

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

Version finale



Date : Janvier 2022

Fertilisation de l'oignon espagnol en sol minéral. Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation du Québec (2020-2023). Fascicule 06 : Oignon espagnol.

Document présenté au ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation.

LE RAPPORT PEUT ÊTRE CITÉ COMME SUIV :

Landry, C., C.-A. Joseph, S. Houde, J. Forest-D., et M. Grenier. 2022. Fertilisation de l'oignon espagnol en sol minéral. Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation du Québec (2020-2023). Fascicule 06. Présenté au ministère de l'agriculture et des pêcheries. 75 pages.
<https://irda.qc.ca/fr/publications/?r=1745&t=1411#documents>.

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

ÉQUIPE DE RÉALISATION DU PROJET

RESPONSABLE SCIENTIFIQUE ET GESTIONNAIRE DE PROJET

Christine Landry, agr., biologiste, Ph. D.

BASE DE DONNÉES

Lélia Anderson, agr., M. Sc. B. Ing.
Olivier Breton-Bourgault, agr.
Simon Guillemette, M. Sc.
Anne-Mary Le Guennec

PROGRAMMES D'ANALYSE

Stéphanie Houde, agr., M. Sc.
Michèle Grenier, M. Sc.
Alexandre Leblanc, biologiste, M. Sc.
Anaïs Charles, Ph. D.

VALEURS SCIENTIFIQUES DE RÉFÉRENCE EN NUTRITION DES CULTURES

Christine Landry, agr., biologiste, Ph. D.
Claude-Alla Joseph, Ph. D.
Stéphanie Houde, agr., M. Sc.
Julie Forest-Drolet, agr., M. Sc.

Les lecteurs qui souhaitent commenter ce rapport peuvent s'adresser à :

Christine Landry
Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)
2700, rue Einstein
Québec (Québec) G1P 3W8
Téléphone : 418 643-2380 poste 640
Télécopie : 418 644-6855
Courriel : christine.landry@irda.qc.ca

PARTENAIRES



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).

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 bonifier la base de données avec les travaux d'autres équipes de recherche québécoises ou de régions pédoclimatiques compatibles. 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.

Dans le cas de l'oignon espagnol, la recherche de données supplémentaires n'ayant pas permis de bonifier la base de données, les VSRF ont été déterminées exclusivement à partir des données des essais du PSEF. Celles-ci tiennent compte de la texture des sols et de divers indicateurs de la fertilité des sols, comme la teneur en matière organique, la saturation en phosphore et la teneur en potassium. Les VSRF ne compromettent pas les rendements ni la qualité des récoltes, en plus de s'inscrire dans les bonnes pratiques agricoles.

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

Les intervenants qui souhaitent consulter les rapports scientifiques (fascicules) sur lesquels s'appuient les grilles MAPAQ sont invités à consulter la fiche de la chercheuse Christine Landry sur le site web de l'IRDA, où se 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, établie par le Comité scientifique, 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 avec l'IRDA sous la coordination du MAPAQ

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES	VI
1. PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES ESSAIS ET DES ANALYSES.....	10
1.1 PROVENANCE DES DONNÉES.....	10
1.2 LOCALISATION DES SITES	10
1.3 PROPRIÉTÉS PHYSICO-CHIMIQUES DES SOLS	11
1.4 DISPOSITIFS EXPÉRIMENTAUX ET TRAITEMENTS	12
1.4.1 ESSAIS N.....	13
1.4.2 ESSAIS P	14
1.4.3 ESSAIS K	14
1.5 RENDEMENTS.....	16
1.6 ASPECTS ADDITIONNELS POUR L'INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS	17
1.6.1 VARIÉTÉ CULTURALE	17
1.6.2 PRÉCÉDENT CULTURAL	18
1.6.3 IRRIGATION	18
1.7 ANALYSE EXPLORATOIRE	18
1.8 CALCULS ET ANALYSES STATISTIQUES	19
1.8.1 DÉTERMINATION DES CLASSES DE FERTILITÉ DES SOLS	19
1.8.2 DÉTERMINATION DES DOSES OPTIMALES DE FERTILISANTS	21
1.8.3 DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL, QUANTITÉS D'ÉLÉMENTS NUTRITIFS EXPORTÉS.....	22
1.8.4 ANALYSES SUR LA QUALITÉ, LES CALIBRES, LES PERTES À LA RÉCOLTE ET LES PERTES À L'ENTREPOSAGE	23
2. FERTILISATION AZOTÉE	24
2.1 PORTRAIT ET REPRÉSENTATIVITÉ DES DONNÉES.....	24
2.2 DÉTERMINATION DES DOSES AGRONOMIQUES OPTIMALES.....	24
2.2.1 RECHERCHE D'INDICATEURS DE FERTILITÉ DU SOL	24
2.2.2 EFFET DE LA DOSE D'AZOTE SUR LE RENDEMENT VENDABLE	25
2.2.3 EFFET DE LA DOSE D'AZOTE SUR LES CALIBRES, LA QUALITÉ, LES PERTES À LA RÉCOLTE ET LES PERTES À L'ENTREPOSAGE.....	28
2.3 DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL ET EXPORTATIONS EN AZOTE	32
2.4 NITRATE RÉSIDUEL À LA RÉCOLTE	34
2.5 FERTILISATION AZOTÉE PROPOSÉE ET COMPARAISON AVEC LES RECOMMANDATIONS AU CANADA ET À L'ÉTRANGER	35
3. FERTILISATION PHOSPHATÉE.....	40
3.1 PORTRAIT ET REPRÉSENTATIVITÉ DES DONNÉES.....	40
3.2 DÉTERMINATION DES DOSES AGRONOMIQUES OPTIMALES.....	40
3.2.1 RECHERCHE D'INDICATEURS DE FERTILITÉ DU SOL	40
3.2.2 EFFET DE LA DOSE DE PHOSPHORE SUR LE RENDEMENT VENDABLE	41
3.2.3 EFFET DE LA DOSE DE PHOSPHORE SUR LES PERTES, LE CALIBRE ET LA QUALITÉ À LA RÉCOLTE	43
3.3 DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL ET EXPORTATIONS EN PHOSPHORE.....	48
3.4 FERTILISATION PHOSPHATÉE PROPOSÉE ET COMPARAISON AVEC LES RECOMMANDATIONS AU CANADA ET À L'ÉTRANGER	49
4. FERTILISATION POTASSIQUE	55
4.1 PORTRAIT ET REPRÉSENTATIVITÉ DES DONNÉES.....	55
4.2 DÉTERMINATION DES DOSES AGRONOMIQUES OPTIMALES.....	55
4.2.1 RECHERCHE D'INDICATEURS DE FERTILITÉ DU SOL	55
4.2.2 EFFET DE LA DOSE DE POTASSIUM SUR LES RENDEMENTS VENDABLES.....	56
4.2.3 EFFET DE LA DOSE DE POTASSIUM SUR LES PERTES, LE CALIBRE ET LA QUALITÉ À LA RÉCOLTE	58

4.3	DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL ET EXPORTATIONS.....	63
4.4	FERTILISATION POTASSIQUE PROPOSÉE ET COMPARAISON AVEC LES RECOMMANDATIONS AU CANADA ET À L'ÉTRANGER.....	64
5.	CONCLUSION	68
6.	FERTILISATION DE L'OIGNON ESPAGNOL VALEURS SCIENTIFIQUES DE RÉFÉRENCE EN FERTILISATION	69
	REMERCIEMENTS.....	70
7.	RÉFÉRENCES	71
ANNEXE I		75

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1. DESCRIPTION SOMMAIRE DES SITES DES ESSAIS DE FERTILISATION DE L'OIGNON ESPAGNOL.....	13
TABLEAU 2. DESCRIPTION DES TRAITEMENTS DES ESSAIS DE FERTILISATION AZOTÉE	14
TABLEAU 3. DESCRIPTION DES TRAITEMENTS DES ESSAIS DE FERTILISATION PHOSPHATÉE.....	14
TABLEAU 4. DESCRIPTION DES TRAITEMENTS DES ESSAIS DE FERTILISATION POTASSIQUE	15
TABLEAU 5. STATISTIQUES DESCRIPTIVES SUR LES DONNÉES NON VALIDÉES (AVANT L'ANALYSE EXPLORATOIRE) DES RENDEMENTS DE L'OIGNON ESPAGNOL DES ESSAIS N, P ET K	16
TABLEAU 6. VARIÉTÉS CULTURALES AYANT FAIT L'OBJET DES ESSAIS N, P ET K DE L'OIGNON ESPAGNOL.....	18
TABLEAU 7. BILAN DE LA VALIDATION DES DONNÉES À L'ISSUE DE L'ANALYSE EXPLORATOIRE	19
TABLEAU 8. DESCRIPTION DES CALIBRES DE L'OIGNON ESPAGNOL POUR LE CLASSEMENT À LA RÉCOLTE	23
TABLEAU 9. RÉPARTITION DES BLOCS DES ESSAIS N DE L'OIGNON ESPAGNOL POUR DIFFÉRENTES CLASSES DE PROPRIÉTÉS DE SOL APRÈS LA VALIDATION DES DONNÉES.....	24
TABLEAU 10. VALEURS CRITIQUES DES INDICATEURS DE SOL SIGNIFICATIFS SELON LES TESTS DE CATE-NELSON POUR LES ESSAIS N DE L'OIGNON ESPAGNOL	25
TABLEAU 11. CONCENTRATIONS ET EXPORTATIONS D'AZOTE DES OIGNONS ESPAGNOLS SELON LE DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL.....	33
TABLEAU 12. FERTILISATION AZOTÉE DE L'OIGNON ESPAGNOL – VALEURS SCIENTIFIQUES DE RÉFÉRENCE EN FERTILISATION	37
TABLEAU 13. COMPARAISON DES RECOMMANDATIONS EN N POUR LA PRODUCTION D'OIGNON AU CANADA ET À L'ÉTRANGER	39
TABLEAU 14. RÉPARTITION DES BLOCS DES ESSAIS P D'OIGNONS ESPAGNOLS POUR DIFFÉRENTES CLASSES DE PROPRIÉTÉS DE SOL APRÈS LA VALIDATION DES DONNÉES.....	40
TABLEAU 15. CONCENTRATIONS ET EXPORTATIONS DE PHOSPHORE DES OIGNONS ESPAGNOLS SELON LE DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL.....	49
TABLEAU 16. FERTILISATION PHOSPHATÉE DE L'OIGNON ESPAGNOL – VALEURS SCIENTIFIQUES DE RÉFÉRENCE EN FERTILISATION	52
TABLEAU 17. COMPARAISON DES RECOMMANDATIONS EN P_2O_5 POUR LA PRODUCTION D'OIGNON EN SOL MINÉRAL AU CANADA ET À L'ÉTRANGER	54
TABLEAU 18. RÉPARTITION DES BLOCS DES ESSAIS K SELON DIFFÉRENTES CLASSES DE PROPRIÉTÉS DE SOL APRÈS LA VALIDATION DES DONNÉES	55
TABLEAU 19. VALEURS CRITIQUES DES INDICATEURS DE SOLS SIGNIFICATIFS SELON LES TESTS DE CATE-NELSON POUR LES ESSAIS K D'OIGNON ESPAGNOL	56
TABLEAU 20. CONCENTRATIONS ET EXPORTATIONS DE POTASSIUM DES BULBES D'OIGNONS ESPAGNOLS SELON LE DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL.....	63
TABLEAU 21. FERTILISATION POTASSIQUE DE L'OIGNON ESPAGNOL – VALEURS SCIENTIFIQUES DE RÉFÉRENCE EN FERTILISATION	65
TABLEAU 22. COMPARAISON DES RECOMMANDATIONS EN K_2O POUR LA PRODUCTION D'OIGNON ESPAGNOL EN SOL MINÉRAL EN AMÉRIQUE DU NORD.....	67

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1. RÉPARTITION GÉOGRAPHIQUE DES SITES.	10
FIGURE 2. DISTRIBUTION DES BLOCS DES ESSAIS DANS LE TRIANGLE DES TEXTURES.	11
FIGURE 3. RENDEMENTS MOYENS PAR SITE EN FONCTION DES TRAITEMENTS DE FERTILISATION.	17
FIGURE 4. DÉFINITIONS DES QUADRANTS D'UN TEST DE PARTITION BINAIRE DE CATE-NELSON (1979).....	21
FIGURE 5. RÉSULTATS DES ANALYSES DE VARIANCE SUR LA RÉPONSE DE L'OIGNON ESPAGNOL AUX DOSES CROISSANTES D'AZOTE.	27
FIGURE 6. EFFET DE LA DOSE DE N SUR LES CALIBRES DE L'OIGNON ESPAGNOL À LA RÉCOLTE DANS LES SOLS DES GROUPES DE TEXTURES G2 ET G3 DE PART ET D'AUTRE DU SEUIL DE MATIÈRE ORGANIQUE.	29
FIGURE 7. EFFET DE LA DOSE DE N SUR LES PERTES D'OIGNONS ESPAGNOLS À LA RÉCOLTE SELON LA TENEUR EN MATIÈRE ORGANIQUE DES SOLS G2 ET G3.....	30
FIGURE 8. EFFET DE LA DOSE DE N SUR LA QUALITÉ DE L'OIGNON ESPAGNOL À LA RÉCOLTE.	30
FIGURE 9. EFFET DE LA DOSE DE N SUR LES PERTES D'OIGNONS ESPAGNOLS À L'ENTREPOSAGE.	31
FIGURE 10. EFFET DE LA DOSE DE N SUR LA QUALITÉ DE L'OIGNON ESPAGNOL À L'ENTREPOSAGE.	32
FIGURE 11. EXPORTATIONS D'AZOTE DE L'OIGNON ESPAGNOL EN FONCTION DES RENDEMENTS SELON LES CULTIVARS (A) ET LE DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL (B).	34
FIGURE 12. INDICES NITRATE DES TRAITEMENTS D'OIGNONS ESPAGNOLS AUX PROFONDEURS 0-30 ET 30-60 CM DANS LES SOLS G1 VS G2-G3, AU MOMENT DE LA RÉCOLTE.	35
FIGURE 13. RÉSULTATS DES ANALYSES DE VARIANCE SUR LA RÉPONSE DE L'OIGNON ESPAGNOL AUX DOSES CROISSANTES DE PHOSPHORE.	43
FIGURE 14. EFFET DE LA DOSE DE PHOSPHORE SUR LES CALIBRES DE L'OIGNON ESPAGNOL À LA RÉCOLTE DANS LES SOLS DES GROUPES DE TEXTURES G1 ET G2-G3.	44
FIGURE 15. EFFET DE LA DOSE DE PHOSPHORE SUR LES PERTES D'OIGNONS ESPAGNOLS À LA EN FONCTION DES GROUPES DE TEXTURES.....	45
FIGURE 16. EFFET DE LA DOSE DE PHOSPHORE SUR LA QUALITÉ DE L'OIGNON ESPAGNOL À LA RÉCOLTE.	46
FIGURE 17. EFFET DE LA DOSE DE PHOSPHORE SUR LES PERTES DE RENDEMENTS SUIVANT UNE PÉRIODE D'ENTREPOSAGE DANS LA CULTURE D'OIGNON ESPAGNOL SELON LA TENEUR EN MATIÈRES ORGANIQUE DES SOLS DE GROUPES DE TEXTURES G2 ET G3.	47
FIGURE 18. EFFET DE LA DOSE DE PHOSPHORE SUR LA QUALITÉ DE L'OIGNON ESPAGNOL SUIVANT UNE PÉRIODE D'ENTREPOSAGE.....	48
FIGURE 19. EXPORTATIONS DE PHOSPHORE DE L'OIGNON ESPAGNOL EN FONCTION DES RENDEMENTS SELON LES VARIÉTÉS (A) ET LE DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL (B).	49
FIGURE 20. RÉSULTATS DES ANALYSES DE VARIANCE SUR LA RÉPONSE DE L'OIGNON ESPAGNOL AUX DOSES CROISSANTES DE POTASSIUM.....	58
FIGURE 21. EFFET DE LA DOSE DE K ₂ O SUR LES CALIBRES DE L'OIGNON ESPAGNOL À LA RÉCOLTE. N = NOMBRE D'OBSERVATIONS.	59
FIGURE 22. EFFET DE LA DOSE DE K ₂ O SUR LES PERTES D'OIGNONS ESPAGNOLS À LA RÉCOLTE, TOUTES TEXTURES DE SOL CONFONDUES.....	60
FIGURE 23. CAUSES DE REJET DES OIGNONS ESPAGNOLS À LA RÉCOLTE EN FONCTION DES TRAITEMENTS DE FERTILISATION.....	60
FIGURE 24. EFFET DE LA DOSE DE K ₂ O SUR LA QUALITÉ DE L'OIGNON ESPAGNOL À LA RÉCOLTE.	61
FIGURE 25. EFFET DE LA DOSE DE K ₂ O SUR LES PERTES D'OIGNONS ESPAGNOLS SUIVANT UNE PÉRIODE D'ENTREPOSAGE.	62
FIGURE 26. EFFET DE LA DOSE DE K ₂ O SUR LA QUALITÉ DE L'OIGNON ESPAGNOL SUIVANT UNE PÉRIODE D'ENTREPOSAGE.....	62
FIGURE 27. EXPORTATIONS DE K ₂ O DANS LES BULBES D'OIGNONS ESPAGNOLS EN FONCTION DES RENDEMENTS, IDENTIFIÉES SELON LES VARIÉTÉS (A) ET LE DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL (B).	64

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 espagnol cultivé en sol minéral ont été calculées à partir des données du PSEF, pour lesquels les essais se sont déroulés entre les années 2013 et 2019.

1.2 Localisation des sites

Les essais d'oignon espagnol ont été réalisés majoritairement dans la région de la Montérégie (64 %), suivie des Laurentides (20 %) et de Lanaudière (16 %) (Figure 1). La répartition géographique des essais s'avère globalement représentative des régions administratives concernées par la culture, environ 80 % des oignons québécois (toutes sortes confondues) étant produits en Montérégie (Institut de la statistique du Québec, 2020; MAPAQ, 2020).

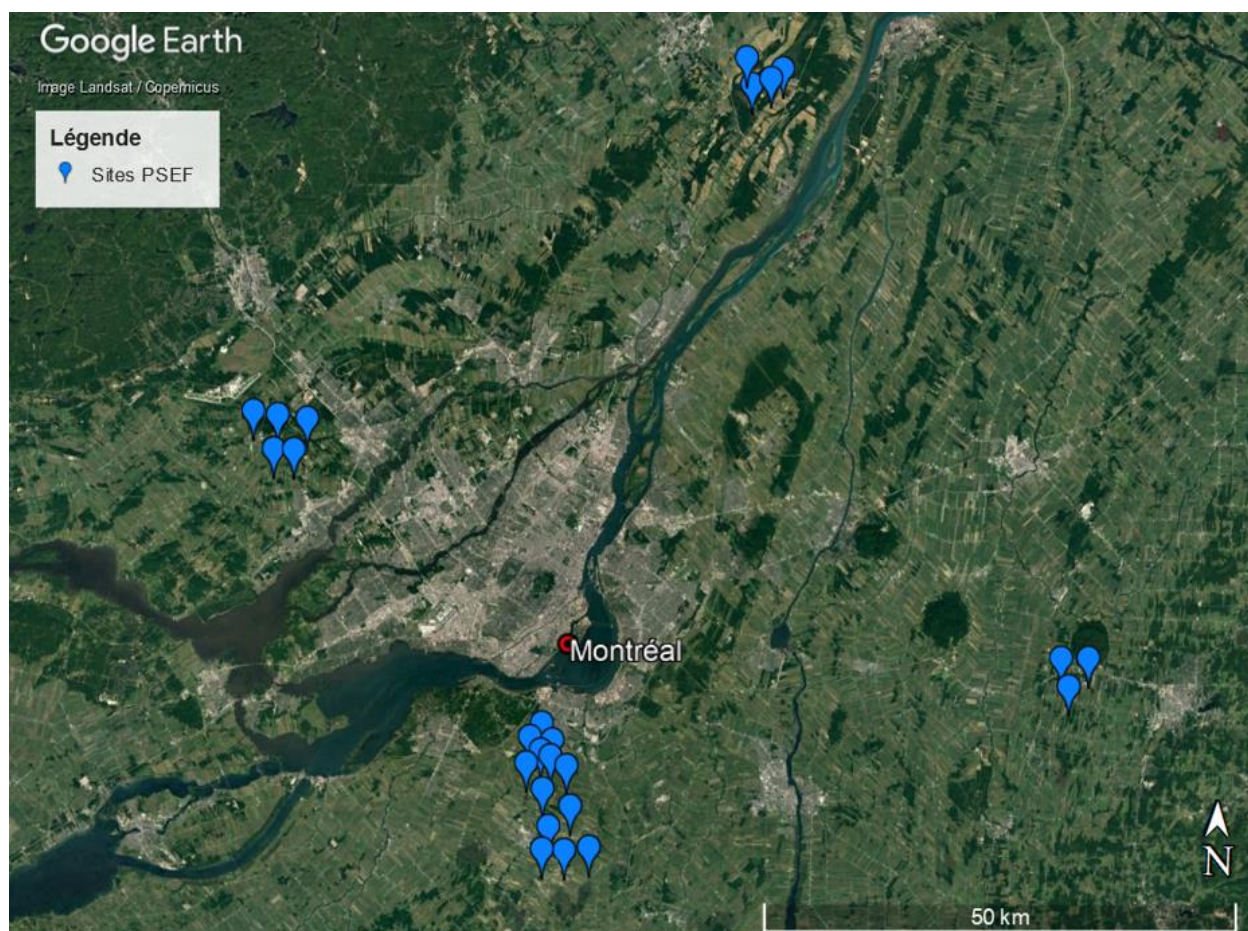


Figure 1. Répartition géographique des sites. L'emplacement des repères est approximatif et vise seulement à représenter la répartition géographique des sites sur le territoire du Québec.

