendements et les doses de K_2O . Les proportions moyennes des différents calibres vendables pour l'ensemble des observations (sans égard à la dose reçue) sont de 20 % de Petit, 28 % de Moyen, 26 % de Gros et 18 % de Jumbo.

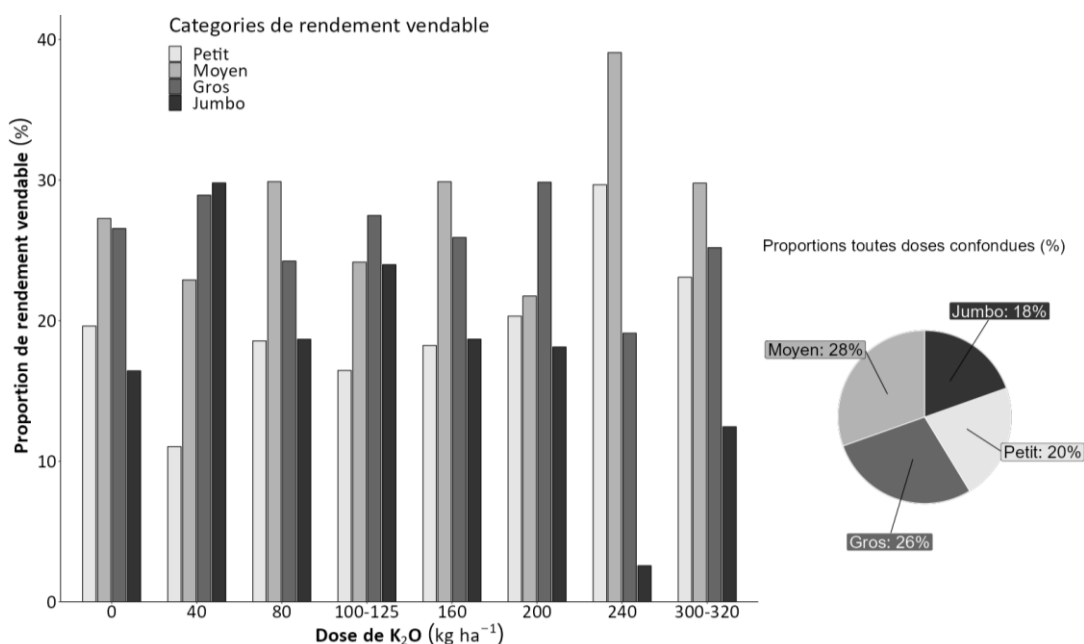


Figure 5. Effet non significatif de la dose de K_2O sur les calibres de l'oignon sec à la récolte et proportions des calibres vendables toutes doses confondues.

2.2.3.2 Effet de la dose de potassium sur les pertes à la récolte

Les analyses de pertes à la récolte ont d'abord été effectuées pour les différentes classes de teneur en K_{M3} du sol déterminées à l'aide de la méthode de Cate-Nelson (Cate et Nelson, 1971). Peu importe la catégorie de sol considérée, la dose de K_2O n'a pas influencé les pourcentages de pertes à la récolte de manière significative (Figure 6A). Avec seulement 34 observations sous le seuil de 236 ppm de K_{M3} , une grande variabilité dans la proportion des pertes a été observée dans cette classe de richesse du sol en K_{M3} . Étant donné l'absence de réponse, une analyse supplémentaire a été effectuée sur l'ensemble des données, toutes teneurs de K_{M3} confondues (Figure 6B). Cette dernière révèle que le pourcentage de pertes est significativement supérieur en absence de fertilisation K (dose de 0 kg/ha), en comparaison des groupes de dose 100-125, 160 et 300-320 kg/ha ($P = 0,041$). Cet effet indique qu'une absence de fertilisation en potassium, ou de trop faible dose pourrait mener à des pertes à la récolte plus importantes. Il faut toutefois nuancer cet effet, puisque la différence significative la plus élevée est de moins de 2%. Cependant, les pertes moyennes en sols plus pauvres (18 % pour 118-236 ppm K_{M3}) sont beaucoup plus élevées que pour les sols à teneur plus élevée de K_{M3} (9 % pour 236-472 ppm K_{M3} et 7 % pour > 472 ppm K_{M3}).

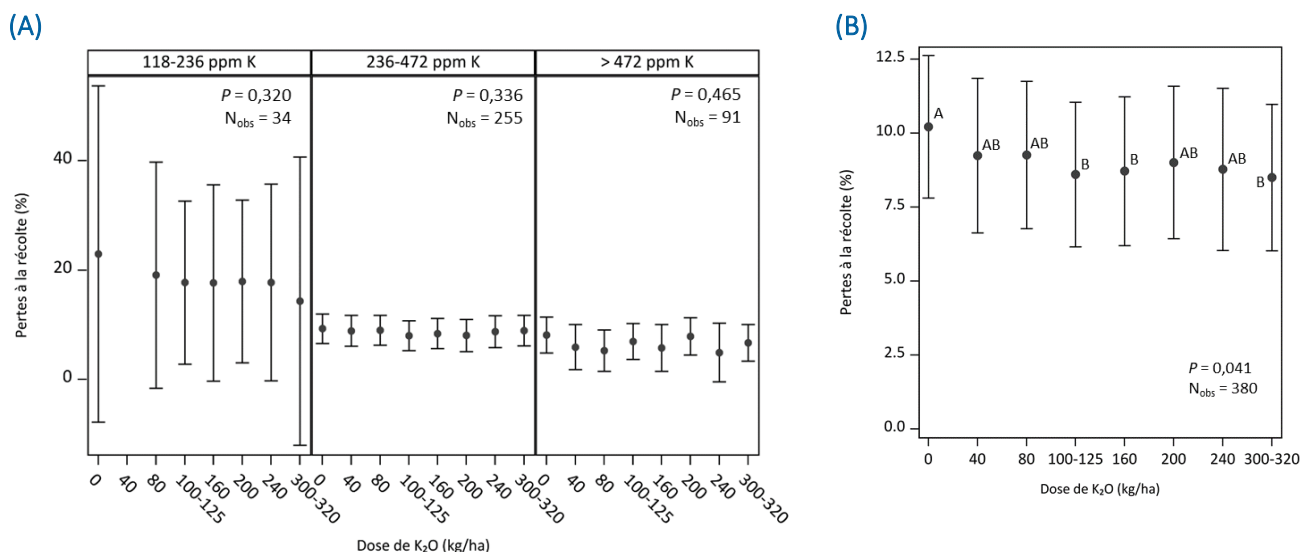


Figure 6. Effet de la dose de K_2O sur les pertes d'oignons secs à la récolte (A) selon la teneur en K_{M3} du sol et (B) toutes teneurs en K_{M3} du sol confondues. N_{obs} = Nombre d'observations. Les moyennes présentées sont les valeurs estimées du modèle statistique. Les barres représentent les erreurs types.

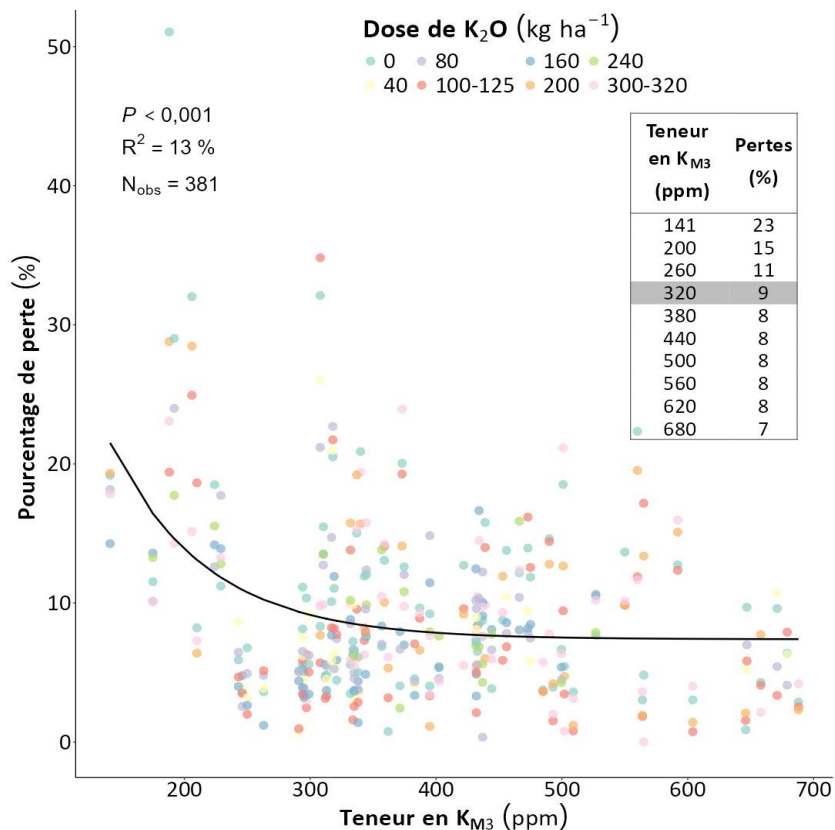


Figure 7. Pourcentage de pertes selon la teneur en K_{M3} du sol (courbe) et table des pourcentages prédits de pertes par le modèle pour différentes valeurs de K_{M3}. $N_{obs} = 381$ observations, Modèle prédictif : $per\text{tes} = -((104,36 - 7,48) * (\exp(-\exp(-4,33) * \text{teneur en } K_{M3}) * \exp(-4,33)))$.

Aucun effet significatif de la fertilisation potassique sur les causes de rejet n'a été trouvé. Les principales causes de pertes à la récolte ont été les calibres trop petits (6-9 %) suivis des dommages d'insectes (0-2 %). Toutes les autres causes de déclassement n'atteignant que très rarement 1 % (Figure 8). Le peu de variabilité des différentes catégories de pertes en fonction de la dose de potassium reçu indique tout de même que de faible dose de K ne risque pas d'entraîner de problématique majeure de déclassement, ni une occurrence de maladie ou de pourriture plus élevée.

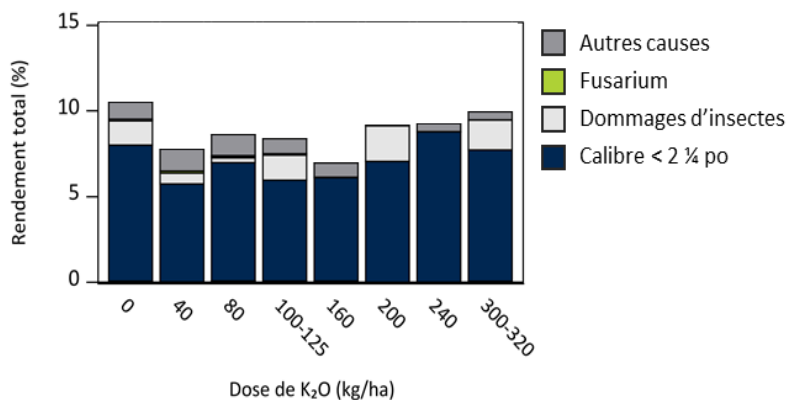


Figure 8. Cause de rejet des oignons secs à la récolte en fonction des traitements de fertilisation.