1.3 Propriétés physico-chimiques des sols

Les analyses physico-chimiques du sol (0-20 cm) ont été effectuées par bloc afin de déterminer des indicateurs de fertilité. Plusieurs paramètres ont été mesurés, soit la teneur en matière organique (méthode par perte au feu), en éléments nutritifs (méthode Mehlich-3), la masse volumique apparente, la granulométrie et la distribution des agrégats stables à l'eau. De plus, pour chaque site, une analyse des profils de sol a été réalisée par l'équipe des pédologues de l'IRDA, laquelle a servi à identifier les séries de sols et leurs particularités pédologiques, à valider le groupe de textures et à prendre en considération l'état de santé du sol lors de l'analyse exploratoire.

Les essais d'oignons espagnols ont été menés majoritairement sur des sols de textures moyennes et grossières (Figure 2). Ceux-ci contenaient entre 5 et 60 % d'argile, la majorité (89 %) se situant sous le seuil de 30 % d'argile. En effet, de l'ensemble des essais, 61 % ont été réalisés sur des sols du groupe de textures G3, 25 % sur des G2 et 14 % sur des G1. Il est à noter que les sols de la classe texturale « loam sablo-argileux » ont été attribués au groupe G2 plutôt qu'au G1, conformément aux recommandations de l'équipe de pédologues de l'IRDA (C. Bossé, comm. perso., 2021), puisque ces sols partagent davantage les caractéristiques des G2.

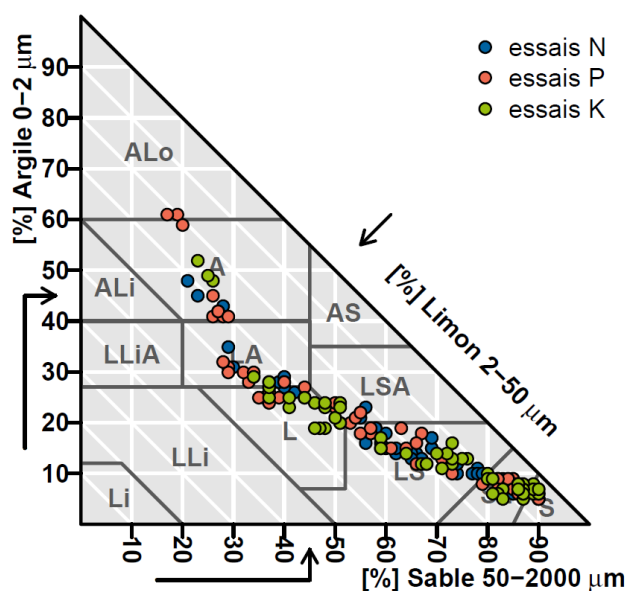


Figure 2. Distribution des blocs des essais dans le triangle des textures. ALo : Argile lourde ; ALi : Argile limoneuse ; A : Argile ; LLiA : Loam limono-argileux ; LA : Loam argileux ; AS : Argile sableuse ; L : Loam ; Li : Limon ; LLi : Loam limoneux ; LSA : Loam sablo-argileux ; LS : Sable loameux ; S : Sable.

Pour la totalité des essais, le pH_{eau} moyen des sols était de $6,7 \pm 0,6$, ce qui est considéré convenable pour les cultures du genre *Allium* (OMAFRA, 2010) ou légèrement alcalin selon les recommandations d'autres sources (Boyhan et al., 2017; Sanchez et al., 2020). La matière organique du sol mesurée par la méthode par perte au feu variait de 1,4 à 6,6 %, bien que la majorité des sites (71 %) contenait entre 2 et 4 % de matière organique. Les analyses par la méthode Mehlich-3 ont révélé que l'ISP₁ des sols variait largement entre 1 et 48 %. En général, les essais d'oignons espagnols ont été réalisés sur des sols saturés en P : près du tiers des sites avaient un ISP₁

supérieur à 25 % et le quart des sites avaient un ISP_1 entre 15 et 25 %. Finalement, les teneurs en K_{M3} des sols variaient entre 62 et 390 ppm K_{M3} , alors que 66 % des sites contenaient moins de 175 ppm.

1.4 Dispositifs expérimentaux et traitements

La structure du dispositif expérimental des essais était la même à tous les sites. Les essais N, P et K étaient indépendants et répartis aléatoirement à l'intérieur d'un site. Pour chaque essai, les traitements (doses d'engrais testées) étaient disposés selon un plan en trois blocs complètement aléatoires. Une description sommaire des sites des essais de l'oignon espagnol est présentée au Tableau 1.

Hormis les essais N, les traitements ont été choisis en fonction de la classe de fertilité du sol pour l'élément testé (Essais P, section 1.4.2 et essais K, 1.4.3). L'indice de saturation en P (ISP_1) et la teneur du sol en K_{M3} ont été utilisés pour classer les sols comme étant « à faible teneur » ou « à haute teneur » en P ou K de part et d'autre d'un seuil préétabli. Des doses plus élevées de P_2O_5 et de K_2O ont donc été testées dans les sols dits « faiblement saturés en P » ou « à faibles teneurs en K_{M3} » que dans les sols dits à « fortes teneurs ». Par ailleurs, quatre sites des essais P et trois sites des essais K ont été mal classés de part et d'autre des seuils présumés de non-réponse de la culture et n'ont pas reçu les doses prévues (ex. : doses élevées pour des sites à forte teneur en K_{M3}). Ceci a pu faire en sorte que la réponse de la culture à la fertilisation n'a pu être adéquatement étudiée. Par exemple, en cas de mauvais classement dans les sols à faibles teneurs, même les niveaux de traitement les plus élevés pourraient être insuffisants pour l'atteinte d'un plateau de production. Au contraire, dans les sols à fortes teneurs mal classés, le plateau de production pourrait être atteint dès l'application du plus faible niveau de traitement. 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.

Tableau 1. Description sommaire des sites des essais de fertilisation de l'oignon espagnol

							Essais N		Essais P		Essais K	
# site	Série de sol	Région admin. ¹	Année	Date semis	Date récolte	Argile	MO ²	Rdt ³ vendable	ISP ₁ ^{4, 6}	Rdt vendable	Teneur en K _{M3} ^{5, 6}	Rdt vendable
						%	%	kg/ha	%	kg/ha	kg/ha	kg/ha
1	Saint-Thomas	14	2014	08 mai	12 août	8	2,4	26 942	28,0	28 269	210	26 435
2	Saint-Thomas	14	2015	05 mai	12 août	6	2,3	26 609	28,0	28 462	229	31 054
3	Saint-Thomas	14	2016	06 mai	17 août	7	2,3	33 393	29,0	33 793	145	32 304
4	Achigan	14	2016	17 mai	18 août	7	3,8	23 621	11,0	22 567	238	22 092
5	Coteau	15	2018	17 mai	06 sept.	15	3,0	31 480	nd	nd	514	33 347
6	Chicot vers St-Bernard	15	2013	15 mai	09 sept.	18	3,0	26 920	21,0	18 169	747	17 346
7	Chicot	15	2014	19 mai	15 sept.	13	3,5	22 900	15,0	23 550	584	23 174
8	Saint-Amable	15	2016	13 mai	07 sept.	11	3,5	28 859	nd	nd	nd	nd
9	Saint-Amable	15	2019	22 mai	18 sept.	12	nd	nd	5,3	38 180	374	37 818
10	Botreaux	16	2017	19 mai	25 août	12	1,4	43 071	nd	nd	272	43 967
11	Laprairie	16	2014	20 mai	15 août	16	2,8	34 687	24,0	39 435	251	33 872
12	Saint-Blaise	16	2019	07 mai	09 sept.	26	3,4	95 582	9,9	93 507	169	93 987
13	Providence	16	2019	27 mai	06 sept.	60	nd	nd	5,9	55 735	nd	nd
14	Saint-Régis	16	2013	03 mai	19 août	25	4,1	46 224	15,0	43 193	550	50 054
15	Saint-Blaise/Saint-Régis	16	2014	14 mai	18 août	26	3,6	85 430	8,1	102731	244	97 461
16	Sabrevois/Saint-Blaise	16	2016	14 mai	31 août	30	4,0	53 249	2,0	73 074	156	65 185
17	Providence	16	2018	19 mai	16 août	46	4,5	56 262	1,4	58 399	512	60 204
18	Massueville vers Ste-Sophie	16	2015	04 juin	17 sept.	7	2,9	24 471	48,0	25509	303	28 779
19	Massueville vers Ste-Sophie	16	2014	06 juin	10 sept.	8	3,8	65 059	20,0	72 364	409	72 302
20	Napierville	16	2019	13 mai	06 sept.	23	3,5	34 431	35,0	36 389	505	30 459
21	Napierville	16	2018	18 mai	15 août	25	nd	nd	11,0	52 324	nd	nd
22	St-Patrice	16	2018	11 mai	16 août	19	3,5	33 550	9,6	29 485	nd	nd
23	nd	16	2017	19 mai	25 août	9	nd	nd	nd	nd	340	45 857
24	Aston	16	2017	24 mai	31 août	6	3,3	48 760	nd	nd	284	52 469
25	Providence	16	2018	14 mai	15 août	42	nd	nd	8,5	67 657	nd	nd
	Moyenne					18	3,2	42 075	17,2	46 060	352	44 908

¹ Région administrative; 14 : Laurentides; 15 : Lanaudière; 16 : Montérégie.

² MO : Matière organique mesurée par perte au feu.

³ Rdt : Rendement sur base humide.

⁴ Indice de saturation du sol en phosphore (P/Al)_{Mehlich-3}.

⁵ K_{M3} : Teneur du sol en K mesuré par la méthode Mehlich-3. Les valeurs en kg/ha ont été obtenues en multipliant les résultats de l'analyse (en ppm) par le facteur 2,24.

⁶ Les seuils critiques préétablis au protocole étaient un ISP₁ de 7,6 ou 13,1 % selon la teneur en argile pour les essais P et une teneur de 400 kg K_{M3}/ha pour les essais K.

1.4.1 Essais N

Les traitements des essais azotés correspondaient à cinq doses de N variant de 0 à 160 kg/ha. Ces doses ont été appliquées sous forme de nitrate d'ammonium calcique (27-0-0) en deux apports : (i) en bande, c.-à-d. dans un sillon creusé et refermé à la binette, à la transplantation et (ii) en bande, au stade 4-7 feuilles, soit environ 30-40 jours après la transplantation (Tableau 2). La deuxième application a été planifiée de manière à ne pas dépasser la date du 24 juin afin d'éviter la croissance excessive des feuilles au détriment de celle des bulbes. Exceptionnellement pour les essais menés dans la région de Lanaudière (sites 1 à 4), le fractionnement a été réalisé en trois apports selon les pratiques en vigueur dans cette région (Tableau 2). Tous les traitements de N

comportaient des apports complémentaires de P_2O_5 et de K_2O dont la dose, le mode et la période d'application correspondaient au T8 et au T13 des essais P et K, respectivement (Tableaux 3 et 4).

Tableau 2. Description des traitements des essais de fertilisation azotée

Essais N				Dose de N (kg/ha)				
Régions	Années	Nombre de sites	Mode et période d'application	T1	T2	T3	T4	T5
Laurentides, Montérégie	2013-2019	16	En bande à la transplantation	0	40	50	80	100
			En bande, stade 4-7 feuilles (30-40 JAT ¹)	0	0	30	40	60
			Apport total	0	40	80	120	160
Lanaudière	2014-2016	4	En bande à la transplantation	0	20	20	40	40
			En bande, stade 3-4 feuilles (20 JAT)	0	20	20	40	60
			En bande, stade 5-8 feuilles (40-45 JAT)	0	0	40	40	60
			Apport total	0	40	80	120	160

¹ JAT : Jours après transplantation

1.4.2 Essais P

Les traitements correspondaient à cinq doses de P_2O_5 variant de 0 à 180 kg/ha ou de 0 à 120 kg/ha, selon la saturation en P (ISP₁) du sol. L'intervalle de dose testé était sélectionné en fonction du seuil d'ISP₁ critique du REA (MDDEP, 2010 ; Tableau 3). L'engrais était appliqué en totalité en bande à la transplantation, dans un sillon ouvert et refermé à la binette, sous forme de superphosphate triple (0-46-0). Tous les traitements de P comportaient des apports complémentaires de N et de K_2O dont la dose, le mode et la période d'application correspondaient au T3 et au T13 des essais N et K, respectivement (Tableaux 2 et 4).

Tableau 3. Description des traitements des essais de fertilisation phosphatée

Essais P				Dose de P_2O_5 (kg/ha)				
Années	Nombre de sites ¹	ISP ₁ ²	Mode et période d'application	T6	T7	T8	T9	T10
2013-2014	3	≤ 7,6 ou ≤ 13,1 %	En bande à la transplantation (apport total)	0	90	120	150	180
	4	> 7,6 ou > 13,1 %	En bande à la transplantation (apport total)	0	30	60	90	120
2015-2019	10	≤ 7,6 ou ≤ 13,1 %	En bande à la transplantation (apport total)	0	45	90	135	180
	3	> 7,6 ou > 13,1 %	En bande à la transplantation (apport total)	0	30	60	90	120

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

² ISP₁ : indice de saturation en phosphore du sol, (P/Al)_{M3}. Le seuil est de 7,6 % pour les sols de plus de 30 % d'argile et de 13,1 % pour les sols de moins de 30 % d'argile.

1.4.3 Essais K

Les traitements correspondaient à cinq doses de K_2O variant de 0 à 180 kg/ha ou de 0 à 120 kg/ha selon la teneur du sol en K_{M3} (Tableau 4). En fonction des traitements, l'engrais était appliqué à deux moments : (i) à la transplantation (en un ou deux apports, en bande, dans un sillon ouvert et refermé à la binette, et à la volée si applicable) et (ii) en bande au stade 4-7 feuilles, excepté pour les essais menés dans la région de Lanaudière (sites 1 à 4) afin de faire concorder les apports avec le fractionnement de N, soit en trois apports selon les pratiques en vigueur dans la région (Tableau 4). Les sources d'engrais préconisées étaient le muriate de

potassium (0-0-60) ou le sulfate de potassium et de magnésium (0-0-22-11) lorsque du Mg était nécessaire. Tous les traitements de K₂O comportaient des apports complémentaires de N et de P₂O₅ dont la dose, le mode et la période d'application correspondaient au T3 et au T8 des essais N et K respectivement (Tableaux 2 et 3).

Tableau 4. Description des traitements des essais de fertilisation potassique

Essais K					Doses de K ₂ O (kg/ha)				
Régions	Années	Nombre de sites ¹	K _{M3} (kg/ha)	Mode et période d'application	T11	T12	T13	T14	T15
Laurentides, Montérégie	2013-2014	4	≤ 400	À la volée à la transplantation	0	0	0	30	60
				En bande à la transplantation	0	70	70	70	70
				En bande au stade 4-7 feuilles (30-40 JAT ²)	0	20	50	50	50
				Apport total	0	90	120	150	180
		3	> 400	En bande à la transplantation	0	30	60	70	70
				En bande, stade 4-7 feuilles (30-40 JAT)	0	0	0	20	50
				Apport total	0	30	60	90	120
	2015-2019	11	≤ 400	À la volée à la transplantation	0	0	0	0	30
				En bande à la transplantation	0	45	70	70	70
				En bande, stade 4-7 feuilles (30-40 JAT)	0	0	20	65	80
				Apport total	0	45	90	135	180
		2	> 400	En bande à la transplantation	0	30	60	70	70
				En bande, stade 4-7 feuilles (30-40 JAT)	0	0	0	20	50
				Apport total	0	30	60	90	120
Lanaudière	2014	1	≤ 400	En bande à la transplantation	0	30	30	30	60
				En bande, stade 3-4 feuilles (20 JAT)	0	30	30	60	60
				En bande, stade 5-8 feuilles (40-45 JAT)	0	30	60	60	60
				Apport total	0	90	120	150	180
		0	> 400	<i>Non applicable</i>					
	2015-2016	3	≤ 400	En bande à la transplantation	0	45	70	70	70
				En bande, stade 3-4 feuilles (20 JAT)	0	0	20	65	80
				En bande, stade 5-8 feuilles (40-45 JAT)	0	0	0	0	30
				Apport total	0	45	90	135	180
		0	> 400	<i>Non applicable</i>					

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

² JAT : Jours après transplantation

1.5 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 totaux étaient en moyenne 44 779, 51 189 et 47 608 kg/ha pour les essais N, P et K, respectivement, bien qu'une grande variabilité ait été observée avec des valeurs allant de 3 250 à plus de 120 000 kg/ha. Le plus faible rendement moyen et la grande variation de rendements obtenus dans les essais N s'expliquent principalement par la faible productivité dans les parcelles recevant peu ou pas d'engrais azoté, traduisant une certaine sensibilité de la culture au manque de N. À l'opposé, de plus faibles variations ont été observées dans les essais P, en raison de la plus faible sensibilité de la culture au manque de P. Les rendements vendables moyens étaient, quant à eux, de 42 139, de 47 260 et de 44 841 kg/ha dans les essais N, P et K, respectivement.

Les pertes de récolte, c.-à-d. la différence entre les rendements totaux et les rendements vendables, ont été en moyenne de 5 à 7 %, selon les essais (Tableau 5). Des variations considérables ont été observées au niveau des taux de pertes selon les sites avec des valeurs allant de 0 à 59 %. Les taux élevés de pertes de rendement ont été observé particulièrement dans le site 13 lors du classement à la récolte. Toutefois, les rendements vendables restent assez élevés en raison du fait que le site a eu un très haut potentiel de rendement.

Tableau 5. Statistiques descriptives sur les données non validées (avant l'analyse exploratoire) des rendements de l'oignon espagnol des essais N, P et K

	N ¹	Moyenne	Écart-type	Minimum	Maximum
Rendement total (kg/ha)					
N	292	44 779	21 633	3 251	120 152
P	298	51 189	26 238	20 844	119 343
K	296	47 608	24 072	6 914	115 808
Rendement vendable (kg/ha)					
N	299	42 139	21 158	2 695	118 232
P	300	47 260	24 605	12 675	115 758
K	300	44 841	23 032	5 453	115 000
Pertes (%)					
N	292	6	9	0	47
P	298	7	12	0	59
K	296	5	8	0	59

¹ N : nombre d'observations. Les nombres observations inférieurs à 300 sont causés par des données manquantes. Ex.: un sac d'oignons de calibre « Moyen » a été perdu, ainsi, les rendements vendables et totaux sont manquants.

Les rendements vendables et totaux de l'oignon espagnol ainsi que les rendements moyens de référence pour la période de réalisation des essais sont présentés à la Figure 3. Les rendements de référence ont été généralement atteints dans toutes les unités expérimentales. Néanmoins, en raison du fait que peu de données sur l'oignon espagnol existent, les rendements de référence considérés ont été ceux des années 2000 et 2001 (FADQ, 2000, 2001), alors que les essais se sont tenus entre 2013 et 2019. Les résultats des analyses ont suggéré que l'obtention de hauts rendements à certains sites pourrait être attribuable à des effets de régions (climat, régie de culture, etc.). En effet, tel qu'illustré à la Figure 3, les sites situés dans la région de la Montérégie (sites 10 à 25) présentent en général de meilleurs rendements que ceux de Lanaudière (sites 1 à 4) et des Laurentides (sites 5 à 9). De plus, certaines variétés ont été davantage productives que d'autres (voir section 1.6.1, Tableau 6).