2.2.3.3 Effet de la dose de potassium sur la qualité à la récolte

Mis à part la présence de cœur double, l'occurrence des symptômes évalués a été extrêmement faible. Moins de 1 % des oignons évalués ont présenté l'une ou l'autre des problématiques suivantes: fusarium, pourriture bactérienne, pourriture du collet et tuniques translucides. Le seul paramètre analysé relatif à la qualité des oignons vendables à la récolte est donc l'occurrence de cœur double. Un effet significatif de la dose de K ($P = 0,027$) sur la fréquence d'occurrence de cœur double a été trouvé. Globalement, la fréquence est plus élevée en absence de fertilisation K ou pour les doses les plus élevées de K. La dose maximale est la plus atteinte avec 50 % de cas où au moins un des oignons évalués par parcelle présentait un cœur double. De plus, dans 25 % des cas, au moins 3 cœurs doubles étaient observés parmi les oignons évalués. Il semble donc qu'un apport trop élevé de potassium puisse mener à une occurrence plus élevée de cœurs doubles. Il faut toutefois nuancer les différences trouvées, puisque certaines doses sont sous représentées et comportent donc un biais dose x années. Par exemple, les doses de 40 et 100-125 proviennent de deux essais de 2022, année pour laquelle les rendements ont été particulièrement élevés avec très peu d'occurrences de problématiques de qualité. Ce n'est cependant pas le cas de la dose de 300-320, qui a été testée sur un nombre important d'essais. Selon une revue de littérature effectuée par Amare (2020), l'engrais potassique est reconnu pour son effet sur la qualité des oignons à la récolte, mais cet effet toucherait davantage les aspects physiologiques et développementaux, comme la hauteur des plants, le nombre de feuilles par plants, la photosynthèse ou le transport des sucres et de l'eau. Des effets sur la sensibilité aux maladies ont toutefois été relevés dans d'autres types de climats que celui du Québec (Bekele, 2018). Dans tous les cas, les VSRF n'atteignent pas la dose de 200, et donc les doses suggérées ne risquent pas d'augmenter l'occurrence de problématique liée au cœur double. Pour ces raisons, les doses suggérées ne seront pas ajustées en fonction de ce critère.

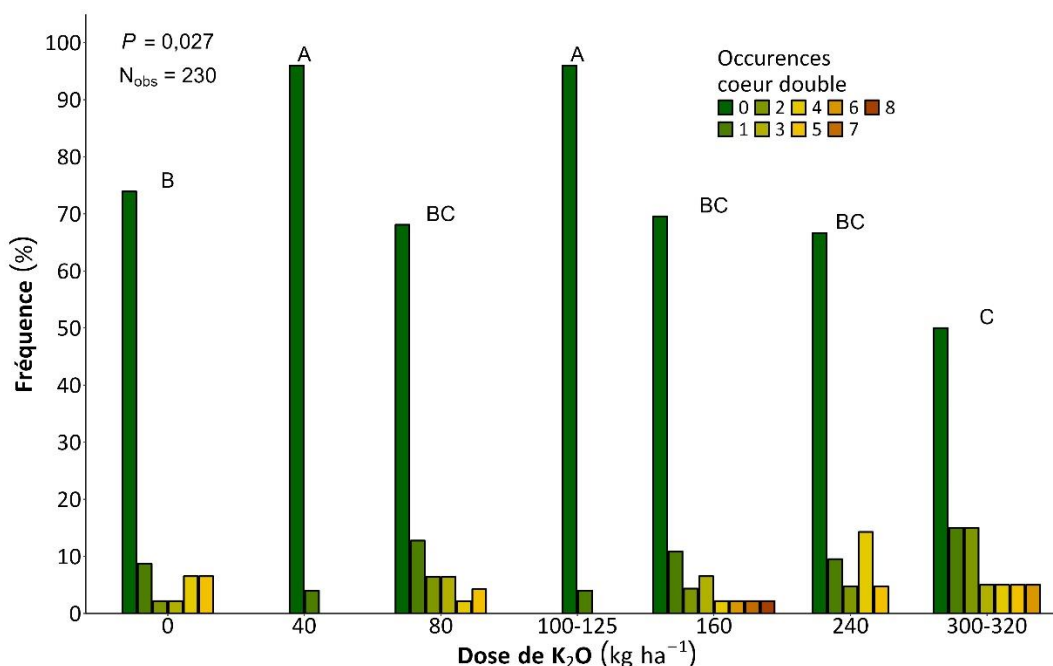


Figure 9. Effet de la dose de K₂O sur la fréquence d'occurrence de cœur double à la récolte. N_{obs} = nombre d'observations. Les occurrences de 0 à 8 correspondent au nombre d'oignons atteint de cœur double parmi ceux évalués par parcelle. Par exemple, une fréquence de 70 % d'occurrence de 1 indique que pour 70 % des parcelles évaluées, un seul oignon atteint de cœur double a été identifié parmi ceux évalués.

2.2.3.4 Effet de la dose de potassium sur les pertes suivant l'entreposage

Une analyse de la variance a été effectuée afin d'observer l'effet de la dose appliquée sur les calibres jugés non vendables après entreposage, soit les pertes causées par : pourriture bactérienne, pourriture du collet, oignon double, pelure tachée, bulbe éclaté ou déchirement des tuniques autour du disque racinaire (Figure 10). Aucun effet n'a été observé ($P = 0,973$). Ainsi, la fertilisation ne semble pas expliquer les pertes en entrepôt. Les conditions d'entreposage, telle la salubrité, la température et l'humidité sont probablement plus importantes.