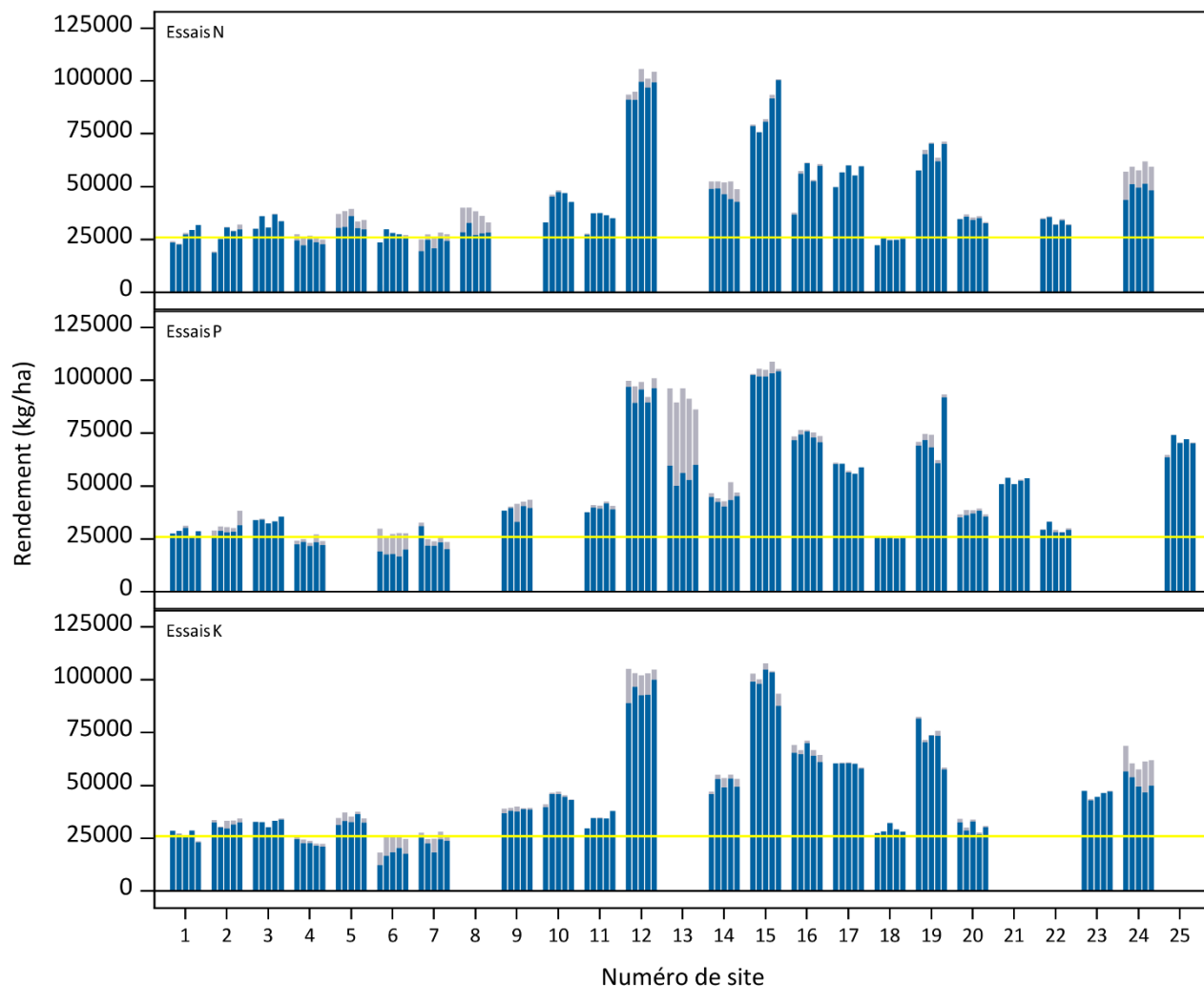


Figure 3. Rendements moyens par site en fonction des traitements de fertilisation. Légende : bleu = vendable; gris = non-vendable. Les traitements de fertilisation sont les doses croissantes d'engrais de l'élément à l'essai et sont détaillés à la section 1.4. Les rendements de référence moyens de la culture (ligne jaune) sont présentés à titre indicatif, car peu de données étaient disponibles (moyennes provinciales des années 2000 et 2001; FADQ, 2000, 2001).

1.6 Aspects additionnels pour l'interprétation des résultats

1.6.1 Variété culturale

Dans le cadre des essais, onze variétés différentes ont été utilisées (Tableau 6). La plus utilisée était la Delgado (30 à 40 %, selon les essais), suivie de la Bellemare (15 %) et des variétés Latigo et Valero (10 % chacune). Les sept autres variétés ont été testées à un site chacune et ont représenté 5 % du jeu de données.

Tableau 6. Variétés culturales ayant fait l'objet des essais N, P et K de l'oignon espagnol

Variété	Proportion des essais sur lesquels était testée chaque variété (%)			Rendement vendable moyen (kg/ha)
	N	P	K	
Delgado	30 *	40	30	64 181
Bellemare	15	15	15	28 286
Latigo	10	10	10	21 886
Valero	10	10	10	47 949
Golden spike	5	0	10	44 173
Pandero	5	5	5	46 495
Rancheros	5	5	5	33 682
SV4643NT F1	5	5	5	36 094
T-489	5	5	5	27 282
Candy	5	0	5	50 027
SV6672NW F1	5	5	0	31 518
Total	100 %	100 %	100 %	

* Par exemple, 30 % des essais N ont utilisé la variété Delgado pour laquelle le rendement moyen —essais N, P et K confondus— était de 64 181 kg/ha.

1.6.2 Précédent cultural

Les essais d'oignon espagnol suivaient majoritairement une culture de brocoli (23 %) ou de seigle (20 %) et dans une moindre mesure, une culture de chou, de maïs-grain, d'oignon, de soya, de pomme de terre, de citrouille et de tomate (5 à 8 %), à raison d'un site par culture. L'absence de répétitions pour la majorité des 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

La plupart des essais d'oignons espagnols étaient irrigués et ce, par aspersion (20 %), par goutte à goutte (8 %), par un système combiné d'aspersion et de goutte à goutte (7 %) ou par un système non spécifié (37 %). Autrement, les sites n'étaient pas irrigués (24 %) ou l'information est manquante (5 %).

1.7 Analyse exploratoire

Lorsque réalisés en plein champ, les essais de fertilisation peuvent faire l'objet de multiples problématiques pouvant entraîner leur exclusion du jeu de données. En cours de réalisation, certains essais peuvent être arrêtés, lorsque jugés non valides par l'équipe de terrain pour des raisons diverses, dont le mauvais établissement de la culture, la présence de maladies foliaires, la perte de la biomasse récoltée, etc. Dans le cadre du traitement des données, une analyse exploratoire a été également réalisée minutieusement. Celle-ci a permis, entre autres, de détecter la présence de données aberrantes ou influentes, et de vérifier la représentativité des rendements en comparaison à ce qui est obtenu en contexte de production commerciale sur la même période lorsque possible. Dans le cadre de cette procédure, les statistiques descriptives sur les rendements et la densité de la population sont analysées, notamment les coefficients de variation associés aux données de chacun des sites. Par la suite, une attention plus particulière est portée sur les sites présentant une variation de rendements et de densité supérieure à 30 % et à 15 %, respectivement. Pour terminer, une régression robuste est aussi effectuée pour la détection de données aberrantes en utilisant la procédure *robustreg* et la méthode de l'estimation MM de SAS

(Anderson et Schumacker, 2003; SAS Institute inc., 2018). Cette démarche a mené au retrait de certaines parcelles, certains blocs ou certains essais jugés problématiques.

Le bilan de la validation des données est présenté au Tableau 7. À l'issue de l'analyse exploratoire, 94 % (90, 93 et 98 % des essais N, P et K respectivement) du jeu de données initial a été validé et conservé pour la suite de l'analyse. La liste des données exclues lors de la validation est présentée à l'Annexe I.

Tableau 7. Bilan de la validation des données à l'issue de l'analyse exploratoire

Essai	Jeu de données initial		Exclusions		Jeu de données final	
	Nb sites	Nb obs.	Nb sites	Nb obs.	Nb sites	Nb obs.
N	20	300	0	31	19	269
P	20	300	1	20	19	280
K	20	300	1	6	20	294

1.8 Calculs et analyses statistiques

La méthodologie générale employée pour le calcul des VSRF et les analyses statistiques préconisées sont similaires pour toutes les cultures traitées dans le MIRVRF. 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. Dans le cas spécifique de l'oignon espagnol, 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.

1.8.1 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). Ce test de partition consiste à mettre en relation le rendement relatif de la culture (RRel, %) et l'indicateur de prédiction de la fertilité du sol (ex. la teneur en K_{M3}). Le RRel est calculé par bloc, en divisant le rendement vendable du témoin ($\text{Rendement}_{\text{Témoin}}$) par le rendement vendable maximal ($\text{Rendement}_{\text{Maximal}}$) parmi tous les traitements du bloc, incluant le témoin (Éq. 2). 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.

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

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 4).

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 4) : $VP/(VP+FN)$.

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 4) : $VN/(VN+FP)$.

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

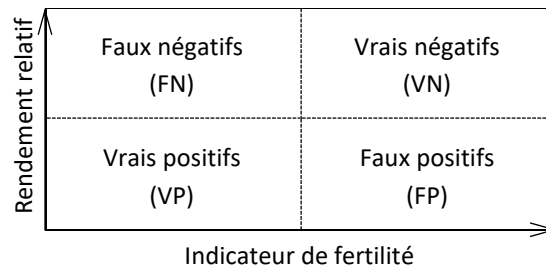


Figure 4. Définitions des quadrants d'un test de partition binaire de Cate-Nelson (1979).

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 à la section 1.8.1.

L'effet de l'apport des doses croissantes de fertilisants est étudié en tenant compte du rapport de rendements (ROM, Éq. 3). 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. 3) :

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

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), 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.

1.8.3 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 espagnol, 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 (D. 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, 2021, mise en ligne à venir sur GitHub IRDA) :

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

Le calcul des exportations fournit de nouvelles valeurs scientifiques liées à la nutrition de l'oignon espagnol. 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.

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

Des analyses complémentaires ont été effectuées afin d'évaluer l'effet des traitements de fertilisation sur les calibres des oignons à la récolte, les pourcentages de pertes à la récolte et sur les pourcentages de pertes suivant une période d'entreposage. 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 séchés ont été classés selon les critères présentés au Tableau 8.

Tableau 8. Description des calibres de l'oignon espagnol pour le classement à la récolte

Calibre	Diamètre	
	Pouces (po)	Centimètres (cm)
Petit	$\leq 2 \frac{1}{4}$	$\leq 5,7$
Moyen	$2 \frac{1}{4}$ à $2 \frac{3}{4}$	$> 5,7$ à ≤ 7
Gros	$2 \frac{3}{4}$ à $3 \frac{1}{4}$	> 7 à $\leq 8,3$
Jumbo	$3 \frac{1}{4}$ à 4	$> 8,3$ à $\leq 10,2$
Colossal	4 à $4 \frac{3}{4}$	$> 10,2$ à $\leq 12,1$
Super colossal	$> 4 \frac{3}{4}$	$> 12,1$

Les pertes à la récolte consistaient en la présence de cœurs doubles, de fusariose, de pourritures bactériennes ou de pourriture du collet. Pour ce faire, un échantillon constitué de 5 oignons jumbos représentatifs de la parcelle a été prélevé aléatoirement dans chaque parcelle. Une évaluation de la qualité des oignons a également été effectuée à la suite d'une période de conservation en entrepôt. En moyenne, celle-ci a duré 67 jours (56 à 81 jours). À la fin de la période d'entreposage, les paramètres de qualité mesurés étaient la présence de tuniques translucides, la grosseur du collet et la rétention des pelures. Des analyses de variance (modèles linéaires mixtes) ont servi à déterminer si la fertilisation affectait ces paramètres. Des tests de comparaison de moyennes ont permis de préciser les conclusions au besoin.

2. FERTILISATION AZOTÉE

2.1 Portrait et représentativité des données

Les propriétés de la couche de sol de surface (0-20 cm) pour les essais N de l'oignon espagnol sont résumées au Tableau 9. Les essais N ont été réalisés majoritairement sur des sols de textures moyennes (23 %) et grossières (66 %). Seulement deux sites, soit 11 % du jeu de données (27 observations), étaient de texture fine (G1). Ce faible nombre d'observations en sols G1 constitue une lacune notable de représentativité du jeu de données qui limitera l'analyse pouvant être faite de la réponse à la fertilisation azotée dans ce type de sols. Toutes textures confondues, les sols de 62 % des blocs avaient un pH entre 5,9 et 7,0. Selon le CRAAQ (2010), un pH de 6 serait optimal pour la bonne croissance de cette culture. Bien que 38 % des blocs avaient un pH > 7,0, les sols présentaient tous un pH situé dans l'intervalle optimal de disponibilité de l'azote dans les sols minéraux (Brady, 1990). Les deux essais en sols G1 avaient des teneurs en MO principalement comprises entre 4 et 5 %. Dans les sols G2 et G3, les teneurs en MO du sol ont varié de 1,3 à 4,2 %, avec 91 % des blocs ayant une teneur en MO inférieure à 4 %. Finalement, 82 % des blocs avaient une teneur en N-NO₃ (0-30 cm) à la transplantation de moins de 10 ppm, ce qui suggère un potentiel de la culture à répondre à la fertilisation azotée.

Tableau 9. Répartition des blocs des essais N de l'oignon espagnol pour différentes classes de propriétés de sol après la validation des données

pH _{eau} ¹	Blocs (%)	MO _{PAF} (%) ²	Blocs (%)		N-NO ₃ (ppm) ³	Blocs (%)	Groupe de textures ⁵	Blocs (%)
			G1	G2-G3				
≤ 5,8	0	< 2	0	6	≤ 5	40	G1	11
5,9 – 7,0	62	2 – 3	0	28	5 – 10	42	G2	23
> 7,0	38	3 – 4	15	57	10 – 15	4	G3	66
-	-	4 – 5	85	9	> 15	8	-	-
-	-	> 5	0	0	nd ⁴	6	-	-

¹ Le pH du sol optimal pour la betterave potagère est de 6,3 au Québec (CRAAQ, 2010) et de 6,8 à 7,8 en Ontario (MAAARO, 2011).

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

³ Nitrate mesuré au semis dans la couche de sol 0-30 cm.

⁴ Non disponible.

⁵ G1 : sols à texture fine ; G2 : sols à texture moyenne ; G3 : sols à texture grossière.

2.2 Détermination des doses agronomiques optimales

2.2.1 Recherche d'indicateurs de fertilité du sol

Plusieurs variables reconnues dans la littérature scientifique peuvent influencer la réponse des cultures à la fertilisation azotée et ainsi devenir des indicateurs de prédiction de la fertilité des sols. Le potentiel de plusieurs indicateurs à expliquer la réponse de l'oignon espagnol à la fertilisation a donc été testé avec le test de Cate-Nelson (Cate et Nelson, 1971) : la teneur en nitrate du sol (N-NO₃; 0-30 cm) à la transplantation, la teneur en matière organique du sol (MO_{PAF}; 0-20 cm) et la teneur en argile du sol (0-20 cm). Lorsque possible, ces indicateurs ont été également testés à l'intérieur des groupes de textures de sols G1, G2 et G3. Pour alléger la présentation des résultats, seuls les tests dont la valeur de *P* est inférieure à 0,12 sont présentés (Tableau 10). Les modèles ont été sélectionnés afin de maximiser leur sensibilité, leur spécificité et leur précision, en plus de

présenter un rendement relatif (RRel) supérieur à 70 %. Les valeurs critiques obtenues sont ensuite utilisées pour les analyses de variance en tant que seuils de réponse agronomique.

Les potentiels indicateurs de fertilité du sol, les seuils de réponse à la fertilisation azotée, ainsi que les paramètres statistiques des tests de Cate-Nelson sont présentés au Tableau 10. Une très bonne précision a été obtenue en général pour les indicateurs considérés. Parmi les indicateurs testés, le rapport C/N, les teneurs en MO_{PAF} et en N-NO₃ du sol se sont avérés être les principaux indicateurs potentiels de prédiction de la fertilité. Dans les sols G1, en raison du faible nombre d'observations, aucun seuil de réponse n'a pu être déterminé.

Tableau 10. Valeurs critiques des indicateurs de sol significatifs selon les tests de Cate-Nelson pour les essais N de l'oignon espagnol

Indicateur de sol	Groupes de textures ²	N ³	Valeur critique	RRel ⁴ (%)	Sensitivité	Spécificité	Précision	P
N-NO ₃ au semis (ppm ; 0-30 cm)	G1, G2, G3	40	6,3	70	0,63	1,00	100	< 0,001
	G2, G3	37	5,1	72	0,68	0,75	85	0,032
	G3	28	7,2	70	0,60	1,00	100	0,008
Matière organique (%) ¹	G1, G2, G3	43	3,4	86	0,88	0,70	64	< 0,001
	G2	12	3,4	86	0,88	0,75	88	0,067
	G3	28	3,0	76	0,82	0,65	60	0,024
	G2, G3	40	3,0	72	0,81	0,69	85	0,004
Rapport C/N	G1, G2, G3	43	12,0	81	0,55	0,87	79	0,008

¹ La matière organique a été déterminée par la méthode par perte au feu.

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

³ N : Nombre d'observations.

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

2.2.2 Effet de la dose d'azote sur le rendement vendable

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 rapports de rendements (ROM) plutôt que les rendements absolus. Sur les graphiques en forêt, les ROM se situant à droite de la ligne rouge (ROM > 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 ROM à gauche de cette ligne (ROM < 1) témoignent d'une diminution de rendement. Comme mentionné dans la section 1.8.2, des comparaisons multiples de moyennes permettent de sélectionner le meilleur traitement. De plus, en absence de différences significatives entre les traitements, les intervalles de confiance à 90 % permettent de déterminer si l'augmentation de rendement obtenue pour un traitement donné est numériquement différente en comparaison du témoin.

Les résultats des ANOVA des essais N sont présentés à la Figure 5. En premier lieu, une ANOVA a été effectuée sans indicateur de classe de fertilité en considérant l'ensemble des observations (modèle A). En second lieu, les ANOVA ont été effectuées à l'intérieur des groupes de textures (modèle B). En dernier lieu, les ANOVA ont été effectuées de part et d'autre des seuils significatifs de MO_{PAF} déterminés par le test de Cate-Nelson (modèle C), lesquels ont été arrondis au dixième afin d'alléger la présentation des résultats. Seuls les résultats des ANOVA permettant l'interprétation de la réponse de la culture à l'engrais sont présentés dans le présent rapport. Parmi les indicateurs de fertilité de sol considérés et s'avérant significatifs lors du test de Cate-Nelson (section 1.8.1), seule la teneur en MO_{PAF} a été retenue puisqu'elle permettait d'établir de meilleures VSRF. De plus, la MO_{PAF} fait

partie des analyses routinières réalisées par les laboratoires commerciaux, n'entraînant alors aucun frais supplémentaire pour les entreprises agricoles.

Dans l'ensemble, l'oignon espagnol a montré une faible réponse à la fertilisation azotée. Les résultats du modèle sans indicateur (A) n'ont démontré aucune différence entre les traitements de fertilisation azotée, suggérant que la plus petite dose testée (40 kg N/ha) a été suffisante pour couvrir les besoins de la culture ($P = 0,519$). Cependant, les gains de rendements associés à l'application de cette dose sont importants, en moyenne de 16 %, et variant entre 9 et 24 % en regard des intervalles de confiance. De même, l'analyse des résultats du modèle B, par groupes de texture de sols, indique qu'il n'y a aucune différence statistique entre les traitements pour les sols G2-G3 (Figure 5B). À titre indicatif, l'analyse des sols G1 est aussi présentée, indiquant également une absence de différence entre les différentes doses de fertilisation. Cependant, très peu de données étant disponibles (deux sites, 4,0 et 4,5 % de MO), il est impossible de conclure sur la réponse de la culture dans cette catégorie de sol.

Enfin, les résultats des analyses tenant compte de la teneur en MO des sols G2 et G3 ont montré que l'ampleur de réponse de la culture différait de part et d'autre du seuil agronomique de réponse de 3,0 %, permettant de distinguer deux classes de fertilité des sols (Figure 5, modèle C). Sous ce seuil, la dose de 80 kg N/ha donne le rendement agronomiquement optimal ($P = 0,084$; $N = 65$), pour des gains allant de 23 à 50 % avec une moyenne de 37 %. À l'opposé, des recommandations en N plus élevées de l'ordre de 120 à 140 kg/ha sont rapportées dans la revue de littérature de Khokhar (2019). Au-delà du seuil de 3,0 % de MO, les gains de rendement étaient relativement faibles et similaires entre les différentes doses de N appliquées. Ainsi, un rendement optimal a été atteint avec un apport minimal de N, soit 40 kg/ha, pour un gain de rendements moyen de 6,5 % et ayant varié de -1 à 14 %.

En raison de son système racinaire superficiel et peu développé, l'oignon présente une faible efficacité d'utilisation des éléments nutritifs (Khokhar, 2019; Leblanc, 2004). Dans le cadre des essais du PSEF, l'azote a été fractionné en deux ou trois apports, en plus d'être appliqué en bande. Cela pourrait favoriser une bonne utilisation de l'élément nutritif par la plante, faisant ainsi diminuer la dose agronomique optimale. Or, actuellement au Québec, les engrais sont appliqués à la volée, ce qui diminue leur efficacité d'utilisation. L'apport des engrais à la volée, surtout sans fractionnement, pourrait nécessiter un ajustement des doses en vue de combler les pertes de N et d'assurer une nutrition suffisante de la culture. Le fractionnement des doses d'azote est également nécessaire pour augmenter l'efficacité d'utilisation du N des engrais par la plante, particulièrement dans les sols irrigués fréquemment, où les risques de lessivage du nitrate peuvent être plus élevés.

Parmi les 18 essais d'azote réalisés, 12 étaient irrigués, 5 étaient non irrigués et l'information était manquante pour un site. Afin de tenir compte de l'effet de l'irrigation sur l'utilisation de l'azote apporté à la culture par la fertilisation, l'existence d'une interaction entre les deux facteurs (irrigation et dose de N) a été vérifiée au préalable. Les résultats des analyses statistiques n'ont toutefois montré aucune interaction significative entre la dose optimale de N et la présence ou non d'irrigation (données non présentées). Ainsi, ce facteur (irrigation) n'a pas été considéré aux fins des analyses statistiques sur la détermination des doses optimales.

Enfin, tel que mentionné dans la section 1.6.2, l'effet du précédent cultural sur les besoins en N de l'oignon espagnol n'a pas pu être adéquatement vérifié puisque, les précédents culturaux ont été répertoriés à un nombre insuffisant de sites pour conduire une analyse, à l'exception du seigle et du brocoli. Les résultats des analyses suggéraient que les sites ayant un précédent de seigle tendaient à répondre à la fertilisation azotée ($P = 0,077$), pour une dose optimale de 80 kg N/ha. Toutefois, les quatre sites dont le précédent cultural est le seigle se situaient tous dans la région de Lanaudière et trois d'entre eux présentaient un taux de MO inférieur au seuil de réponse de 3,0 %. Il y a donc présence d'un effet confondant qui empêche de conclure à un effet du précédent de seigle. Enfin, les sites ayant un précédent cultural de brocoli n'ont montré aucun effet de la fertilisation azotée ($P = 0,21$). Cependant, comme pour le seigle, il y a présence d'un effet confondant puisque les quatre sites concernés se situaient en Montérégie et avaient un taux de MO supérieur au seuil de réponse de 3,0 %.

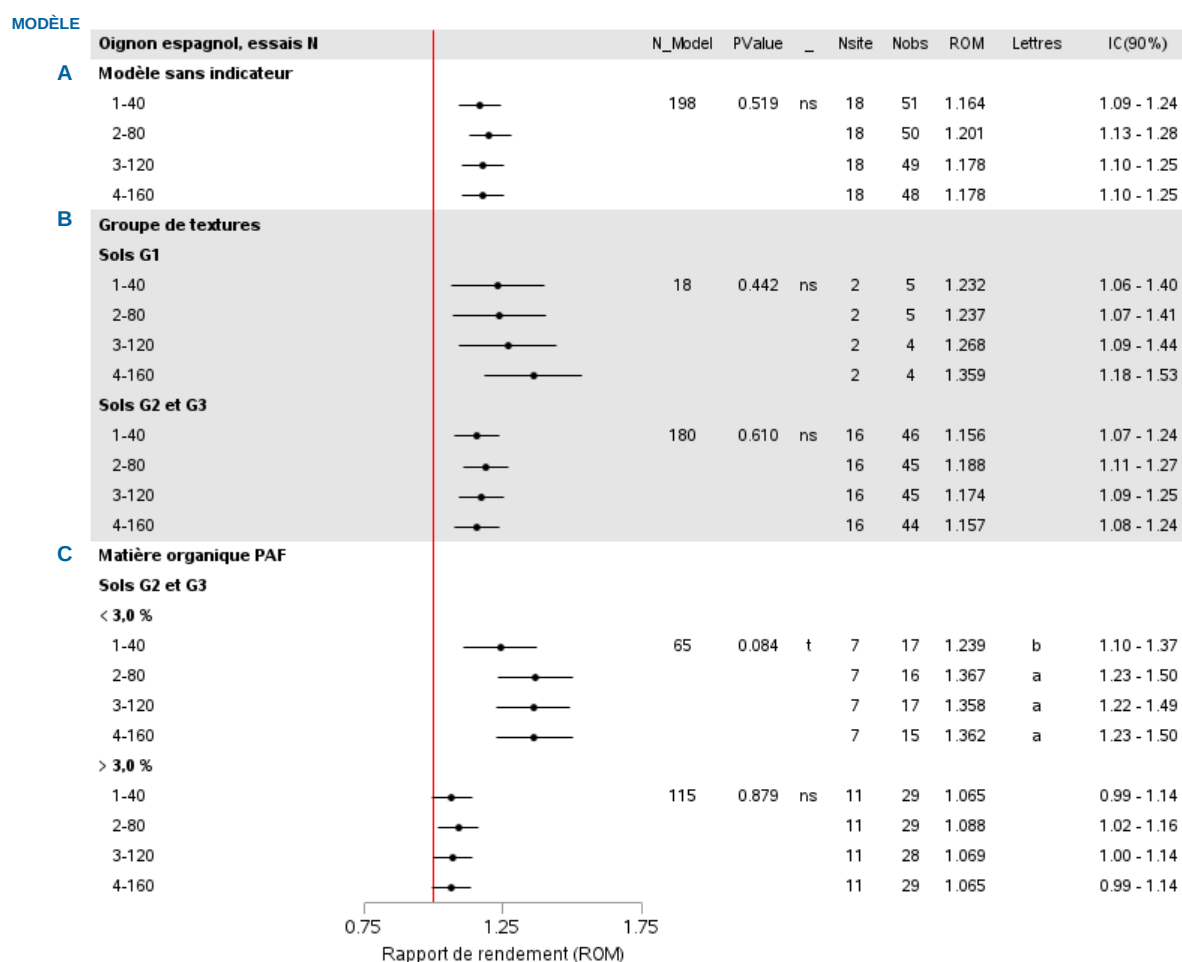


Figure 5. Résultats des analyses de variance sur la réponse de l'oignon espagnol aux doses croissantes d'azote.

G1 : sols à texture fine ; G2 : sols à texture moyenne ; G3 : sols à texture grossière ; 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 $P < 0,12$. La matière organique a été déterminée par la méthode par perte au feu.

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

2.2.3.1 Calibres des oignons à la récolte

À la récolte, les bulbes d'oignon étaient séchés puis classés dans des catégories permettant d'évaluer leur calibre. Comme la taille des oignons fait partie des exigences liées au marché, il est primordial d'évaluer l'effet de la fertilisation azotée sur les calibres obtenus. Actuellement, les calibres acceptés en contexte de production québécoise pour l'oignon espagnol sont de 2 ¼ po et plus (voir Tableau 8 pour tout détail concernant les calibres). Dans le cadre des analyses, les oignons ayant un diamètre supérieur à 3 po (jumbos, colossaux et super colossaux) ont été considérés comme étant les plus recherchés. Les ANOVA ont donc été effectuées en considérant la somme des rendements obtenus pour ces trois catégories. En raison du faible nombre de données collectées dans les sols du groupe de texture G1 et l'incapacité d'établir des valeurs de référence, les résultats obtenus pour cette catégorie de sol ne sont pas présentés dans le présent rapport.

Les données présentées à la Figure 6 montrent qu'en général, les calibres d'oignons vendables variaient de gros à colossaux, avec une faible proportion d'oignons de calibre moyen. Indépendamment de la dose de N appliqué, les oignons jumbos représentaient la plus grande proportion des récoltes. Dans les sols des groupes de textures G2 et G3 ayant moins de 3,0 % de MO, la fertilisation azotée a affecté très significativement la grosseur des bulbes ($P < 0,001$). Les résultats montrent que les proportions totales d'oignons de calibres jumbos et colossaux avaient tendance à se stabiliser à partir de l'apport de la dose de 80 kg N/ha. Cette observation concorde avec les résultats des analyses de variances (voir section 2.2.2) selon lesquels l'apport de 80 kg N/ha serait suffisant pour l'obtention du gain de rendement optimal dans les sols de moins de 3 % de MO. L'augmentation de la dose de N a mené à une augmentation des oignons de calibres colossaux et jumbos, au détriment de ceux de calibres moyens et gros. La proportion combinée des calibres jumbos et colossaux est passée de 52 à 83 % pour les doses respectives de 0 et 160 kg N/ha. Toutefois, en dépit de la relation existante entre la grosseur des bulbes et la fertilisation azotée, de très faibles pourcentages d'oignons super colossaux ont été obtenus, même avec l'application de la plus forte dose testée (< 1 %, non visibles sur la figure). De même, de très faibles pourcentages d'oignons de petits calibres ont été obtenus (moins de 3 et 1 % de part et d'autre du seuil de 3,0 % de MO ; non visibles sur la figure). Les travaux de Buckland et al. (2013) ont rapporté un effet de la fertilisation azotée sur les proportions d'oignons de calibres jumbos, alors qu'aucun effet n'a été observé dans les autres catégories. Toutefois, plusieurs autres facteurs tels que la variété, la taille des transplants, la densité et l'uniformité de la plantation, le régime d'irrigation ainsi que la préparation et le type de sols peuvent également influencer les calibres obtenus à la récolte (Boyhan et al., 2009; Buckland et al., 2013; Khokhar, 2019; Shock et al., 2012).

Dans les sols dont la teneur en MO se trouve au-delà du seuil de 3 %, la dose de N tendait également à influencer le rendement des calibres de plus de 3 po ($P = 0,088$). Les résultats indiquent en effet que, bien que les rendements en oignons de plus de 3 po augmentent avec la dose, seuls les apports de 0 et de 40 kg N/ha diffèrent de la dose 160 kg/ha. Indépendamment de la quantité de N apportée (incluant le témoin), les oignons de calibres jumbos ont représenté entre 74 et 78 % de la récolte.

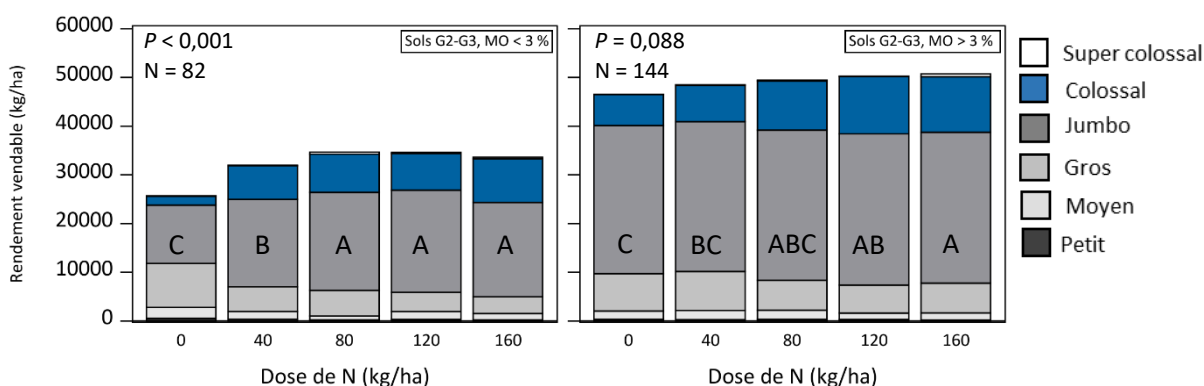


Figure 6. Effet de la dose de N sur les calibres de l'oignon espagnol à la récolte dans les sols des groupes de textures G2 et G3 de part et d'autre du seuil de matière organique. Les résultats des analyses statistiques (LSD $P < 0,1$) présentent l'effet des doses d'azote sur la somme des rendements obtenus pour les oignons ayant un diamètre de 3 po et plus (calibres jumbo, colossal et super colossal uniquement). N : Nombre d'observations.

2.2.3.2 Pertes à la récolte

La mauvaise gestion de la fertilisation des sols peut représenter une importante source de pertes de rendements à la récolte et ainsi entraîner des pertes économiques. En raison du faible nombre de données collectées dans les sols du groupe de texture G1, seuls les résultats obtenus pour les sols G2-G3 font l'objet de cette section. Ceux-ci sont présentés à la Figure 7.

Les résultats des analyses n'ont montré aucun effet significatif des doses d'azote sur les pertes de rendements mesurées à la récolte ($P = 0,86$). Bien qu'aucune interaction significative ne soit détectée entre les doses et la teneur en MO du sol ($P = 0,87$), les données ont été analysées séparément de part et d'autre du seuil de 3 % de MO, afin de mieux interpréter les résultats en regard des VSRF. Les pertes de rendement enregistrées à la récolte ont varié en moyenne de 0,9 à 7,8 % selon la dose de N appliqué et la teneur en MO du sol. Considérant l'ensemble des données, les principales causes de pertes à la récolte ont été la pourriture bactérienne et la pourriture du collet (données non présentées). Les données de la Figure 7 illustrent que les pertes de rendements à la récolte sont plus faibles dans les sols ayant moins de 3,0 % de MO (0,9 à 3,4 % en dessous du seuil vs. 7,0 à 7,8 % au-dessus). Dans ces deux classes, les pourcentages de pertes les plus élevés ont été enregistrés avec les traitements témoins. L'écart entre les pertes dans le traitement témoin et les traitements fertilisés est plus grand dans les sols ayant moins de 3,0 % de MO.

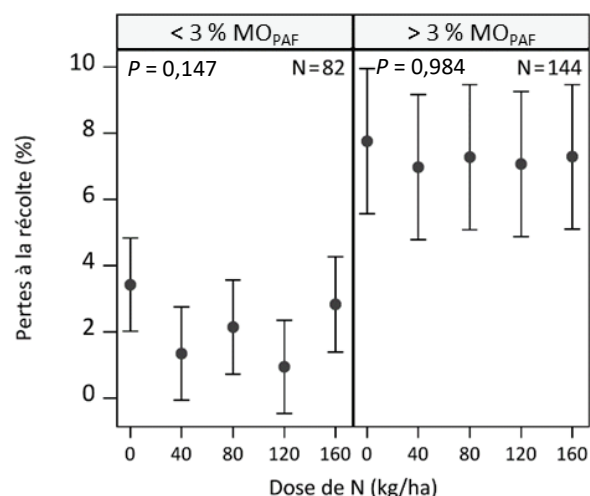


Figure 7. Effet de la dose de N sur les pertes d'oignons espagnols à la récolte selon la teneur en matière organique des sols G2 et G3. Les données présentées considèrent les sols des groupes G2 et G3 seulement. Les moyennes par traitements sont les valeurs estimées du modèle statistique et les barres représentent les erreur-types. N : Nombre d'observations.

2.2.3.3 Qualité à la récolte

La qualité des bulbes d'oignons est un facteur déterminant pour la commercialisation, pouvant influencer les pertes de rendements à la récolte et à l'entreposage. Ainsi, l'effet de la fertilisation azotée sur l'occurrence des cœurs doubles, de la fusariose, de la pourriture bactérienne et de la pourriture du collet a été mesuré. Les résultats obtenus, dans l'ensemble des groupes de textures, sont présentés à la Figure 8. Les pourcentages de parcelles ayant été touchées par un problème quant à la qualité des bulbes (au moins un oignon affecté sur cinq) variaient de 6 à 14 %, de 6 à 12 % et de 0 à 6 % pour la pourriture bactérienne, la pourriture du collet et la fusariose, respectivement. Quant à la présence des cœurs doubles, les pourcentages de parcelles atteintes variaient de 14 à 33 % pour les doses respectives de 80 et 160 kg N/ha. Parmi les quatre critères de qualité évalués, la présence des cœurs doubles a été la plus fréquente. L'analyse des données n'a toutefois pas permis d'établir une relation significative entre les problèmes de qualité observés à la récolte et la fertilisation azotée.

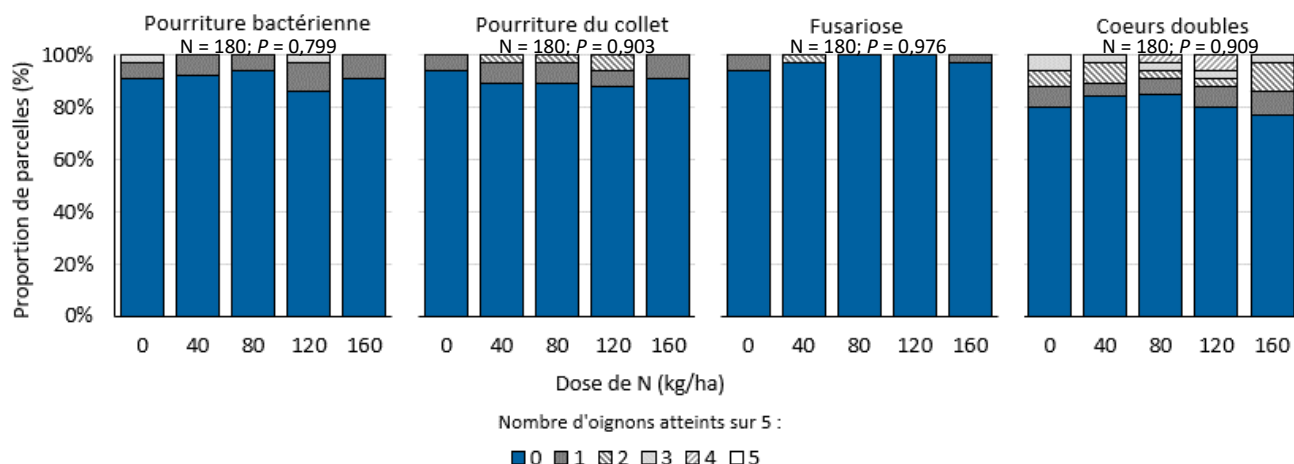


Figure 8. Effet de la dose de N sur la qualité de l'oignon espagnol à la récolte. L'évaluation de la qualité a été réalisée sur un échantillon de 5 oignons de catégorie jumbo tranchés. Nombre d'observations : 180.

2.2.3.4 Pertes suivant l'entreposage

La bonne conservation des oignons en entrepôt dépend grandement de la variété cultivée et des conditions telles que la température et l'humidité relative. La maturité à la récolte, le séchage des feuilles et la fermeture du collet sont également déterminants pour la conservation. Dans le cadre des essais de fertilisation, les oignons espagnols ont été entreposés suivant la récolte et lorsque possible, dans les mêmes conditions que celles du producteur chez qui l'essai a été réalisé. Lorsque les essais étaient réalisés en station de recherche, des conditions similaires aux conditions commerciales ont été reproduites. Toutefois, des conditions d'entreposage inadéquates ont parfois mené à des pourcentages de pertes hors-normes (ex. : > 80 % de rejet) à certains sites, entraînant leur exclusion du jeu de données. Suivant l'analyse exploratoire, 70 % de l'ensemble des données validées des essais N ont également eu des données d'entreposage servant pour l'analyse en entreposage, 24 % avaient des données d'entreposage considérées aberrantes (ex. mauvaises conditions d'entreposage), tandis que 6 % n'ont pas été évalués pour la conservation en entrepôt en raison de la non-disponibilité de structures de stockage sur le site. Étant donné le nombre réduit d'observations, les données ont été analysées sans tenir compte du groupe de textures ou de la teneur en MO_{PAF} du sol.

Les données présentées à la Figure 9 montrent que les pertes après l'entreposage ont varié en moyenne de 6,9 % (témoin) à 11,4 % (80 kg N/ha). À l'instar de ce qui a été observé à la récolte, les principales causes de déclassement suivant l'entreposage étaient la pourriture bactérienne et la pourriture du collet (données non présentées). Les résultats des analyses ont permis d'observer un effet significatif des doses d'azote sur les pertes de rendement mesurées à l'entreposage ($P = 0,048$). Des pertes significativement supérieures du témoin ont été enregistrées dès l'application de la plus petite dose testée (40 kg N/ha). D'autres études rapportent que l'excès d'azote peut augmenter les pertes de l'oignon à l'entreposage (Khokhar, 2019). Toutefois, à de si faibles apports (40 kg N/ha), aucun effet négatif sur la conservation en entrepôt n'était attendu. Buckland et al. (2013) n'ont observé aucune relation entre la fertilisation azotée et les pertes de rendement à l'entreposage. Les pertes enregistrées pourraient s'expliquer en partie par le fait que contrairement à l'oignon jaune, l'oignon espagnol est cultivé davantage pour le marché frais, traduisant une faible capacité de conservation.

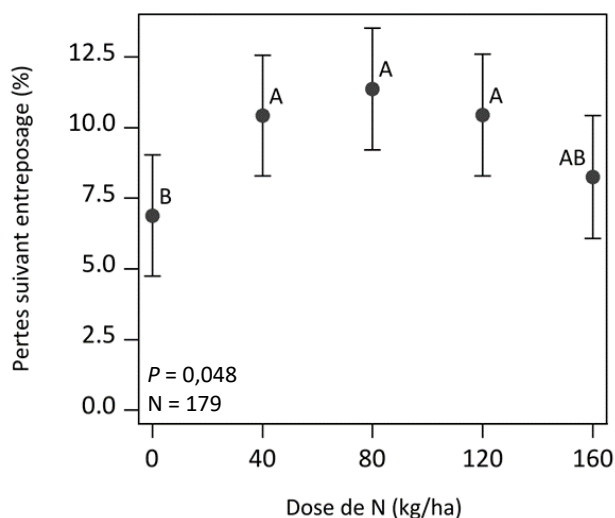


Figure 9. Effet de la dose de N sur les pertes d'oignons espagnols à l'entreposage. Les lettres indiquent les différences significatives (LSD $P < 0,1$) entre les différents traitements. N : Nombre d'observations.

2.2.3.5 Qualité suivant l'entreposage

À la suite de l'entreposage des oignons, ceux-ci ont été évalués pour la grosseur du collet, la rétention des pelures et la présence de tuniques translucides. Les résultats sont présentés à la Figure 10. La fertilisation azotée n'a eu aucun effet sur la grosseur du collet ($P = 0,82$), la rétention des pelures ($P = 1,00$) et sur la présence de tuniques translucides ($P = 0,99$). En général, les oignons ont eu de gros collets dans 50 % des cas en moyenne (53-67 %), indépendamment de la dose de N considérée. Ce résultat est cohérent avec ceux d'autres études, dans lesquelles il est rapporté que la fertilisation azotée n'affecte pas la grosseur du collet (Abdissa et al., 2011; Amare, 2020). En effet, dans une revue de littérature, Amare (2020), rapporte que la grosseur du collet serait un trouble physiologique influencé davantage par la saison, le site et le cultivar, que par la fertilisation en éléments nutritifs. De ce fait, dans le cadre de cette étude, l'obtention de gros collets pourrait s'expliquer par des causes autres que la fertilisation azotée des sols. À l'opposé, une bonne rétention des pelures a été observée dans tous les traitements. Quant à la présence de tuniques translucides, hormis la dose de 40 kg N/ha, les données semblaient indiquer que leur occurrence tendait à diminuer avec l'augmentation des doses de N. Toutefois, les résultats des analyses statistiques n'ont montré aucun effet significatif de la fertilisation azotée qui aurait permis de confirmer cet effet.