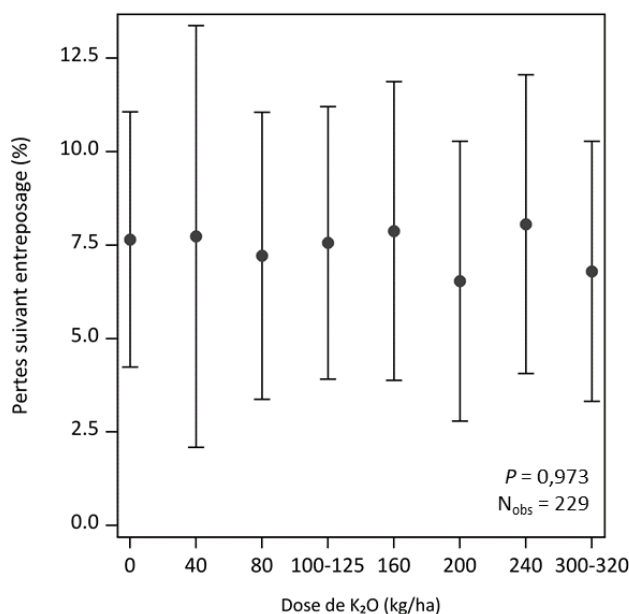


Figure 10. Effet de la dose de K₂O sur les pertes d'oignons secs suivant une période d'entreposage. N_{obs} = nombre d'observations. Les moyennes présentées sont les valeurs estimées du modèle statistique. Les moyennes suivies d'une même lettre ne diffèrent pas statistiquement (LSD, $P < 0,1$). Les barres représentent les erreurs types.

2.2.3.5 Effet de la dose de potassium sur la qualité suivant l'entreposage

La fertilisation potassique n'a pas affecté la qualité post-entreposage des oignons, tels que l'éclatement, la rétention des pelures ou la fermeté ($P = 0,83$; $0,31$ et $0,91$, respectivement). Toutefois, le déséquilibre du jeu de données ne permet pas de conclure hors de tout doute sur l'effet ou sur l'absence d'effet de la fertilisation potassique sur ces critères de qualités à l'entreposage. Un effet significatif de la dose de K ($P < 0,001$) sur la fréquence d'occurrence de problèmes liée aux plateaux racinaires a été trouvé (Figure 11). Le lien entre la dose reçue et l'occurrence de problématique de plateau racinaire n'est cependant pas clair. Globalement, l'occurrence des cotes plus élevées (correspondant à des problématiques importantes de plateau racinaire) semble augmenter avec la dose de K, tandis que l'occurrence de la cote 1 (correspondant à une absence de problématique de plateau racinaire) diminue graduellement, exception faite de la dose de 100-125. Il existe cependant un biais dose x années qui pourrait expliquer ce résultat. Par exemple, la dose de 100-125 est représentée par des essais de 2009 et 2010 seulement, années où les rendements sont généralement plus bas et l'occurrence de problématique liée à la qualité des oignons post entreposages plus élevés. Également, la dose de 40 n'est pas présentée puisqu'un seul essai a reçu cette dose. Dans tous les cas, les VSRF n'atteignent pas la

dose de 200, et donc les doses suggérées ne risquent pas d’augmenter l’occurrence de problématique liée au plateau racinaire. Pour ces raisons, les doses suggérées ne seront pas ajustées en fonction de ce critère.

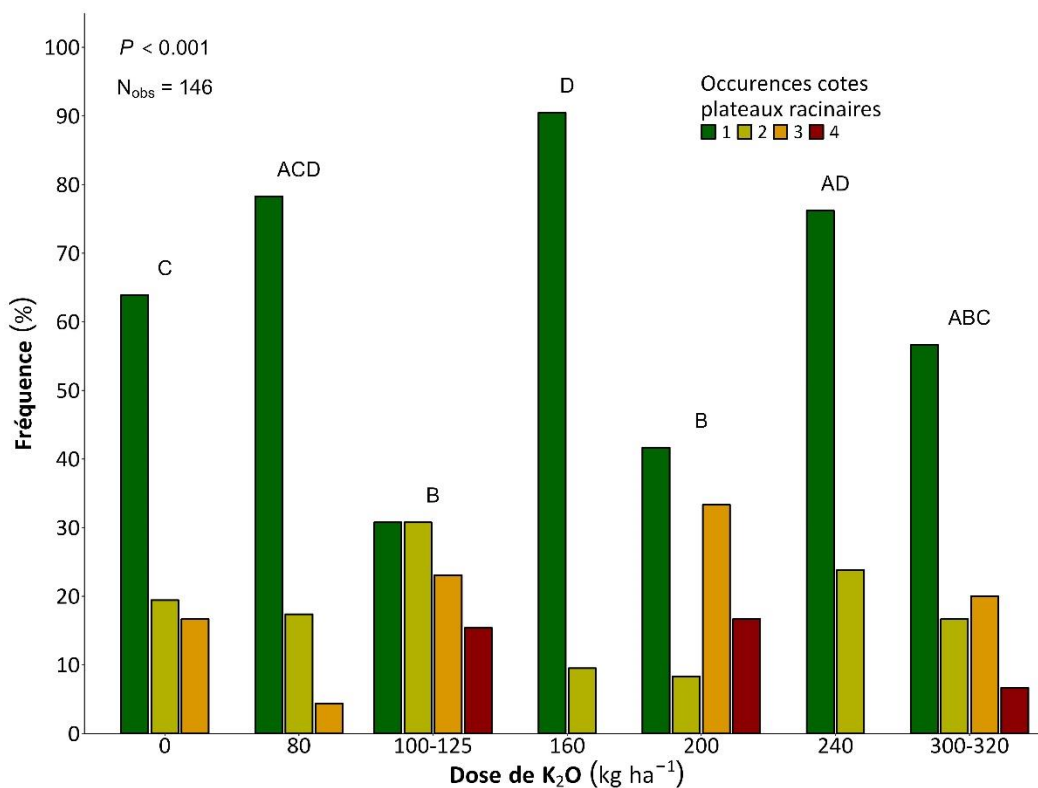


Figure 11. Effet de la dose de K₂O sur la fréquence d’occurrence de différents niveaux de problématique de plateau racinaire suivant une période d’entreposage. N_{obs} = nombre d’observation. Les cotes de plateau racinaire représentent différents niveaux de problématique : 1 = plateau pas ressortit du tout, 2 = plateaux un peu ressortis sans faire craquer la pelure, 3 = plateaux peu ressortie et pelure légèrement craquée autour, 4 = plateaux moyennement ressortis et pelure craquée autour laissant voir le blanc des tuniques internes sur quelques mm. En exemple, une fréquence d’occurrence de 10 % pour la cote de 4 signifie que 10 % des parcelles évaluées se sont vu attribué une cote de 4.