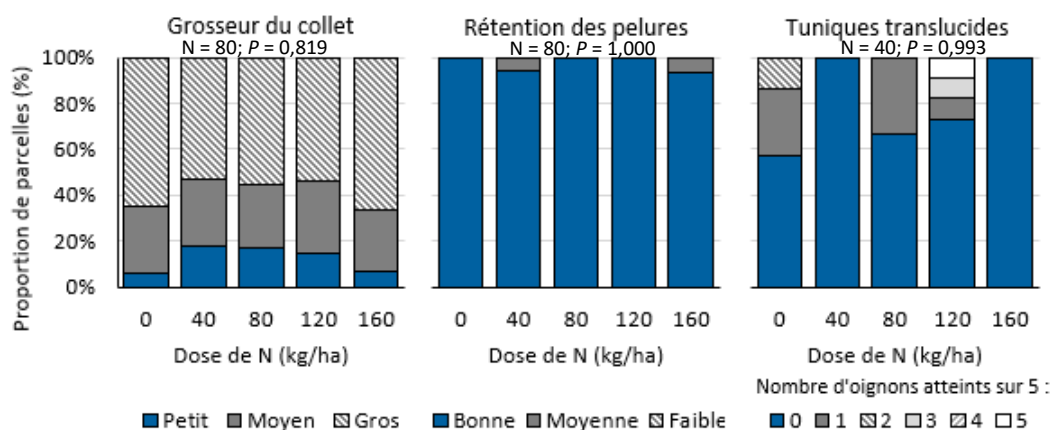


Figure 10. Effet de la dose de N sur la qualité de l'oignon espagnol à l'entreposage. L'évaluation de la qualité a été réalisée avec un échantillon de 5 oignons de catégorie jumbo tranchés. Par exemple, suivant l'entreposage, 57 % des parcelles témoins (0 kg N/ha) n'ont eu aucune présence de tuniques translucides, 29 % ont eu 1 oignon sur 5 ayant des tuniques translucides et 14 % ont eu 2 oignons ayant des tuniques translucides. N : Nombre d'observations

2.3 Diagnostic nutritionnel et exportations en azote

Les concentrations et les exportations de N de l'oignon espagnol en fonction du diagnostic nutritionnel sont présentées au Tableau 11. Toutes les valeurs présentées dans cette section considèrent les bulbes seulement sans tenir compte de l'analyse du feuillage (voir la section 1.8.3).

La population de tête (population à haut rendement et à l'équilibre nutritionnel) a eu une concentration moyenne en N de $0,98 \pm 0,20$ kg/tonne humide. La concentration moyenne obtenue dans la présente étude est inférieure à celle de 1,4 kg/t humide (84 % d'humidité) présentée actuellement dans le guide du CRAAQ (2010). De même, les valeurs obtenues sont bien inférieures au seuil de suffisance de 4,5 % considéré au Michigan

(Warncke et al., 2004), lequel correspond à une concentration approximative de 2,27 kg/tonne humide (humidité non spécifiée). L'analyse plus approfondie de données démontrent que les concentrations d'azote dans les tissus de la plante peuvent varier grandement selon les cultivars. En effet, selon les cultivars, les concentrations en N variaient de 0,90 à 2,77 kg/tonne humide. Les plus fortes concentrations ont été obtenues pour les cultivars Rancheros et Valero, tandis que ceux T-489 et SV4643NT F1 ont eu les plus faibles valeurs (données non présentées). Cette différence quant à la concentration en N entre les études pourrait probablement s'expliquer par des différences de cultivars. Elle pourrait également être due à l'obtention de très hauts rendements pour la population de tête dans cette étude (rendement total moyen de 101 727 kg/ha), ayant pour effet la dilution de l'azote dans les tissus de la plante.

Les exportations moyennes en N de la population de tête, en considérant les bulbes uniquement, ont été de 100 kg/ha et ont varié entre 74 et 128 kg/ha (Tableau 11). Dans une revue de littérature sur l'oignon espagnol, Khokhar (2019) rapporte une exportation en N de 108 kg N/ha. Pire et al. (2001) fait aussi état d'une exportation similaire de $113 \pm 9,33$ kg N/ha par les bulbes d'oignons. La Figure 11 montre que les exportations en N de l'oignon espagnol ont varié considérablement en fonction des rendements et des cultivars. Cette figure illustre également la grande variation de rendement pour un même cultivar, particulièrement Valero et Delgado où les rendements totaux ont varié de moins de 20 000 kg/ha à plus de 100 000 kg/ha. Cela suggère que des facteurs autres que la fertilisation et les cultivars ont influencé considérablement les rendements et, par conséquent, les exportations en N. Le patron de distribution des points permet de conclure que les différences d'exportations en N entre les cultivars seraient principalement attribuables à de plus grandes productivités plutôt qu'à des variations de la concentration de l'azote dans les bulbes.

Tableau 11. Concentrations et exportations d'azote des oignons espagnols selon le diagnostic nutritionnel

	Humidité		Exportations ^{1, 2}				
	(%)	(kg N/t humide)		(kg N/ha)			
		Moy	Éc-T	Moy	Med	Min	Max
Haut rendement et équilibre nutritionnel (« population de tête »)	90	0,98	0,20	100	99	74	128
Faible rendement et équilibre nutritionnel	88	1,18	0,28	105	104	50	197
Faible rendement et déséquilibre nutritionnel	90	1,65	0,88	54	47	13	127
Haut rendement et déséquilibre nutritionnel	91	1,17	0,30	88	87	82	96

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

² Les valeurs présentées dans ce tableau ont été calculées sur les bulbes seulement et ne tiennent pas compte du feuillage.

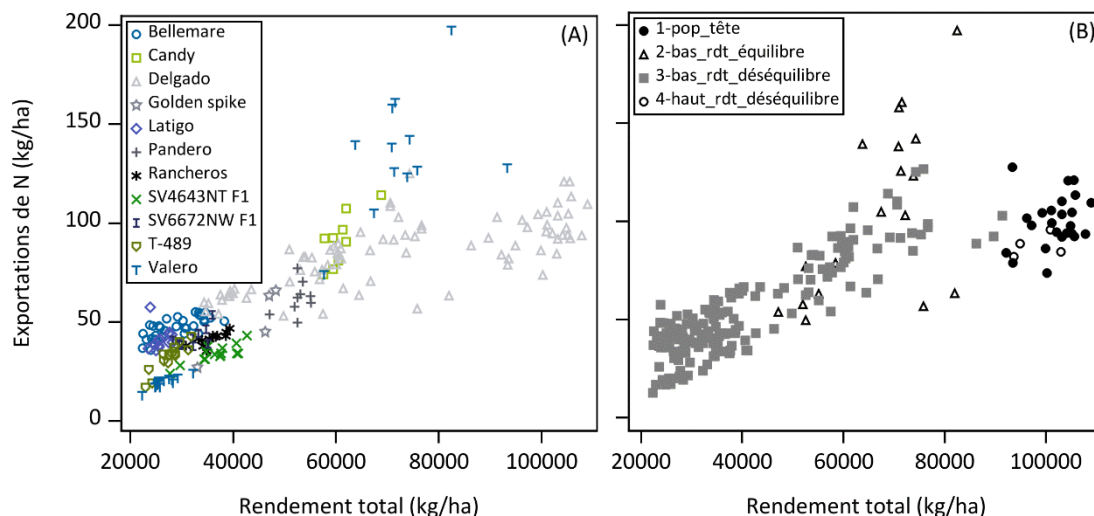


Figure 11. Exportations d'azote de l'oignon espagnol en fonction des rendements selon les cultivars (A) et le diagnostic nutritionnel (B). Les exportations ont été calculées sur les bulbes seulement et ne tiennent pas compte du feuillage.

2.4 Nitrate résiduel 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) résiduel 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 de 1 signifie qu'il n'y a pas de hausse du nitrate dans les parcelles fertilisées, en comparaison au témoin.

Les quantités de nitrate résiduel dans le sol à la suite des essais N sont présentées à la Figure 12. Dans les sols G2-G3, les résultats indiquent que la fertilisation azotée a entraîné une hausse significative des teneurs en nitrate résiduel et que l'ampleur de l'augmentation a varié en fonction de la dose de N appliquée et de la profondeur de sol considérée. Les quantités de nitrate mesurées à la fin des ont été jusqu'à 3,4 fois supérieures à celles du témoin, notamment avec l'apport de 160 kg N/ha. Les résultats des analyses ont montré que l'azote dans les sols G2-G3 tendait à augmenter ou était significativement supérieur à la quantité du témoin dès l'application de la plus petite dose testée aux deux profondeurs de sols.

Selon les résultats des ANOVA sur le rendement vendable présentés à la section 2.2.2, les doses optimales de N pour l'oignon espagnol varient de 40 à 80 kg N/ha selon la teneur en MO des sols G2 et G3. L'application de ces doses pourrait donc mener à une augmentation du nitrate dans le sol, et par conséquent, à une augmentation des pertes dans l'environnement. L'oignon présente une faible efficacité d'utilisation de l'azote en raison de son système racinaire superficiel et peu développé (Brewster et Butler, 1989; Khokhar, 2019). L'analyse des données de la présente étude montre également un faible coefficient d'utilisation apparent de l'azote par la culture, soit en moyenne de 20 % pour la dose de 40 kg/ha et de 22 % pour celle de 80 kg/ha (données non présentées). Ces

valeurs restent toutefois surprenantes, considérant que le coefficient d'utilisation de l'azote par la plante diminue généralement avec l'augmentation des doses. Selon Brewster et Butler (1989), la faible efficacité d'utilisation de l'azote par la plante pourrait résulter en une hausse considérable des teneurs en nitrate résiduel dans les sols après la récolte, ce qu'appuient également les présents résultats. Toutefois, l'utilisation d'un seuil de matière organique modulant la dose recommandée selon l'analyse de sol pourra permettre d'atténuer ce risque.

Quant aux sols du groupe G1, il est important de noter que seulement deux essais de fertilisation N étaient disponibles. Les résultats sont donc présentés à titre indicatif seulement. Les quantités de nitrate mesurées à la fin des expérimentations ont été jusqu'à 6,6 fois plus grandes avec les fortes doses qu'avec le témoin non fertilisé. Hormis les deux plus petites doses testées dans la couche 30-60 cm, dans les sols G1, l'effet de la fertilisation en N sur l'augmentation de la teneur en nitrate du sol a été significatif pour tous les traitements.

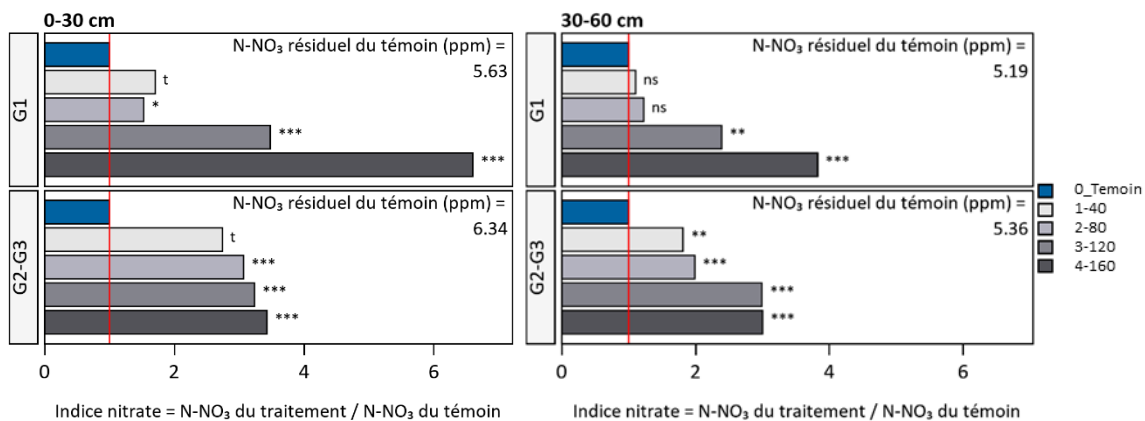


Figure 12. Indices nitrate des traitements d'oignons espagnols aux profondeurs 0-30 et 30-60 cm dans les sols G1 vs G2-G3, au moment de la récolte. Les données présentées considèrent uniquement les essais du PSEF. La statistique présentée à droite des barres horizontales indique si le traitement est 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 ; *** : $P < 0,001$. Sols G1 : $P_{0-30cm} = 0,004$ et $P_{30-60} < 0,0001$; Sols G2-G3 : $P_{0-30cm} < 0,0001$ et $P_{30-60} < 0,0001$.

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

L'oignon dispose d'un système racinaire superficiel, peu ramifié et peu pourvu en poils absorbants (Brewster et Butler, 1989; Khokhar, 2019; Leblanc, 2004), ce qui cause une efficacité de prélèvement de éléments nutritifs relativement faible, et par le fait même, une faible utilisation de l'azote. En effet, dans le cadre des essais, les coefficients d'utilisation de l'azote ont été de 13 à 22 %, selon les doses et calculés sur les bulbes uniquement. Ainsi, la prudence dans la planification des apports en éléments nutritifs est indispensable. En effet, comme l'oignon puise ses éléments nutritifs essentiellement sur les 25 premiers cm de sol (Reid et Morton, 2019), il présente davantage de sensibilité au lessivage du nitrate dans le sol. Par conséquent, les quantités d'engrais apportées, le nombre de fractionnement, leur période et leur mode d'application révèlent d'une importance capitale pour une optimisation de l'efficacité d'utilisation des engrais par la plante.

Deux niveaux d'information ont été considérés afin de structurer les recommandations en azote de l'oignon espagnol, soit (i) les groupes de textures des sols et (ii) la teneur en matière organique du sol.

Dans les sols du groupe de textures G1, l'établissement d'une VSRF a été impossible en raison de la faible quantité de données disponibles. Dans les sols des groupes de textures G2 et G3, deux classes de fertilité ont été distinguées de part et d'autre d'un seuil de MO de 3,0 %. Dans la première classe de fertilité regroupant les sols ayant une teneur en MO inférieure ou égale à 3,0 %, la dose de 80 kg N/ha est recommandée. Dans la seconde classe de fertilité, regroupant les sols dont la teneur en MO est supérieure à 3,0 %, la recommandation est de 40 kg N/ha. Comme testé dans la majorité des essais, la dose de 80 kg/ha est fractionnée en deux apports en vue de diminuer les pertes par lessivage et d'optimiser les prélèvements par la plante (Tableau 12). Quant à la dose de 40 kg N/ha, elle a été testée en un seul apport à la transplantation.

Dans le cas de l'azote, aucun ajustement n'a été apporté aux VSRF sur la base des résultats des analyses complémentaires : les paramètres de qualité évalués à la récolte et à l'entreposage n'étaient pas influencés par les doses de N, tandis que les pertes de rendement mesurées à la récolte et à l'entreposage ne subissaient pas d'augmentations suivant l'application des doses agronomiques optimales déterminées.

Enfin, les résultats des analyses concernant la teneur du sol en nitrate résiduel à la fin du cycle cultural ont démontré que des augmentations des teneur en N-NO_3 étaient à prévoir suivant l'application du N, et ce, même avec les petites doses testées dans les sols de textures moyennes à grossières. L'utilisation d'un seuil de matière organique après lequel la dose recommandée diminue pourra atténuer ce risque. En raison du faible taux d'efficacité d'utilisation de l'azote par l'oignon, il est important de souligner le fait que dans le cadre de ces essais, l'azote a été fractionné en deux ou trois apports en plus d'être appliqué en bande. Cela diffère de la pratique généralement rencontrée au Québec où les engrais sont appliqués à la volée. Or, l'application des engrais à la volée contribue à une diminution de leur efficacité d'utilisation par rapport à une application en bande, d'autant plus si ceux-ci ne sont pas incorporés. Ainsi, dans le cas où l'application serait faite à la volée et surtout si les engrais sont laissés en surface, un rehaussement des doses proposées à partir des résultats de cette étude pourrait être nécessaire en vue d'assurer une bonne nutrition de la culture. Par exemple, en Pennsylvanie, les recommandations $\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O}$ pour une application à la volée représentent le double (134-179-179; kg N/ha) de celles pour une application en bande (67-90-90; kg N/ha) (Sanchez et al., 2020).

Toutefois, les doses proposées dans le cadre de cette étude (40-80 kg N/ha) sont semblables aux recommandations faites en Pennsylvanie (67 kg N/ha, en bande) et en Nouvelle-Zélande (0-80 kg N/ha selon la teneur en N disponible du sol (Tableau 13). Par ailleurs, les présentes VSRF représentent une diminution par rapport à la dose actuelle de 110 kg/ha proposée au Québec par le CRAAQ (2010; Tableau 13), particulièrement dans les sols ayant une teneur en MO supérieure à 3,0 %. Cependant, la recommandation du CRAAQ (2010) n'est pas spécifique à la culture de l'oignon espagnol. Elle combine plutôt l'ail, le poireau et l'oignon, sans distinction ou information quant au type d'oignon; ce qui pourrait expliquer l'écart entre les résultats de la présente étude et les recommandations du CRAAQ. Les présentes VSRF sont également plus faibles que les intervalles de doses proposées dans les autres provinces canadiennes et ailleurs aux États-Unis.

Tableau 12. Fertilisation azotée de l'oignon espagnol – Valeurs scientifiques de référence en fertilisation

Groupe de textures ¹	Classe de fertilité MO _{PAF} (%) ³	Période d'application	Fractionnement	VSRF ⁴ (kg N/ha)
G2, G3 (G1) ²	≤ 3,0	À la transplantation, incorporé	50	80 ⁵
		Stade 5 - 7 feuilles, incorporé	30	
	> 3,0	À la transplantation, incorporé	-	40 ⁶

¹ G1 : sols à texture fine ; G2 : sols à texture moyenne ; G3 : sols à texture grossière.

² Les sols G1 ont été regroupés avec les sols G2 et G3. Les données en quantité insuffisante ne permettaient pas de créer une classe spécifique à ces sols. Les VSRF ont été déterminées uniquement sur la base des sols G2 et G3, car aucun sol G1 des essais n'avait de teneur en matière organique < 3 %.

³ MO_{PAF} : matière organique déterminée par la méthode par perte au feu.

⁴ VSRF : valeur scientifique de référence en fertilisation.

⁵ Dose agronomique optimale.

⁶ Dose agronomique optimale déterminée sur la base des intervalles de confiance. Dans le cadre de cette étude, les doses de N ont été testées en bande. Ainsi, si l'application des engrais est faite à la volée et surtout si ceux-ci sont laissés en surface, un rehaussement des doses proposées pourrait être nécessaire en vue d'assurer une bonne nutrition de la culture.

Sols G1

Dans les sols du groupe de textures G1, le peu de données disponibles n'a pas permis l'établissement de VSRF. Ainsi, afin de compléter la grille de fertilisation, il est recommandé d'utiliser les VSRF calculées pour les sols de textures G2 et G3 pour ceux de textures G1. Cette recommandation s'appuie sur :

- La consultation des bases de données du PSEF et du PSEFCM pour les cultures maraîchères, dans lesquelles le tiers des sols G1 répertoriés présentait moins de 3 % de MO. Il serait donc inexact de supposer que de tels sols n'existent pas (bien qu'absents des présents essais) et que les besoins sont faibles. En effet, il est probable que les sols moins pourvus en MO nécessiteraient davantage de N.
- Dans les deux essais N réalisés en sol G1 (MO moyenne de 4,0 et 4,5 %), les gains suivant un apport de N étaient élevés, soit en moyenne de 27 % par rapport au témoin.
- De surcroît, une diminution importante de recommandation survient avec l'apport de 40 kg N/ha, en comparaison de l'ancienne recommandation du Québec (110 kg/ha). De même, les recommandations des régions pédoclimatiques similaires suggèrent des doses généralement deux à trois fois supérieures, toutes textures de sol confondues.
- La culture exporte 99 kg N/ha par saison de production.



Ainsi, en l'absence de données en quantité suffisante dans les sols G1, regrouper ceux-ci avec les sols G2-G3 est une approche prudente pour l'atténuation des risques agronomiques et environnementaux.

Application des engrais

Les VSRF de cette étude ont été calculées à partir d'essais réalisés en plein champ où l'azote a été appliqué en bande et fractionné en deux ou trois apports afin de maximiser son utilisation par la plante. Or, l'oignon présente une faible capacité d'utilisation de l'azote en raison de son système racinaire peu développé et peu efficace pour prélever les éléments nutritifs (Brewster, 2008; Khokhar, 2019; Leblanc, 2004). Ainsi, une application des engrais à la volée avant le semis, tel qu'il est d'usage actuellement au Québec, surtout si les engrais sont laissés en surface, peut contribuer à diminuer d'avantage leur efficacité d'utilisation par rapport à une application en bande. Un rehaussement des doses proposées à partir des résultats de cette étude pourrait donc être nécessaire en vue d'assurer un apport d'azote suffisant à la plante lorsque ce mode d'apport est utilisé. De plus, le fractionnement des doses est à prioriser lorsque possible, particulièrement dans les champs fréquemment irrigués, sujets au lessivage de nitrate.

Tableau 13. Comparaison des recommandations en N pour la production d'oignon au Canada et à l'étranger

Provinces/États	Mode et période d'application	Fractionnement	Indicateurs		Dose N (kg/ha)	Source
			Fertilité du sol	Autres		
Québec (CAN)	À la volée avant le semis	Oui	-	-	55	CRAAQ (2010)
	En bande lorsque la plante a 15 cm de hauteur				55	
	Dose totale				110	
Ontario (CAN)		non			110	MAAARO (2011)
Alberta (CAN)	À la volée avant le semis et incorporé	Une partie de l'azote peut être appliqué en saison, jusqu'à la mi-juillet	-	-	110	Alberta Agriculture and Rural Développement (2014)
Michigan (CAN)	En bande au semis/ à la volée et incorporé	oui	-	-	45 / 56-67	Warncke et al. (2004)
	En post levée en un apport à la mi-juillet ou en deux apports au début et à la fin de juin				101-112	
	Dose totale				146-179	
Mid-Atlantic (É-U)	À la volée et incorporé	oui	-	-	56-84	Virginia Cooperative Extension (2018)
	En bande 4-5 semaines après la plantation				28-56	
	Dose totale				84-112	
Nouvelle Angleterre (É-U)	À la volée et incorporé	oui	-	-	90-112	University of Massachusetts Amherst (2021)
	En bande 4-5 semaines après la plantation				56	
	Dose totale				146-168	
Pennsylvanie (É-U)	En bande à la plantation	non	-	-	67	Sanchez et al. (2020)
	À la volée avant la plantation				134	
Nouvelle Zélande	-	oui	N disponible		0-80	Reid et Morton (2019)

Dans le but d'homogénéiser les unités et faciliter les comparaisons, les coefficients suivants ont été utilisés lorsque nécessaire : 1 ppm = 2,24 kg/ha; 1 lb/ac = 1,12 kg/ha; 1 ac = 0,404 69 ha.

3. FERTILISATION PHOSPHATÉE

3.1 Portrait et représentativité des données

La répartition des blocs des essais P de l'oignon espagnol à travers les différentes classes de propriétés de sol (0-20 cm) est présentée au Tableau 14. Les essais P ont été réalisés en majorité sur des sols de textures grossières (G3) (54 %) et moyennes (G2) (25 %), 21 % des essais étant réalisés en sols de textures fines (G1). L'indice de saturation en phosphore (P) ($ISP_1 = [P_{M3} \text{ (ppm)} / Al_{M3} \text{ (ppm)}] \times 100$), un meilleur indicateur agroenvironnemental de la disponibilité en P que le P_{M3} seul (Khiari *et al.*, 2000), était inférieur au seuil de 7,6 % du règlement sur les exploitations agricoles (REA) (MDDEP, 2010) dans 92 % des blocs du groupe G1. À l'opposé, dans les sols des groupes G2 et G3, une faible proportion des blocs (40 %) avait un taux de saturation en P inférieur au seuil critique de 13,1 % du REA, alors que seulement 6 % se situaient dans la partie inférieure de l'intervalle, c.-à-d. sous le seuil de 6,5 %. Près de la moitié des blocs des sols G2 et G3 avaient une saturation en P supérieure à 20 %. Toutes textures confondues, plus de la moitié des blocs (52 %) avaient plus de 150 ppm de P_{M3} , dont 47 % avaient plus de 200 ppm. Cette faible proportion de sites faiblement saturés en P n'est pas adéquate pour une observation complète des possibilités de réponse à la fertilisation et cet aspect doit être considéré dans les étapes ultérieures de décision des recommandations qui seront émises.

Tableau 14. Répartition des blocs des essais P d'oignons espagnols pour différentes classes de propriétés de sol après la validation des données

pH _{eau}	Bloc (%)	ISP ₁ (%) ¹	Blocs (%) G1	ISP ₁ (%) ¹	Blocs (%) G2-G3	P _{M3} (ppm)	Bloc (%)	Groupe de textures ²	Bloc (%)
< 5,8	7	≤ 3,8	67	≤ 6,5	6	< 50	18	G1	21
5,8 – 7,0	61	3,8 – 7,6	25	6,6 – 13,1	34	51-100	30	G2	25
> 7,0	32	7,7 – 15,2	8	13,2 – 20	11	101 – 150	0	G3	54
-	-	> 15,2	0	> 20	49	151 – 200	5	-	-
-	-	-	-	-	-	> 200	47	-	-

¹ ISP₁ : indice de saturation en phosphore = $[P_{M3} \text{ (ppm)} / Al_{M3} \text{ (ppm)}] \times 100$, éléments extraits au Mehlich-3 (Mehlich, 1984).

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

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'ISP₁, le pH_{eau} et la teneur en argile ont été vérifiés avec le test de Cate-Nelson (1971) (voir section 1.8.1). Lorsque possible, ces indicateurs ont été testés à l'intérieur des groupes de textures G1, G2 et G3.

Dans le cadre de ce travail, ni la saturation en P, ni la teneur en P_{M3} ne se sont avérées être de bons indicateurs de prédiction du niveau de fertilité du sol pour l'oignon espagnol. Ainsi, le test de Cate-Nelson n'a pas permis de déterminer des seuils de réponse. La faible proportion de sols d'ISP sous les seuils REA explique probablement en partie ce résultat puisque ceux-ci ont été établis pour minimiser simultanément les risques agronomiques et

environnementaux (CRAAQ, 2010; Khiari *et al.*, 2000). Peu de réponse de la culture est donc attendue au-delà de ces seuils. De ce fait, les seuils environnementaux du REA ont été utilisés afin d'avoir des seuils spécifiques aux groupes de textures et de préciser la réponse de la culture sous et au-dessus de ces seuils. Les analyses de variance ont donc été effectuées en tenant compte des seuils d'ISP de 7,6 % et de 13,1 % dans les sols G1 et G2-G3, respectivement.

3.2.2 Effet de la dose de phosphore sur le rendement vendable

Les résultats des ANOVA sont présentés à la Figure 13 (pour plus d'explications concernant l'interprétation de la figure, consulter la section 2.2.2). Quatre modèles sont présentés : sans indicateur (A) ; selon les groupes de textures (G1, G2 et G3, B) ; selon les seuils d'ISP₁ du REA dans les G1 (C) et les G2-G3 (D).

Parmi les 19 essais sur le phosphore réalisés, 15 étaient irrigués, 3 non irrigués et l'information est manquante pour un site. Tel qu'effectué pour l'azote, afin de tenir compte de l'effet de l'irrigation sur l'utilisation du P apporté à la culture, l'existence d'une interaction entre les deux facteurs (irrigation et dose de P₂O₅) a été vérifiée. L'analyse statistique n'a toutefois montré aucune interaction significative entre la dose optimale de P₂O₅ et la présence ou non d'irrigation (données non présentées). Ainsi, ce facteur (irrigation) n'a pas été considéré aux fins des analyses statistiques sur la détermination des doses optimales.

Les analyses de variance réalisées sur l'ensemble du jeu de données (modèle A, N = 224) n'ont révélé aucune différence entre les traitements ($P = 0,69$; Figure 13), indiquant que la plus petite dose testée a été suffisante pour l'obtention du rendement agronomique optimal. Les gains de rendement associés à l'application de cette dose étaient en moyenne de 4 %, variaient de -2 jusqu'à 10 %. De même, aucune différence significative ($P = 0,22$ à $0,82$) n'a été observée selon les doses de P₂O₅ lorsque les données de chaque groupe de textures de sol ont été analysées séparément (modèle B). Les patrons de réponse de la culture sont similaires, ainsi que les gains moyens à fertiliser. Une étude de Boyhan *et al.* (2007) a également rapporté une absence de réponse de l'oignon à la fertilisation phosphatée. Par contre, d'autres auteurs (Singh *et Singh*, 2000) rapportent que l'apport de 80 kg P₂O₅/ha entraîne une augmentation de la hauteur des plants et du nombre de feuilles par plant, tout en augmentant le poids et la teneur en matière sèche des bulbes.

L'analyse plus détaillée exploitant les seuils REA est présentée aux modèles C et D. Dans le cas du groupe de textures G1 (Figure 13; modèle C), l'analyse n'a été possible que sous le seuil (7,6 % d'ISP₁) puisque la quasi-totalité du jeu de données se situe sous 6,15 % d'ISP₁ (un seul bloc avait un ISP₁ supérieur au seuil, soit 8,5 %). Ainsi, sous le seuil REA, les résultats ont indiqué que la plus petite dose testée (45 kg P₂O₅/ha) était suffisante pour l'obtention du rendement agronomique optimal et procurait un gain de 6 % par rapport au témoin. L'absence de donnée entre 6,15 % et 7,6 % ne devrait ainsi pas être problématique puisque davantage de réponse n'est pas attendue dans cet intervalle que sous 6,15 % d'ISP₁.

Dans les sols G2-G3 (Figure 13; modèle D), la considération du seuil REA de 13,1 % d'ISP₁ n'a pas permis de dégager des réponses différentes de part et d'autre du seuil. Cependant, sous le seuil, aucune donnée n'était disponible pour les sols d'ISP₁ inférieur à 5,0 %, rendant impossible l'étude de la réponse dans les sols les plus faiblement saturés. Or, ces sols sont les plus fixateurs du P en raison du plus grand nombre de sites de fixation disponibles. Ceux-ci forment donc la catégorie la plus susceptible de répondre à la fertilisation phosphatée.

L'absence de réponse mesurée ($P = 0,67$; $N = 71$) concerne donc les sols ayant un ISP_1 entre 5,0 et 13,1 %, où un gain de rendement moyen de 4 % (1 à 9 % de gain) par rapport au témoin a tout de même été obtenu à la suite de l'application de la plus petite dose testée (45 kg P_2O_5 /ha). Les conclusions sont les mêmes au-dessus du seuil REA, où aucune différence significative n'a été obtenue entre les traitements ($P = 0,89$; $N = 101$), pour un gain de rendement moyen de 5,5 % par rapport au témoin, suivant l'application de la plus petite dose (30 kg P_2O_5 /ha).

Dans l'ensemble, bien que la réponse de l'oignon semble limitée suivant l'apport de P, ces résultats commandent la prudence en raison de 1) le très faible nombre d'essais en sols G1, 2) l'absence de sites en sols G2-G3 sous 5 % d' ISP_1 , mais surtout, tel qu'indiqué à la section 3.1, la présence toutes textures confondues d'une majorité (60%) de sols saturés ($ISP_1 > 13,1$ %), dont la moitié sont très saturés (48 %) en P, soit au-delà de 20 % d' ISP_1 . À noter que cela n'a pas empêché de mesurer des gains suivant l'apport de la dose optimale de 45 kg P_2O_5 /ha dans les G1 et G2-G3 sous les seuils REA et de 30 kg P_2O_5 /ha au-dessus du seuil pour les G2-G3. Ainsi, dans l'ensemble, la faible réponse au P enregistrée dans les essais d'oignons espagnols du programme PSEF pourrait être attribuable à des quantités adéquates de P disponible dans les sols.

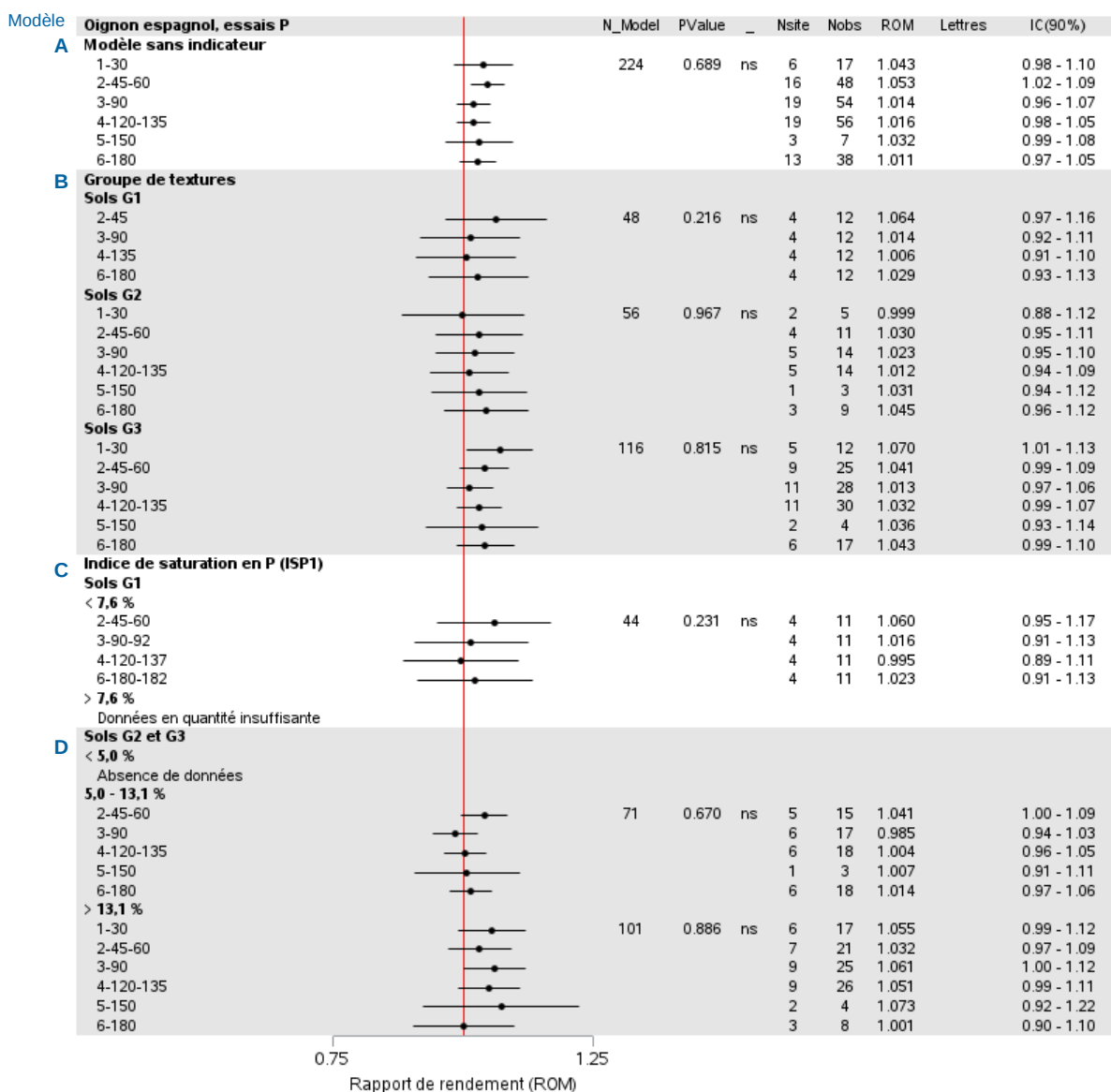


Figure 13. Résultats des analyses de variance sur la réponse de l'oignon espagnol aux doses croissantes de phosphore. G1 : sols à texture fine ; G2 : sols à texture moyenne ; G3 : sols à texture grossière ; N_model : nombre d'observations du modèle ; Nsite : nombre de sites ; Nobs : nombre d'observations ; 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 $P < 0,12$.

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

3.2.3.1 Calibres des oignons à la récolte

La fertilisation phosphatée peut avoir une influence sur la taille et la maturation des bulbes de l'oignon (Amare, 2020; Khokhar, 2019; Sullivan et al., 2001), deux paramètres déterminants en vue d'assurer la commercialisation et une bonne conservation. À la récolte, les bulbes d'oignon étaient séchés puis classés selon leur calibre en fonction de la fertilisation reçue. Pour les détails concernant les calibres d'oignons, se référer au Tableau 8 et à

la section 2.2.3.1. Les oignons ayant un diamètre supérieur à 3 po (jumbos, colossaux et super colossaux) ont été considérés comme étant les plus recherchés. La Figure 14 montre qu'en général, les calibres d'oignons vendables récoltés variaient de gros à colossaux, avec une très faible proportion d'oignons moyens. Indépendamment de la dose de P_2O_5 appliquée, les oignons jumbos représentaient la plus grande proportion des récoltes, soit entre 53 et 63 % du rendement, en moyenne et selon le traitement. Les proportions de bulbes de calibres jumbos ont été plus élevées dans les sols G1, que dans les sols G2-G3 (Figure 14).

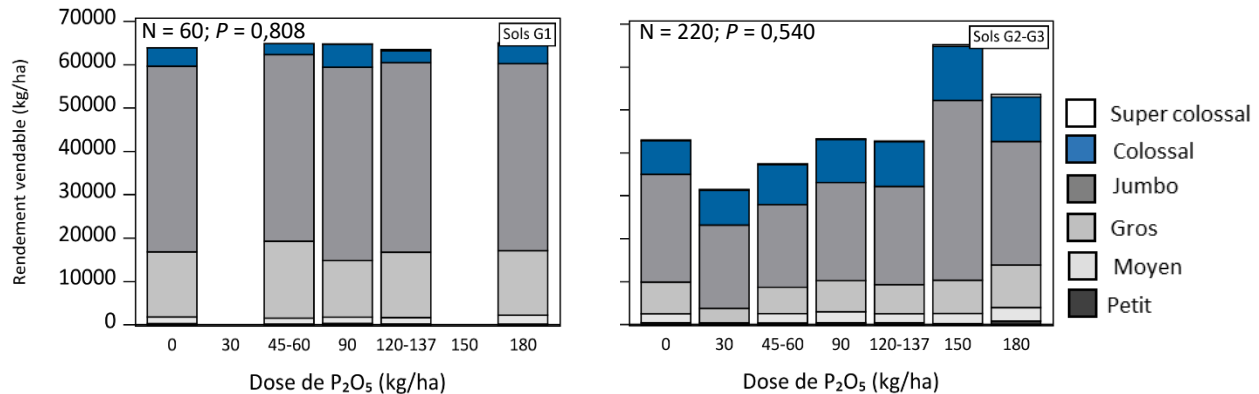


Figure 14. Effet de la dose de phosphore sur les calibres de l'oignon espagnol à la récolte dans les sols des groupes de textures G1 et G2-G3. N : Nombre d'observations.

Les ANOVA ont été réalisées en considérant la somme des rendements vendables obtenus pour les trois calibres de plus de 3 po. Contrairement à ce qui a été observé pour l'azote, les résultats des analyses de variance n'ont montré aucun effet de la fertilisation phosphatée sur le rendement en oignons de calibres de plus de 3 po, tant dans les sols G1 ($P = 0,81$), que dans les sols G2-G3 ($P = 0,54$). Ces résultats concordent avec ceux démontrant précédemment que la fertilisation phosphatée n'a pas influencé les rendements de manière significative pour ce jeu de données (voir section 3.2.2). À l'opposé, plusieurs études de la littérature scientifique (Amare, 2020; Khokhar, 2019; Sullivan et al., 2001) ont précédemment rapporté une augmentation de la grosseur des bulbes de l'oignon avec la fertilisation phosphatée. L'absence d'effet de la fertilisation en P sur les calibres dans la présente étude pourrait encore une fois s'expliquer en partie par le fait que les niveaux en P des sols des essais étaient suffisants pour l'atteinte de la taille adéquate des bulbes, particulièrement dans les sols G2-G3 où 60 % des sites étaient établis sur des sols saturés en P (49 % des sols avaient un ISP_1 supérieur à 20 %). Les résultats rapportés dans la littérature commandent donc la prudence lors de l'établissement des recommandations des sols les moins saturés en P.

3.2.3.2 Pertes à la récolte

Indépendamment du groupe de textures de sols, les pertes de rendement à la récolte variaient en moyenne de 6,1 à 7,5 %, selon la dose de P_2O_5 appliquée. Considérant l'ensemble des données, ces pertes à la récolte ont été principalement causées par la présence de pourritures, soit de la pourriture bactérienne, de la pourriture du collet ou d'autres types de pourritures (données non présentées). Les résultats des analyses n'ont montré aucun effet significatif des doses de P_2O_5 sur les pertes de rendement mesurées à la récolte ($P = 0,87$).

Les pourcentages de pertes à la récolte dans les essais en fonction des groupes de textures G1 vs. G2-G3 sont présentés à la Figure 15. Ces données montrent que les pourcentages de pertes tendaient à être plus élevés dans les sols de textures fines (G1) en comparaison à ceux de textures moyennes à grossières (G2-G3). Les pourcentages de pertes de rendement variaient en moyenne de 8,5 à 11,8 % dans les sols G1, contre 4,8 à 6,5 % dans les sols G2-G3, soit presque deux fois moins (Figure 15). Toutefois, les différences ont été non significatives entre les traitements tant dans les sols G1 ($P = 0,68$), que dans les sols G2-G3 ($P = 0,77$). Ces résultats contrastent avec ceux des essais azotés, où les pertes étaient plus élevées avec le traitement témoin. Une très grande variation a été également mesurée au niveau des pourcentages de pertes dans les sols G1, probablement en raison du faible nombre d'observations (Figure 15). Le niveau de saturation en P beaucoup plus faible des sols G1 (92 % des sols sous le seuil REA de 7,6% dont les deux tiers sous 3,8 % d'ISP₁), en comparaison des sols G2-G3 (60 % au-dessus du seuil REA de 13,1 %, dont la moitié au-dessus de 20 % d'ISP₁), pourrait aussi expliquer les différences observées entre ces groupes de textures.

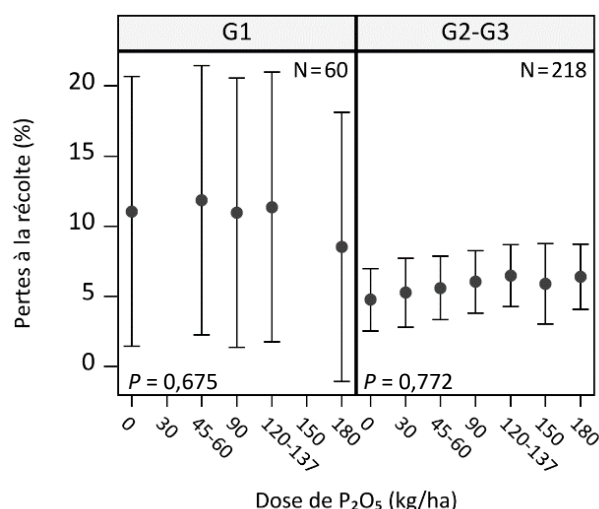


Figure 15. Effet de la dose de phosphore sur les pertes d'oignons espagnols à la en fonction des groupes de textures. N : nombre d'observations.