2.2.4 Diagnostic nutritionnel et exportations

Les concentrations de K₂O dans les bulbes d’oignon sec ont varié de 1,79 à 2,76 kg K₂O/tonne humides. La plus forte concentration a été analysée pour la variété ‘Hamlet’, tandis que la variété ‘Cartier’ montre la plus faible valeur (données non présentées). De manière générale, la concentration en K₂O retrouvée dans la présente étude est plus faible celle de 2,41 kg K₂O/tonne rapportée dans l’actuel guide de référence en fertilisation (GREF) du CRAAQ (2010). Toutefois, en Nouvelle-Zélande, Reid et Morton (2019) rapportent une concentration de 1,40 kg K/tonne de matière sèche, correspondant à 1,68 kg K₂O/tonne humide si rapportée à 90 % d’humidité. De plus, il faut mentionner que d’une part, les données du GREF ne distinguent pas le type d’oignon à l’étude et

d'autre part, ces données ne sont pas récentes et proviennent d'essais réalisés en Allemagne (Fink, 1999). Les nouvelles valeurs d'exportation calculées pourront constituer une mise à jour intéressante, en plus de fournir de nouvelles valeurs spécifiques aux oignons secs en sol organique.

Les exportations ont été calculées à partir de la population de tête sélectionnée selon la méthode explicitée à la section 1.7.3. Les valeurs sont présentées au Tableau 7. Celles-ci atteignent en moyenne 180 kg K₂O/ha et varient de 145 à 253 kg K₂O/ha, pour une valeur médiane de 170 kg K₂O/ha. Les quantités de potassium qui quittent le site de production sont donc élevées. La valeur moyenne de 180 kg K₂O/ha est tout de même très près de celle de 179 kg/ha (160 lb/ac) rapportée dans l'est de l'Oregon, mais est supérieure à celle trouvée par Pire et al. (2001) qui rapporte une exportation de 120 ± 19 kg K₂O/ha par les bulbes d'oignons. Plusieurs facteurs pourraient expliquer ces différences. En plus du climat, le type de sol est probablement important, surtout considérant que les nouvelles VSRF de l'oignon sec sont spécifiques au sol organique, beaucoup moins commun et étudié que les sols minéraux.

Les exportations de l'oignon sec varient de manière considérable avec le rendement et les variétés (Figure 12). Il existe également une grande variation de rendement entre certains cultivars, notamment *Adventure* et *Hamlet* pour lesquelles les rendements totaux ont varié entre ≈ 50 000 kg/ha à ≈ 90 000 kg/ha (Figure 12 B). Le patron de distribution des points permet de conclure que les différences au niveau de l'exportation en K₂O entre les cultivars seraient principalement attribuables à de plus grandes productivités plutôt qu'à la variation de la concentration en potassium dans les bulbes. Cependant, les VSRF ne peuvent être modulées selon les cultivars, puisque le nombre de données spécifique à chacun ne permet pas un calcul robuste. De plus, il est fort probable que les cultivars utilisés varient d'une saison à l'autre, de même leur emplacement dans les champs. Les exportations moyennes tous cultivars confondus seront donc utilisés.

Tableau 7. Concentrations et exportations en K₂O des oignons secs 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 »)	89	2,15	0,39	180	170	145	253
Faible rendement et équilibre nutritionnel	89	2,07	0,21	143	144	131	152
Faible rendement et déséquilibre nutritionnel	89	2,12	0,38	138	136	91	255
Haut rendement et déséquilibre nutritionnel	91	2,20	0,36	194	191	168	224

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

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

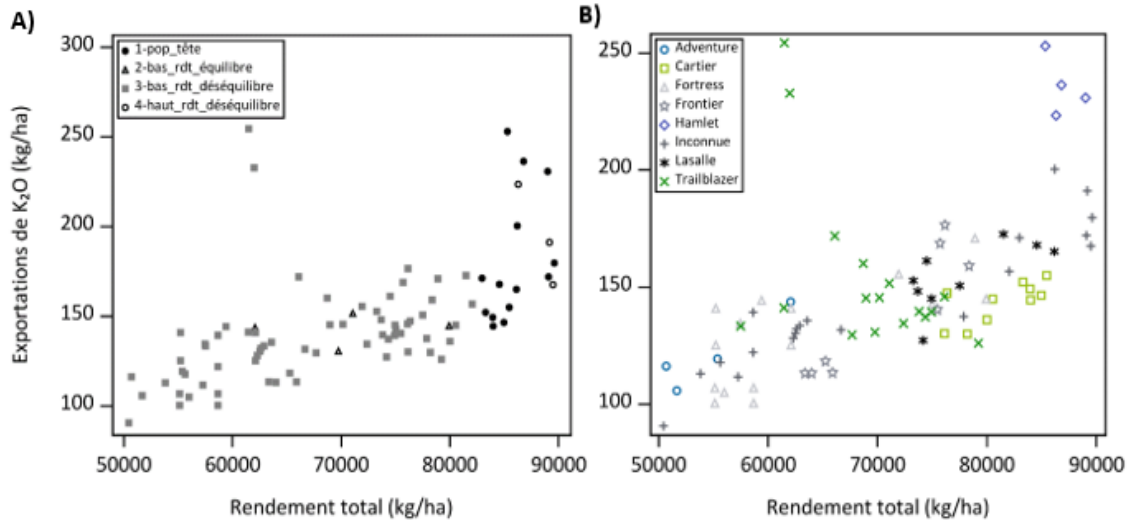


Figure 12 Exportations de K_2O de l'oignon sec selon (A) le diagnostic nutritionnel et (B) le cultivar.