3.2.3.3 Qualité à la récolte

L'effet de la fertilisation phosphatée sur la qualité à la récolte a été étudié par le biais des paramètres suivants : présence de cœur double, de fusariose, de pourriture bactérienne et de pourriture du collet. Les résultats sont présentés à la Figure 16. L'apparition du cœur double a été la condition la plus fréquente alors que pour certaines parcelles, jusqu'à 80 % (4 sur 5) des oignons ont été affectés, voire 100 % (5 sur 5) dans certains cas (Figure 16). Les proportions de parcelles ayant été touchées par un problème quant à la qualité des bulbes (au moins un oignon sur 5 affecté) variaient de 0 à 18 % pour la pourriture bactérienne, de 9 à 19 % pour la pourriture du collet et de 0 à 18 % pour la fusariose. L'analyse des données n'a toutefois pas permis d'établir de relation entre les problèmes de qualité étudiés et la fertilisation phosphatée.

Quant à la présence de cœurs doubles, hormis le traitement de 30 kg P₂O₅/ha, la proportion de parcelles présentant au moins un cœur double a varié de 0 à 22 % ($P = 0,024$). Les plus faibles pourcentages de cœurs

doubles se retrouvent dans les deux plus fortes doses de P. Cependant, le groupe de dose de 150 kg P_2O_5 /ha présentait peu de données (6 observations). Toutefois, le groupe de 180 kg P_2O_5 /ha en contient davantage (30 observations) et présente significativement moins de cœurs doubles que les doses de 30 et de 90 kg P_2O_5 /ha (P respectivement de 0,001 et 0,101), mais pas du traitement témoin. La dose de 30 kg/ha présentait toutefois seulement 11 observations. Ainsi, il est difficile de tirer une conclusion forte des analyses, bien que davantage de P semble contribuer à diminuer l'incidence des cœurs doubles. Néanmoins, les études d'Abdissa et al. (2011) ont rapporté que la fertilisation phosphatée pouvait influencer la division des bulbes de l'oignon. Par contre, d'autres auteurs rapportent que la division des bulbes d'oignon serait également contrôlée génétiquement (Amare, 2020). Dans le cas de dose de 30 kg P_2O_5 /ha, 63 % des parcelles ont été atteintes, avec 36 % des parcelles ayant 80 % des oignons affectés. Cela dit, cette intensité d'occurrence de cœurs doubles est probablement due à un effet de site. En effet, ce traitement contient un faible nombre d'observations ($N = 11$) et un des deux sites (site 7) présentait une très forte présence de cette problématique. Par ailleurs, les oignons du traitement témoin ne présentent que peu de cœurs doubles. Ainsi, bien qu'une différence significative ($P < 0,05$) ait été trouvée quant au nombre de cœurs doubles pour la dose de 30 kg P_2O_5 /ha en comparaison des autres, il n'est pas possible d'affirmer que cela est due à un apport insuffisant de P.

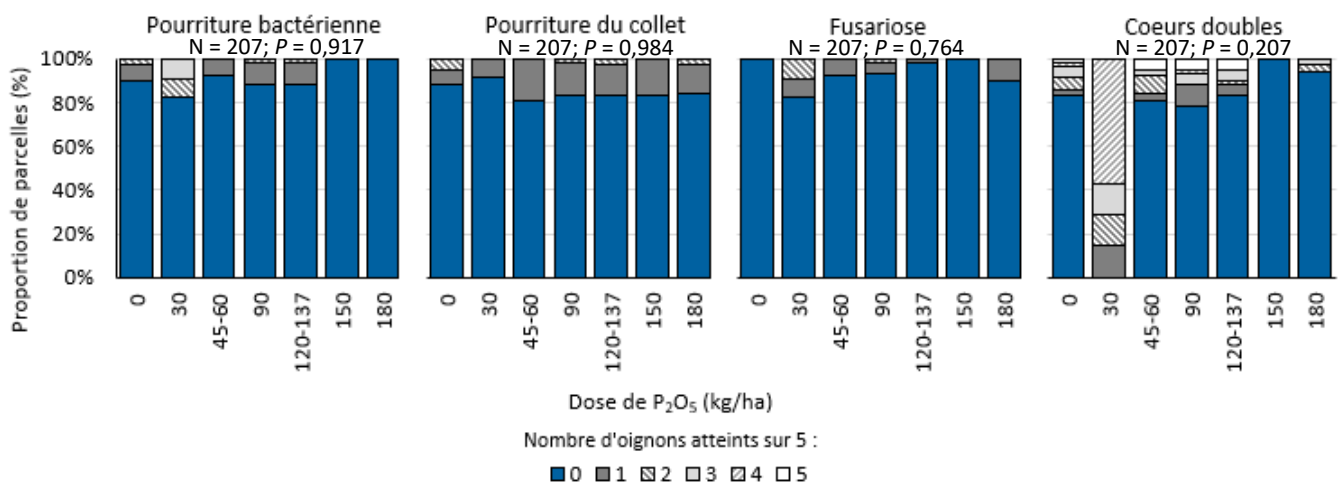


Figure 16. Effet de la dose de phosphore sur la qualité de l'oignon espagnol à la récolte. L'évaluation de la qualité a été réalisée avec un échantillon de 5 oignons de catégorie jumbo tranchés. Par exemple, pour la dose de 30 kg P_2O_5 /ha, 37 % des parcelles n'ont montré aucun oignon avec un problème de cœur double, 9 % des parcelles ont eu 1 oignon sur 5 présentant ce problème, 9 % des parcelles ont eu 2 oignons sur 5 présentant ce problème, 9 % des parcelles ont eu 3 oignons sur 5 présentant ce problème, 36 % des parcelles ont eu 4 oignons sur 5 présentant ce problème et 0 % des parcelles ont eu 5 oignons sur 5 présentant ce problème.

3.2.3.4 Pertes suivant l'entreposage

Suivant l'analyse exploratoire, 64 % de l'ensemble des données validées des essais P ont fourni des données d'entreposage valides pour analyse, 26 % avaient des données d'entreposage considérées aberrantes (ex. mauvaises conditions d'entreposage), tandis que 10 % n'ont pas été évaluées pour la conservation en entrepôt en raison de la non-disponibilité de structures d'entreposage sur le site. Les pourcentages de pertes de rendements mesurés après l'entreposage variaient en moyenne de 6,7 à 9,8 % dans les sols G1 et de 8,0 à 11,2

% dans les sols G2-G3. De même que pour la récolte, les principales causes de pertes de rendement à l'entreposage étaient généralement la pourriture bactérienne et la pourriture du collet (données non présentées). Les pourcentages de pertes ont été généralement similaires indépendamment du groupe de textures du sol, bien qu'une plus grande variabilité ait été observée dans les sols G1. Les pertes enregistrées pourraient être expliquées en partie par le fait que contrairement à l'oignon jaune, l'oignon espagnol est généralement cultivé pour le marché frais. De plus, le collet des oignons était gros dans 40 à 50 % des cas et moyen dans 19 à 40 % des cas, ce qui est non idéal pour assurer une bonne conservation en entrepôt des bulbes (voir section 3.2.3.5).

Les résultats des analyses statistiques présentés selon le groupe de textures du sol (G1 vs. G2-G3) montrent que la fertilisation phosphatée n'a pas affecté la conservation des oignons espagnols en entrepôt, tant dans les sols G1 ($P = 0,54$) que G2-G3 ($P = 0,41$; Figure 17). L'absence d'effet significatif observé dans cette étude pourrait en partie être attribuable à la présence de quantités adéquates de P disponible dans les sols, tel qu'observé dans l'analyse de l'effet de l'apport de P sur le rendement. Toutefois, particulièrement dans les sols G1, l'absence d'effet pourrait s'expliquer par un nombre insuffisant d'observations.

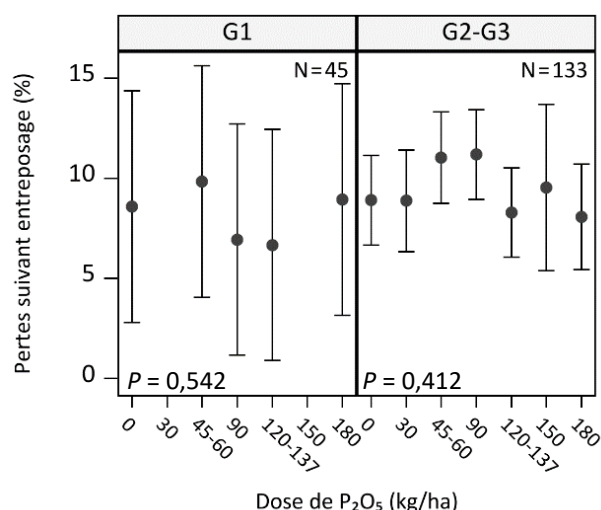


Figure 17. Effet de la dose de phosphore sur les pertes de rendements suivant une période d'entreposage dans la culture d'oignon espagnol selon la teneur en matières organiques des sols de groupes de textures G2 et G3. N : nombre d'observations.

3.2.3.5 Qualité suivant l'entreposage

Suivant l'entreposage, les oignons ont été évalués pour la grosseur du collet, la rétention des pelures et la présence de tuniques translucides. Les résultats des évaluations sont présentés à la Figure 18. Dans l'ensemble, les oignons ont eu un gros collet dans la majorité des cas (57 à 100 %) indépendamment de la dose appliquée de P_2O_5 ($P = 0,78$). Entre 10 à 29 % des oignons ont eu des petits collets, suivant les doses de 0 à 137 kg P_2O_5 /ha. La présence d'oignons ayant un collet allant de moyen à gros pourrait expliquer les pertes non négligeables enregistrées à l'entreposage. En effet, l'épaisseur du collet est un facteur important témoignant du potentiel de

l'oignon à être entreposé (Amare, 2020). Selon ce dernier auteur, l'oignon avec un gros collet montre une plus faible capacité de conservation que celui ayant un petit collet.

À l'opposé, une rétention des pelures allant de bonne (83-100 %) à moyenne (0-17 %) a été observée même avec le traitement témoin (Figure 18). Aucune rétention faible n'a été observée. Quant à la présence de tuniques translucides, les données suggèrent une légère tendance à une augmentation de leur occurrence lorsque les doses de P_2O_5 augmentent. Toutefois, de même que pour la grosseur du collet, les analyses statistiques n'ont révélé aucun effet significatif de la fertilisation phosphatée sur la présence de tuniques translucides ($P = 0,99$) et sur la rétention des pelures ($P = 0,96$) de l'oignon après l'entreposage.

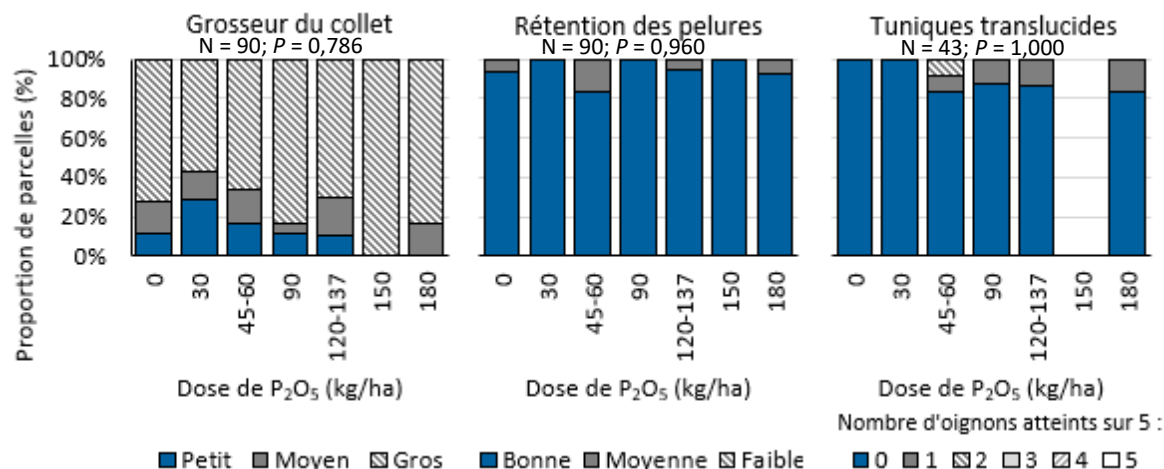


Figure 18. Effet de la dose de phosphore sur la qualité de l'oignon espagnol suivant une période d'entreposage. L'évaluation de la qualité a été réalisée avec un échantillon de 5 oignons de catégorie jumbo tranchés. Par exemple, à la suite de l'entreposage, pour la dose de 30 kg P_2O_5 /ha, 29 % des oignons ont eu un collet « Petit », 14 % ont eu un collet « Moyen » et 57 % ont eu un collet « Gros ».

3.3 Diagnostic nutritionnel et exportations en phosphore

Les concentrations et les exportations de P_2O_5 de l'oignon espagnol en fonction du diagnostic nutritionnel sont présentées au Tableau 15. Toutes les valeurs présentées dans cette section considèrent les bulbes seulement et ne tiennent pas compte du feuillage.

Les concentrations de P_2O_5 dans les bulbes d'oignon espagnol variaient de 0,47 à 0,63 kg P_2O_5 /t humide avec une moyenne de $0,54 \pm 0,05$ kg/t humide. Les plus fortes concentrations ont été obtenues pour les cultivars Golden Spike, Latigo et SV4643NT F1, tandis que Rancheros, T-489 et SV6672NW F1 ont eu les plus faibles valeurs (données non présentées). Les concentrations obtenues dans la présente étude sont comparables à celles actuellement (0,80 kg P_2O_5 /t) dans le guide du CRAAQ (2010).

La quantité de P_2O_5 exportée par la population de tête de l'oignon espagnol varie de 45 à 71 kg/ha avec une moyenne et une médiane de 55 kg/ha (Tableau 15). Cette valeur est proche de celle de 56 kg/ha (50 lb/acre) rapportée dans l'est de l'Oregon (Sullivan et al., 2017). Dans une revue de littérature réalisée sur l'oignon espagnol, Khokhar (2019) rapporte une exportation en P_2O_5 de 48 kg P_2O_5 /ha (21 kg P/ha). Pire et al. (2001) rapporte également une exportation de $52 \pm 9,3$ kg P_2O_5 /ha ($22,9 \pm 4,1$ kg P/ha) par les bulbes d'oignons. La

Figure 19 montre que les exportations en P_2O_5 ont généralement varié de façon linéaire avec le rendement de la culture et que les variétés Delgado et Valero, atteignant les meilleurs rendements, sont celles présentant les plus grandes exportations. Le patron de distribution des nuages de points sur le graphique permet de conclure que les différences au niveau de l'exportation en P_2O_5 entre les cultivars seraient principalement attribuables à de plus grandes productivités plutôt qu'à une variation de la concentration du P dans les tissus (Figure 19). Il est également à noter que la plus grande productivité de certaines variétés peut refléter un effet de site si cette dernière a été utilisée dans un seul essai.

Tableau 15. Concentrations et exportations de phosphore des oignons espagnols selon le diagnostic nutritionnel

	Humidité (%)	Exportations ¹					
		(kg P_2O_5 /t humide)		(kg P_2O_5 /ha)			
		Moy	Éc-T	Moy	Med	Min	Max
Haut rendement et équilibre nutritionnel (« population de tête »)	90	0,54	0,05	55	55	45	71
Faible rendement et équilibre nutritionnel	88	0,71	0,20	48	49	23	78
Faible rendement et déséquilibre nutritionnel	90	0,56	0,10	23	20	9	56
Haut rendement et déséquilibre nutritionnel	91	0,55	0,10	54	55	45	61

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

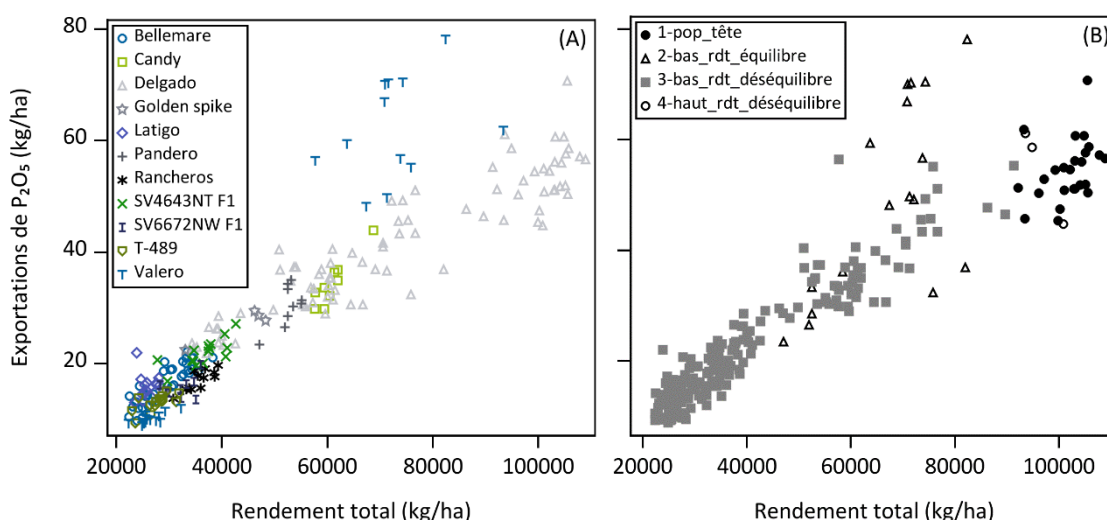


Figure 19. Exportations de phosphore de l'oignon espagnol en fonction des rendements selon les variétés (A) et le diagnostic nutritionnel (B). Les exportations ont été calculées sur les bulbes seulement et ne tiennent pas compte du feuillage.

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

À la suite des multiples analyses réalisées, les VSRF phosphatées ont été déterminées pour chacun des groupes de textures du sol (G1 vs. G2-G3) selon les seuils du REA puisqu'aucun seuil spécifique au jeu de données n'a pu

être déterminé. L'usage de ces seuils permet de tenir compte du risque environnemental, tout en intégrant l'aspect agronomique (Khiari *et al.*; 2000), ce qui minimise le risque de pertes de P dans l'agrosystème. Ainsi, les nouvelles VSRF considèrent la saturation en P du sol (ISP_1), un indicateur agroenvironnemental plus fiable et plus performant que la considération du P_{M3} seul afin d'évaluer la disponibilité du P.

Les VSRF en P_2O_5 pour l'oignon espagnol sont présentées au Tableau 16. Tel que présenté à la section 3.2.2, peu de réponse à la fertilisation phosphatée a été mesurée dans cette étude. Toutefois, il est primordial de considérer que le jeu de données exploité contient une très forte proportion de sols saturés en P au-delà des seuils REA, particulièrement dans le groupe de sols le plus fixateur en P (G2-G3), pour lequel davantage de réponse était attendue et qui, de plus, ne présentait aucune donnée dans les sols les moins saturés (0-5 % d' ISP_1). Par ailleurs, aucun ajustement n'a été apporté aux VSRF sur la base des analyses complémentaires portant sur la qualité et les pertes, tant à la récolte qu'à l'entreposage, puisqu'aucun effet déterminant de la fertilisation P sur ces paramètres n'a été observé.

Dans les sols du groupe de textures G1, trois classes de fertilité phosphatée ont été créées. Dans les sols ayant un ISP_1 inférieur à 7,6 %, la dose optimale de 45 kg P_2O_5 /ha procurant 6 % de gains de rendement et correspondant à la plus petite dose testée pour ces sols est proposée. La classe suivante se situant entre 7,6 et 15,2 % d' ISP_1 n'a pu être analysée statistiquement en termes de réponse au P (manque de données). Toutefois, une dose de 30 kg P_2O_5 /ha est tout de même proposée. D'une part, l'absence de donnée ne permet pas de conclure que l'apport de P ne procurerait aucun gain. En fait, à titre informatif, cette classe contenait un seul site (un bloc, quatre observations) présentant un gain moyen de 9 % par rapport au témoin suivant les apports de P_2O_5 , toutes doses confondues (données non présentées). D'autre part, cette dose représente la plus petite dose testée au protocole pour ces sols. Enfin, celle-ci correspond environ à la moitié des exportations en P_2O_5 de la culture. Ainsi, cette dose permettra de s'assurer des gains potentiels, tout en contribuant à ramener à la baisse l' ISP_1 du sol sous le seuil REA. Il a en effet été démontré que des apports de P égaux ou sous les valeurs d'exportations mènent à une réduction de la saturation des sols en P (Fulford et Culman, 2018; Giroux et al., 2002; Giroux et Royer, 2007). Enfin, au-delà du seuil de 15,2 % d' ISP_1 , la recommandation d'un apport nul est proposée.