2.2.5 Fertilisation potassique proposée

Au regard de l'ensemble des résultats, quatre classes de sol de fertilité potassique ont été créées. Pour simplifier l'utilisation des seuils, ceux-ci ont été arrondis, passant de < 141 ppm à < 140 ppm, de $141 - 236$ ppm à $140 - 240$ ppm, de $236 - 472$ ppm à $240 - 470$ ppm et finalement de > 472 ppm à > 470 ppm. Sous le seuil de 140 ppm K_{M3} , vu 1) la largeur de l'intervalle de teneur ($0-140$ ppm), 2) l'absence de donnée, 3) le ROM moyen très élevé de $1,16$ de la catégorie de richesse de sol suivante, présentant un gain minimal de 15% et jusqu'à 23% et 4) la valeur élevée des exportations qui atteignent en moyenne 180 kg K_2O/ha et varient de 145 à 253 kg K_2O/ha , une dose de 180 kg K_2O/ha sera proposée. Une telle dose permettra d'éviter un appauvrissement du sol, de même qu'éviter des pertes, qui sont plus élevées et variables en sol moins bien pourvu en K, telles que présentées à la Figure 5 (B) et à la Figure 8. Nous recommandons d'emmener cet apport en deux fractionnements égaux de 90 kg/ha, par souci de simplicité logistique pour les producteurs et également afin d'éviter les risques de lessivage. Pour les sols de teneurs en K_{M3} entre 140 et 240 ppm, l'apport de K_2O , toutes doses confondues, permet des gains moyens de 19% . En absence d'effet de dose, la dose minimale testée de 80 kg K_2O/ha , emmenée en un fractionnement de 50 kg/ha au semis et d'un deuxième de 30 kg/ha au stade 15 cm est donc retenu. À cette dose, la borne inférieure de l'intervalle de confiance à 90% est inférieure à 1 , signifiant que de faibles pertes sont possibles. Néanmoins, ceci est le cas pour la majorité des groupes de doses testées, excepté les deux groupes de doses les plus élevés, pour lesquelles l'analyse des ROM indique qu'il n'y a pas d'avantage à apporter celles-ci. Pour la catégorie de sol suivante (240 à 470 ppm K_{M3}), vu la quasi-absence de gain, la dose minimale testée est également retenue, soit de 40 kg/ha. Cette dose étant assez faible et afin d'éviter aux producteurs un deuxième fractionnement de seulement 15 kg/ha au stade 15 cm (tel que testé lors des essais), la totalité des 40 kg/ha peut être appliquée au semis. Enfin, pour les sols ayant une teneur en K_{M3} supérieure à 470 ppm, une dose de 0 est retenue. Ce choix apparaît sécuritaire puisque les sols de la catégorie inférieure ne présentent déjà plus de gain ni de perte.

Le peu d'effet trouvé de la dose de potassium sur (1) les calibres vendables (2) la qualité des oignons vendables à la récolte (3) les pertes suivant l'entreposage et (4) la qualité des oignons sains après l'entreposage supporte que les VSRF proposées sont sécuritaires et ne risquent pas d'entraîner de problématique importante. De plus,

les seuls effets trouvés sur la qualité des oignons à la récolte et à la suite de l'entreposage montraient que des doses plus élevées de potassium peuvent mener à une augmentation de l'occurrence de cœur double à la récolte et une augmentation des problématiques de plateau racinaire lors de l'entreposage.

Tableau 8. Fertilisation potassique de l'oignon sec – Valeurs scientifiques de référence en fertilisation

Classe de fertilité K_{M3} (ppm) ^{1, 2, 3}	Période d'application	Fractionnement	VSRF ⁴ (kg K_2O /ha)
≤ 140	Au semis	90	180 ⁵
	Stade 15 cm (30-40 jours après semis)	90	
140 - 240	Au semis	50	80 ⁶
	Stade 15 cm (30-40 jours après semis)	30	
240 - 470	Au semis	40	40 ^{6,7}
> 470	-	-	0 ^{6,8}

¹ K_{M3} : K extrait par la méthode Mehlich-3 (Mehlich, 1984) utilisant la masse de sol d'une cuillère de 3 cc.

² Une valeur de K_{M3} en kg/ha obtenue sans pesée de cuillère et utilisant un facteur de conversion ppm vers kg/ha de 2,24 peut être considéré comme des ppm obtenue via une analyse avec pesé de cuillère, sans transformation nécessaire (voir section 1.3.1 au besoin).

³ Classes de fertilité arrondies, valeurs de seuils initiaux: < 141, de 141- 236 ppm, de 236- 472 ppm et > 472 ppm.

⁴ VSRF : Valeur scientifique de référence en fertilisation. ⁵ Aucune observation sous le seuil de 141 ppm de K_{M3} , la dose suggérée correspond aux exportations.

⁶ Les valeurs recommandées de 80, 40 et 0 kg K_2O /ha correspondent aux plus petites doses testées étant donné l'absence de réponse.

⁷ La valeur recommandée de 40 kg K_2O /ha a été testée en deux fractionnements lors des essais, mais est ici suggéré en un seul apport au semis.

⁸ Dose nulle proposée considérant l'absence de réponse et la richesse du sol en K_{M3} .

Les doses agronomiques sélectionnées dans le cadre du calcul des VSRF issues des essais PSEFCM (2009-2012) et MIRVRF (2020-2022) présentent certaines similitudes avec celles proposées actuellement au Québec et en Ontario, pour les teneurs en K_{M3} correspondantes (Tableau 9). Par exemple, les doses suggérées en Ontario (basées sur des essais en terre noire), pour des teneurs en K inférieures à 136,8 ppm varient de 120 à 230 (valeur moyenne de 175 kg/ha), alors que les doses suggérées ultérieurement au Québec pour des teneurs en K inférieures à 134 ppm sont de 280 à 165 kg/ha (valeur moyenne ~ 220 kg/ha). Sous un seuil de 140 ppm (valeur minimale observée lors de nos essais), nous suggérons une dose de 180 kg/ha (équivalente aux exportations). Cependant, les doses suggérées en Ontario varient en fonction de très petits intervalles de teneur en K. Il n'a pas été possible lors de nos analyses de définir de seuil de K_{M3} aussi précis et statistiquement significatifs. Les doses suggérées en Ontario diminuent donc rapidement en fonction de très petits changements de teneur en K dans le sol : 80 kg/ha (137,94 - 171 ppm de K), 40 kg/ha (172,14 - 205,2 ppm de K) et finalement une dose nulle lorsqu'un seuil en K de 206,34 ppm est atteint. Nous suggérons plutôt une dose de 80 kg/ha (140-240 ppm de K), 40 kg/ha (240-470 ppm de K) et une dose nulle à un seuil de K beaucoup plus élevé de 470 ppm. Les doses ultérieurement suggérées au Québec sont légèrement plus élevées que celle proposée à la suite de la mise à jour des VSRF. L'une des différences marquées est que nous avons identifié un seuil à partir duquel aucun apport fertilisant n'est suggéré, ce qui n'était pas le cas auparavant (dose minimale suggérée de 40 kg/ha).

De manière générale, les doses suggérées sont similaires ou inférieures aux recommandations faites ailleurs au Canada et dans le nord-est des États-Unis, où les plus fortes doses recommandées atteignent 196 à

230 kg K₂O/ha (Tableau 9). Toutes les institutions recensées utilisent la teneur en K du sol (bien que dosée par différentes méthodes) comme indicateur de fertilité potassique. Dans le cadre des présents essais de fertilisation, les engrais potassiques ont été appliqués majoritairement en bande, des apports complémentaires ayant pu être faits à la volée. Ce mode d'application des engrais a pu favoriser une efficacité plus grande des engrais et ainsi être à l'origine des diminutions de doses optimales obtenues suivant l'analyse des résultats.

Tableau 9. Comparaison des recommandations en K₂O pour la production des d'oignons secs au Canada et aux États-Unis

Endroits	Éléments	Dose K ₂ O (kg/ha)	
Ontario (CAN) ⁽¹⁾	0- 17,1 K mg/L	230	
	18,24- 34,2 K mg/L	220	
	35,34- 51,3 K mg/L	210	
	52,44- 68,4 K mg/L	200	
	69,54-91.2 K mg/L	170	
	92,34- 114 K mg/L	150	
	115,14- 136,8 K mg/L	120	
	137,94- 171 K mg/L	80	
	172,14- 205,2 K mg/L	40	
	206,34- 239,54 K mg/L	0	
	240,54- 285 K mg/L	0	
	285 + K mg/L	0	
Michigan (US) ⁽²⁾	114 ppm	335	
	171 ppm	335	
	228 ppm	275 à 330	
	285 ppm	190 à 245	
	Dose de maintenance	342- 410,4 ppm	110 à 160
	433,2 ppm	55 à 80	
	456 ppm	0	
Québec (CAN) ⁽³⁾	K _{M3} : 0-100 kg/ha	280	
	K _{M3} : 101-200 kg/ha	220	
	K _{M3} : 201-300 kg/ha	165	
	K _{M3} : 301-400 kg/ha	115	
	K _{M3} : 401-500 kg/ha	95	
	K _{M3} : 501-600 kg/ha	80	
	K _{M3} : 600+ kg/ha	40	

(1) MAAARO (2011) Basé sur des essais en terre noire et des valeurs de K extrait à l'acétate, reconverti en utilisant un facteur de 1,14.

(2) Warncke et al. (2004) Recommandation pour une récolte d'oignon de 20 à 30 T/acres. Basé sur des essais en sol organique et des valeurs de K extrait à l'acétate, reconverti en utilisant un facteur de 1,14.

(3) CRAAQ (2010)



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.

3 CONCLUSION

Suivant la colligation, la validation et l'analyse statistique des données obtenues dans le cadre du PSEFCM (2009-2012) et du MIRVRF (2020-2022), ce document regroupe toutes les étapes de calculs ayant mené aux nouvelles valeurs de référence en fertilisation (VSRF) potassique de l'oignon sec en sol organique produite par l'IRDA dans le cadre du *Plan de révision des grilles de référence en fertilisation*. La création des VSRF de l'oignon sec finalise le travail entrepris en 2008 dans le cadre des essais du programme PSEFCM réalisés en sol organique et permettra de compléter les grilles N et P tirées des mêmes essais et publiées en 2010 dans le Guide de référence en fertilisation du Québec.

En comparaison des recommandations actuelles (CRAAQ, 2010) du Québec, les VSRF proposées contribuent à diminuer la plage des doses recommandées, principalement en réduisant les apports en sol de moins de 240 ppm et en créant un seuil de 470 ppm, au-delà duquel aucun apport n'est requis. Ces valeurs sont aussi globalement inférieures à celles de régions pédoclimatiques comparables (Ontario et États-Unis). Ceci sans compromis sur les rendements ou la qualité, ni les pertes à la récolte ou à l'entreposage. Enfin, un biais important a été corrigé par la considération de la masse volumique propre aux sols organiques et l'expression des teneurs en ppm.

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

4 OIGNON SEC EN SOL ORGANIQUE – VALEURS SCIENTIFIQUES DE RÉFÉRENCE EN FERTILISATION

POTASSIUM			
Classe de fertilité K Mehlich-3 (ppm) (1,2,3)	Période d'application	Fractionnement (kg K ₂ O/ha)	VSRF ⁽⁴⁾ (kg K ₂ O/ha)
≤ 140	Au semis	90	180 ⁽⁵⁾
	Stade 15 cm (30-40 jours après semis)	90	
140 - 240	Au semis	50	80 ⁽⁶⁾
	Stade 15 cm (30-40 jours après semis)	30	
240 - 470	Au semis	40	40 ^(6,7)
> 470	-	-	0 ^(6,8)

¹ K_{M3} : K extrait par la méthode Mehlich-3 (Mehlich, 1984) utilisant la masse de sol d'une cuillère de 3 cc.

² Une valeur de K_{M3} en kg/ha obtenue sans pesée de cuillère et utilisant un facteur de conversion ppm vers kg/ha de 2,24 peut être convertie en ppm obtenue via une analyse avec pesé de cuillère en utilisant un facteur de conversion de 1,11 (voir section 1.3.1 au besoin).

³ Classes de fertilité arrondies, valeurs de seuils initiaux: < 141, de 141- 236 ppm, de 236- 472 ppm et > 472 ppm.

⁴ VSRF : Valeur scientifique de référence en fertilisation.

⁵ Aucune observation sous le seuil de 141 ppm de K_{M3}, la dose suggérée correspond aux exportations.

⁶ Les valeurs recommandées de 80, 40 et 0 kg K₂O/ha correspondent aux plus petites doses testées étant donné l'absence de réponse.

⁷ La valeur recommandée de 40 kg K₂O/ha a été testée en deux fractionnements lors des essais, mais est ici suggérée en un seul apport au semis.

⁸ Dose nulle proposée considérant l'absence de réponse et la richesse du sol en K_{M3}.



Ce tableau présente 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.

5 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.

6 REFERENCES

- Amare, G. (2020). Review on Mineral Nutrition of Onion. *The Open Biotechnology Journal*, 14(1).
- Asselin, M. (1992). Diagnostic nutritif de l'oignon cultivé en sol organique. *Mémoire de maîtrise, Université Laval*.
- Bekele, M. (2018). Effects of different levels of potassium fertilization on yield, quality and storage life of onion (*Allium cepa* L.) at Jimma, Southwestern Ethiopia. *J Food Sci Nutr*, 1(2), 32-9.
- Black, C. A. (1993). *Soil Fertility Control and Evaluation*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.
- Boyhan, G. E., Torrance, R. L. et Hill, C. R. (2007). Effects of nitrogen, phosphorus, and potassium rates and fertilizer sources on yield and leaf nutrient status of short-day onions. *HortScience*, 42(3), 653-660.
- 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.
- Fink, M. F. (1999). Nitrogen, phosphorus, potassium and magnesium contents of field vegetables—Recent data for fertiliser recommendations and nutrient balances. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 71-73.
- Hubert, M. et Debuyne, 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>
- 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., 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
- Leblanc, M. (2015). *La prévention des carences en éléments mineurs et secondaires en sol organiques*. MAPAQ.
- Lierop, W. V. (1980). Optimal soil pH and sufficiency concentrations of N, P and K for maximum alfalfa and onion yields on acid organic soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 107-117.
- 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.
- Marchand, S. P. (2013). Nutrient signature of Quebec (Canada) cranberry (*Vaccinium macrocarpon* Ait.). *Revista Brasileira de Fruticultura* (292-304).
- Mehlich, A. (1984). Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. *Communications in soil science and plant analysis*, 15(12), 1409-1416.
- Metz, F. et Nass, D., (2015). Fertilisation des grandes cultures, Guide technique. Chambre d'agriculture région Alsace. [en ligne] https://grandest.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/Grand-Est/Alsace_fertilisation_grandes_cultures_guide_Alsace.pdf
- Munroe, J., Brown, C., Kessel, C., Verhallen, A., Lauzon, J., O'Halloran, I., Bruulsema, T. et Cowan, D. (2017). Manuel sur la fertilité du sol. Publication 611F, 239.

- Nelson, L. A. et Anderson, R. L. (1977). Partitioning of soil test—Crop response probability. *Soil testing: Correlating and interpreting the analytical results*, 29, 19-38.
- Parent, L., Grenon, L. et Buteau, P. (1991). Effet de plusieurs décennies d'exploitation intensive sur les propriétés des sols organiques dans le sud-ouest du Québec. *Acte Symposium*, 92-98.
- Parent, L. E. et Dafir, M. (1992). A theoretical concept of compositional nutrient diagnosis. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 117(2), 239-242.
- 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.
- Pire, R. R. (2001). Removal of N, P, K and Ca by an onion crop (*Allium cepa* L.) in a silty-clay soil, in a Semi Arid Region of Venezuela. *Acta horticulturae*, 103-110.
- PRISME. (2015b). *Culture de l'oignon. Sherrington, Québec, Canada*. Récupéré sur <https://prisme.ca/http://www.prisme.ca/oignon.asp>
- 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. Smr, K. et Nr, I. 2013. Effect of planting time, day length, soil pH and soil moisture on onion. *International Journal of Biology, Pharmacy and Applied Science*, 807-814.
- Statistiques Canada (2023). *Aperçu statistique de l'industrie des légumes de plein champ 2022*. [en ligne] <https://agriculture.canada.ca/fr/secteur/horticulture/rapports/apercu-statistique-lindustrie-legumes-plein-champ-2022>
- Télé-détection et analyse géospatiale, D. d. (2018). Superficie en oignons (secs, jaunes, d'Espagne, à cuire) selon les divisions de recensement (DR). Canada. Récupéré sur <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/95-634-x/2017001/article/54905/catm-ctra-164-fra.htm>
- Warncke, D., Dahl, J. et Zandstra, B. (2004). Nutrient Recommendations for Vegetable Crops in Michigan (E2904). Michigan State University Extension Bulletin, (E2934), 1-32.