Dans les sols des groupes de textures G2 et G3, aucune donnée n'était disponible sous 4,95 % d' ISP_1 . Cette limite du jeu de données, combinée au seuil du REA, a mené à la distinction de quatre classes de fertilité: (i) $ISP_1 \leq 5,0$ %, (ii) 5,0 à 13,1 %, (iii) 13,2 à 26,2 % et (iv) $ISP_1 > 26,2$ %. La dose de 60 kg P_2O_5 /ha est retenue pour les sols ayant un $ISP_1 \leq 5,0$ %. Le choix de cette dose est basé sur les exportations de la culture (55 kg/ha de P_2O_5) afin d'assurer un bon développement de celle-ci tout en minimisant le risque de baisse accrue à court terme de l' ISP_1 de ces sols déjà peu pourvus en P. Sur ce dernier aspect, cette dose est conservatrice, puisque tel qu'expliqué précédemment, celle-ci pourrait conduire à une baisse. Toutefois cette baisse est relativement lente lorsque les sols sont déjà peu saturés, mais un suivi par l'agronome est conseillé. Pour la deuxième classe de fertilité de 5,1 à 13,1 % d' ISP_1 , la dose de 45 kg P_2O_5 /ha a permis d'obtenir le rendement optimal, avec des gains de rendement en moyenne de 4 %, mais pouvant atteindre 9 %, en comparaison du témoin. À l'instar des sols G1, une classe a aussi été créée en doublant le seuil REA (13,2 à 26,2 % ISP_1). Cependant, dans les G2-G3, les données ont permis d'analyser la réponse de la culture aux doses de P. Ainsi, dans cette classe de sol, la dose de 30 kg P_2O_5 /ha, correspondant à la plus petite dose testée est proposée, pour des gains moyens de 6 %, et pouvant atteindre

12 %. Dans ce cas, tout comme pour la classe intermédiaire des G1, cette dose, soit près de la moitié des quantités de P_2O_5 /ha qui quitteront le site de production, permettra de ramener le taux de saturation des sols sous le seuil agroenvironnemental et cela, d'autant plus vite qu'ils sont plus saturés. Enfin, au-delà du seuil de 26,2 %, un apport nul est proposé.

En ce qui a trait aux classes et doses proposées, il est important de considérer la faible efficacité de prélèvement par l'oignon des nutriments du sol en raison de son système racinaire peu ramifié et peu pourvu en poils absorbants (Reid et Morton, 2019; Brewster, 2008; Khokhar, 2019; Leblanc, 2004). Cette problématique se retrouve amplifiée dans le cas d'un élément très peu mobile, tel le phosphore, puisque le volume de sol exploité par les racines est réduit en comparaison d'autres cultures ayant un système racinaire bien développé. De ce fait, l'apport du P requiert une attention particulière afin d'optimiser l'efficacité d'utilisation des engrais par la plante et d'assurer une nutrition adéquate de celle-ci, particulièrement dans les sols faiblement saturés en P. Les calculs effectués pour déterminer le coefficient d'utilisation apparent (CUA) du P des engrais des essais de cette étude (données non présentées) appuient cette préoccupation. En effet, l'oignon a montré des CUA du P très faibles, soit d'au plus 5 %. À ce propos, le mode d'application des engrais employé s'en révèle d'autant plus crucial. En effet, la recherche a démontré que l'engrais phosphaté est plus efficace lorsque ce dernier est placé dans une position lui permettant de se retrouver à proximité de la surface absorbante des racines (Garg et Welch, 1967) puisque durant les premiers stades de croissance, la plante est en contact avec un volume limité de sol. De plus, ceci permet de diminuer les processus de fixation puisque l'engrais est exposé à moins de sites de fixation, ce qui permet de maintenir une concentration en phosphate disponible en solution du sol plus élevé. L'application en bande fera d'autant plus une différence que les semis sont réalisés durant une période de températures fraîches, sur des sols peu saturés en P et présentant une nature plus fixatrice du P (Parent et al., 2002). En effet, le stress créé par le manque de P en début de saison peut restreindre la croissance et diminuer le rendement à la récolte puisqu'une carence au début de la période végétative aura une plus grande incidence négative sur la productivité de la culture qu'un manque de phosphore plus tard dans la vie de la plante (Grant et al., 2001). Ainsi, il est particulièrement important de souligner le fait que dans le cadre de ces essais, l'engrais P a été apporté en bande puisque cet aspect diffère de la pratique courante au Québec, soit l'application à la volée, mode qui diminue l'efficacité d'utilisation des engrais phosphatés. Conséquemment, dans le cadre d'une application à la volée, un rehaussement des doses proposées à partir des résultats de cette étude pourrait être nécessaire en vue d'assurer une bonne nutrition de la culture. À titre d'exemple, en Pennsylvanie, les recommandations pour une application en bande sont de 90 kg P_2O_5 /ha, contre 179 kg P_2O_5 /ha pour une application à la volée, soit deux fois plus (Sanchez et al., 2020). De même, en Alberta, les recommandations en P_2O_5 sont réduites de 20 % lorsqu'appliquées en bande en comparaison à une application à la volée (Alberta Agriculture and Rural Développement, 2014).

Globalement, les doses proposées dans le cadre de cette étude sont similaires à celles rapportées dans le cadre d'étude sur la nutrition de l'oignon. Par exemple, Jha *et al.* (2000) ont observé des doses optimales variant de 50 à 75 kg P_2O_5 /ha. En Idaho, Brown (2000) recommande également l'application de 46 kg P_2O_5 /ha (20 kg P/ha) dans des sols de 10 ppm de P_{Olsen} . Cependant, elles sont généralement plus faibles que celles des grilles de fertilisation étrangères des autres provinces et états, et fortement abaissées en comparaison de celles utilisées actuellement au Québec (CRAAQ, 2010) (Tableau 17). Toutefois, il faut souligner que la grille du CRAAQ (2010) est non spécifique à l'oignon et regroupe plusieurs cultures, soit l'ail, l'oignon en général et le poireau, et qu'elle

n'est pas basée sur des essais scientifiques. De plus, au Québec, l'oignon espagnol est généralement produit à partir de transplants en raison de son cycle de production trop long. Or, l'oignon produit à partir de transplants pourrait présenter de plus faibles besoins en phosphore que l'oignon semé. Par exemple, dans les sols organiques, les recommandations en P_2O_5 récemment revues aux cours d'essais scientifiques dans les années 2000 au Québec pour la culture d'oignon sec varient de 0 à 110 kg P_2O_5 /ha pour l'oignon semé, tandis qu'elles sont de seulement 0-30 kg P_2O_5 /ha pour l'oignon transplanté (CRAAQ, 2010). Tout ceci expliquerait l'écart entre les recommandations actuelles et celles de la présente étude. Il convient aussi de mentionner que les VSRF sont établies à partir des essais de fertilisation où les deux autres éléments majeurs (N et K) ont été apportés en quantité suffisante.

Tableau 16. Fertilisation phosphatée de l'oignon espagnol – Valeurs scientifiques de référence en fertilisation

Groupe de textures ¹	Classe de fertilité ISP ₁ (%) ^{2,3}	Mode et période d'application	VSRF ⁴ (kg P_2O_5 /ha)
G1	≤ 7,6	À la transplantation, incorporé	45 ⁵
	7,7 – 15,2		(30) ⁶
	>15,2		(0) ⁷
G2, G3	(≤ 5,0)	À la transplantation, incorporé	(60) ⁸
	(5,1) – 13,1		45 ⁵
	13,2 – 26,2		30 ⁵
	>26,2		0 ⁹

¹ G1 : sols à texture fine ; G2 : sols à texture moyenne ; G3 : sols à texture grossière.

² ISP₁ : saturation en P du sol = $[P_{M3} \text{ (ppm)} / Al_{M3} \text{ (ppm)}] \times 100$, éléments extraits au Mehlich-3 (Mehlich, 1984) et dosés par spectroscopie d'émission au plasma (SEP ou ICP : *Inductively coupled plasma*).

³ Les catégories ont été déterminées en tenant compte des seuils environnementaux du REA (Règlement sur les Exploitations Agricoles ; MDDEP, 2010) et des plages de données manquantes du jeu de données.

⁴ VSRF : Valeurs scientifiques de référence en fertilisation.

⁵ Dose agronomique optimale pour cette catégorie de sols sur la base des intervalles de confiance.

⁶ En absence de données en quantité suffisante dans cette catégorie de sol, cette dose est proposée sur la base des exportations en P_2O_5 de la culture, soit environ la moitié de celles-ci qui sont en moyenne de 55 kg/ha.

⁷ Dose nulle dans cette catégorie de sols fortement saturée en P. Aucun essai n'a été conduit dans cette catégorie de sols.

⁸ Dose proposée sur la base des exportations en P_2O_5 , en absence de donnée pour cette catégorie de sols faiblement saturés et fixateurs en P.

⁹ Dose nulle dans cette catégorie de sols fortement saturée en P.

Sols G2- G3 d'ISP₁ < 4,95 %

Aucune donnée n'était disponible pour les sols G2 et G3 ayant moins de 4,95 % d'ISP₁. La dose de 60 kg P₂O₅/ha, basée sur les exportations de la culture (55 kg/ha de P₂O₅), est donc proposée pour cette catégorie de sols faiblement saturés et fixateurs en P en vue de limiter une diminution accrue à court terme de la fertilité phosphatée des sols et la perte de rendement.

Classe d'ISP₁ intermédiaire en sol G1

À l'instar des sols G2-G3 où des gains de rendement sont mesurés suivant l'apport de 30 kg P₂O₅/ha dans les sols ayant un ISP₁ supérieur au seuil du REA, une classe de fertilité intermédiaire analogue (7,6 % < ISP₁ < 15,2 %) a été créée pour les sols G1. Cette décision s'appuie sur le fait qu'aucune donnée n'était disponible pour démontrer qu'un apport nul serait suffisant dans cette catégorie de sols. En fait, le seul site de cette classe a démontré un gain moyen de 9 % suivant les apports de P₂O₅ (toutes doses confondues). De plus, en considérant une teneur en Al_{M3} théorique de 1 100 ppm, la valeur d'ISP₁ de 7,7 % correspond à une teneur en P_{M3} de 187 kg/ha, ce qui constitue une diminution substantielle de la recommandation actuelle (120 kg/ha; CRAAQ 2010). Enfin, cette dose de 30 kg P₂O₅/ha, de près de 50 % des quantités qui quitteront le site de production, entraînera un bilan négatif. La création de cette classe permet ainsi une approche prudente de la fertilisation dans cette catégorie de sol tout en étant compatible avec retour graduelle de l'ISP sous le seuil RÉA.



Sols fortement saturés en P

Tant dans les sols G2-G3 que dans les sols G1, un apport nul est proposé pour les sols ayant un ISP₁ deux fois supérieur au seuil agroenvironnemental du REA (supérieur à 15,2 % pour les sols G1 et supérieur à 26,2 % pour les sols G2-G3) en raison de la forte disponibilité du P à ces taux de saturation.

Mode d'application des engrais

Les VSRF proposées dans le cadre de cette étude ont été calculées à partir d'essais dans lesquels l'engrais phosphaté a été appliqué en bande afin de garantir une bonne utilisation de l'élément nutritif par la plante. Or, l'oignon présente un faible taux d'utilisation des éléments nutritifs en raison de son système racinaire superficiel et peu développé (Khokhar, 2019; Leblanc, 2004; Brewster, 2008). Une application à la volée avant le semis risque donc de diminuer notablement l'efficacité d'utilisation des engrais par la culture. Ainsi, puisqu'actuellement au Québec l'engrais est principalement appliqué à la volée dans cette culture, une note de bas de tableau serait nécessaire car un rehaussement des doses pourrait être à considérer par l'agronome selon l'historique du champ.

Tableau 17. Comparaison des recommandations en P_2O_5 pour la production d'oignon en sol minéral au Canada et à l'étranger

Provinces/États	Mode et période d'application	Fractionnement	Indicateurs		Dose P_2O_5 (kg/ha)	Source
			Fertilité du sol	Autres		
Québec (CAN)	-	-	0-22 ppm P_{M3}		190	CRAAQ (2010)
			23-45		160	
			46-67		140	
			68-89	-	120	
			90-134		80	
			135-179		50	
			180 et +		30	
Ontario (CAN)		non	P du sol (Polsen)	-	0-180	MAAARO (2011)
Alberta (CAN)	À la volée avant le semis et incorporé ou en bande au semis	non	-	-	212-366	Alberta Agriculture and Rural Development (2014)
Michigan (É-U)	À la volée, incorporé avant le semis ou en bande au semis	non	P du sol (Polsen)	-	28-224	Warncke et al. (2004)
Mid-Atlantic (É-U)	À la volée et incorporé	non	P du sol (PM_3)	-	0-224	Virginia Cooperative Extension (2018)
Nouvelle Angleterre (É-U)	À la volée et incorporé	non	P du sol	-	0-168	University of Massachusetts Amherst (2021)
Pennsylvanie (É-U)	En bande à la plantation	non	-	-	90	Sanchez et al. (2020)
	À la volée avant la plantation				179	
Nord-ouest Pacifique	À la volée ou en bande	Non	P du sol (P Olsen)	ECC du sol	0-314	Sullivan et al. (2001)
Nouvelle Zélande	-	oui	P du sol (P Olsen)	-	0-321	Reid et Morton (2019)

¹ P_{M3} ; P extrait par la méthode au Mehlich-3 (1984) ; P_{Olsen} : P extrait par la méthode Olsen ; P_{Bray-I} : P extrait par la méthode Bray-I.

Dans le but d'homogénéiser les unités et faciliter les comparaisons, les coefficients suivants ont été utilisés lorsque nécessaire :

1 ppm = 2,24 kg/ha ; 1 lb/ac = 1,12 kg/ha ; 1 t de blé = 36,744 0 bu ; 1 t d'orge = 45,93 bu ; 1 ac = 0,404 69 ha.

4. FERTILISATION POTASSIQUE

4.1 Portrait et représentativité des données

La répartition des blocs des essais K de l'oignon espagnol selon différentes classes de propriétés de sol (0-20 cm) est présentée au Tableau 18. De même que dans les essais N et P, les essais K ont été réalisés majoritairement sur des sols de textures moyennes (26 %) à grossières (64 %). En effet, presque la totalité des blocs (95 %) avaient une teneur en argile inférieure à 30 %, alors que seulement 5 % avaient entre 30 et 60 % d'argile. Cette faible proportion de sites G1 ne permet pas d'étudier avec fiabilité la réponse de la culture pour cette catégorie de sols. Dans les sols à textures moyennes et grossières (G2 et G3), 26 % des blocs des essais étaient sur des sols de moins de 100 ppm de K_{M3} et 42 % se trouvaient dans l'intervalle 101 à 200 ppm de K_{M3} . Une majorité des essais réalisés en sols G2-G3 se trouvaient donc dans la partie inférieure du spectre de richesse en K_{M3} , avec 68 % des blocs qui détenaient moins de 201 ppm. Cette répartition est adéquate en vue de la détermination de la réponse à la fertilisation potassique sous différents teneurs en K_{M3} du sol.

Tableau 18. Répartition des blocs des essais K selon différentes classes de propriétés de sol après la validation des données

pH _{eau} ¹	Blocs (%)	Teneur en K_{M3} (ppm)	Blocs (%)		Groupe de textures ²	Blocs (%)	Teneur en argile (%)	Blocs (%)
			G1	G2-G3				
< 5,8	5	≤ 100	50	26	G1	11	≤ 30 %	95
5,8 – 7,0	69	101 – 200	17	42	G2	26	31 – 60 %	5
> 7,0	26	201 – 300	17	24	G3	63	> 60 %	0
-	-	301 – 400	16	8	-	-	-	-
-	-	> 400	0	0	-	-	-	-

¹ G1 : sols à texture fine ; G2 : sols à texture moyenne ; G3 : sols à texture grossière.

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 la culture aux apports d'engrais potassique. Le potentiel de plusieurs indicateurs à expliquer la réponse à la fertilisation des sols a donc été vérifié avec le test de Cate-Nelson (1971) : la teneur du sol en K extrait par la méthode Mehlich-3 (K_{M3}), la teneur du sol en argile, la CEC et différents ratios de K_{M3} sur des teneurs de bases échangeables (CEC, Ca, Mg). Lorsque c'était possible, les indicateurs ont été testés par groupe de textures de sols (G1, G2 et G3).

Les potentiels indicateurs de fertilité du sol, les seuils de réponse à la fertilisation potassique, ainsi que les paramètres statistiques des tests de Cate-Nelson sont présentés au Tableau 19. Pour ces essais des précisions relativement faibles (50 % environ) ont été obtenues en raison du nombre élevé de points dans le quadrant des faux négatifs. Cela traduit que des facteurs autres que les indicateurs considérés influenceraient la productivité de la culture. Parmi les indicateurs testés, la teneur en K_{M3} du sol du sol s'est avéré être le principal indicateur potentiel de prédiction de la fertilité. Lorsque les données étaient considérées sans tenir compte du groupe de

textures du sol, aucun seuil n'a été obtenu. Par ailleurs, il n'était pas possible de tester un seuil pour les sols argileux (G1) spécifiquement en raison du faible nombre de données disponibles (2 sites, 24 observations) pour ce groupe de texture. Pour les sols G2 - G3, le seuil de 168 ppm K_{M3} , bien que non significatif, a été retenu pour l'élaboration des VSRF.

Tableau 19. Valeurs critiques des indicateurs de sols significatifs selon les tests de Cate-Nelson pour les essais K d'oignon espagnol

Indicateur de sol	Groupe de textures ¹	N ²	Valeur critique	RRel (%) ³	Sensitivité	Spécificité	Précision	P
K Mehlich-3 (ppm)	G3	32	151	85	0,43	0,88	0,56	0,114
	G2, G3	45	168	88	0,40	0,70	0,53	0,544

¹ G1 : sols à texture fine; G2 : sols à texture moyenne; G3 : sols à texture grossière.

² N : 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 les rendements vendables

Les résultats des analyses de variance (ANOVA) des essais K de l'oignon espagnol sont présentés à la Figure 20 (voir la section 2.2.2 pour les explications sur l'interprétation de la figure et des résultats). Parmi les modèles envisagés, seuls ceux permettant l'interprétation agronomique de la réponse à la fertilisation sont présentés.

Parmi les 19 essais de potassium réalisés, 13 étaient irrigués, 5 étaient non irrigués et l'information est manquante pour un site. Afin de tenir compte de l'effet de la présence d'irrigation sur l'utilisation du potassium apporté à la culture, l'existence d'une interaction entre les deux facteurs (*Irrigation* et *dose de K_2O*) a été vérifiée au préalable. Les résultats des analyses statistiques n'ont toutefois montré aucune interaction significative entre la dose optimale de K_2O et la présence ou non d'irrigation. Ainsi, ce facteur (irrigation) n'a pas été considéré aux fins des analyses statistiques sur la détermination des doses optimales de K_2O .

D'abord, une ANOVA a été effectuée sans tenir compte des indicateurs de fertilité des sols afin de visualiser globalement l'effet de la fertilisation sur le rapport de rendements (ROM) de la culture (Figure 20A). Ce modèle (A) a démontré une absence de réponse ($P = 0,936$, $N = 215$) de l'apport des doses croissantes de K_2O sur le ROM.

Le deuxième modèle (modèle B) considère la réponse à la fertilisation potassique des sols G1. L'analyse des données ne montre aucun effet significatif ($P = 0,58$; $N = 24$) de la fertilisation en K sur les rapports de rendements. Toutefois, tel que mentionné dans la section précédente (section 4.1), il est important de préciser que dans le cadre de ces essais, peu de données ont été disponibles pour les sols du groupe de texture G1 (2 sites, 24 observations). Les résultats présentés dans le présent document peuvent donc présenter certaines limitations en raison de la mauvaise représentativité des données.

Dans le dernier modèle (C), les analyses ont été réalisées sur les sols G2 et G3 en tenant compte de la teneur en K_{M3} du sol. Le seuil de 168 ppm K_{M3} déterminé par le test de Cate-Nelson (Tableau 19) a été retenu comme seuil de richesse, sur lequel une procédure modifiée de Cope-Rouse a été appliquée (seuil divisé par 2; seuil multiplié par 1,5). La plus faible valeur du jeu de données (63 ppm K_{M3}) a servi comme limite minimale pour laquelle une VSRF a pu être produite. Pour les sols ayant une teneur en K_{M3} comprise entre 64 et 84 ppm, l'effet de la fertilisation s'est révélé non significatif ($P = 0,185$; $N = 24$). Toutefois, la considération des intervalles de

confiances montre que la dose de 180 kg K₂O/ha permet l'obtention du meilleur gain de rendement, soit une moyenne de 8,2 % par rapport à un témoin sans apport de K. De plus, cette dose permettrait également de couvrir les exportations en K₂O de la culture s'élevant à 142 kg/ha en moyenne (voir section 4.3). Les sols ayant une teneur en K_{M3} comprise entre 85 et 168 ppm ont eu tendance à répondre aux différents apports de K₂O ($P = 0,12$; $N = 101$). Les résultats de ce modèle suggèrent que la dose agronomique optimale est de 150 kg K₂O/ha. L'application de cette dose optimale entraîne des gains en moyenne de 6,5 %. Pour une teneur en K_{M3} de 168 à 252 ppm, aucune réponse de la culture à la fertilisation n'a été observé, traduisant que l'apport de 30 kg K₂O/ha serait suffisante pour l'obtention du rendement agronomique optimal. Toutefois, en raison des gains de rendement encore perceptibles dans la classe de sol suivante ($K_{M3} > 252$ ppm), l'apport de 30 kg/ha de K₂O pourrait représenter un risque de perte de rendement. De plus, les intervalles de confiances montrent qu'avec l'apport de 30 kg K₂O/ha les pertes de rendement peuvent atteindre jusqu'à 12 % par rapport au témoin. De ce fait, la dose de 60 kg K₂O/ha serait à prioriser en vue de limiter les risques de perte. Au-delà du seuil de 252 ppm de K_{M3}, en absence d'effet significatif ($P = 0,97$; $N = 20$) et étant donné les gains à fertiliser ($ROM > 1$) la plus petite dose testée (30 kg K₂O/ha) est retenue.

MODÈLE

A

B

C

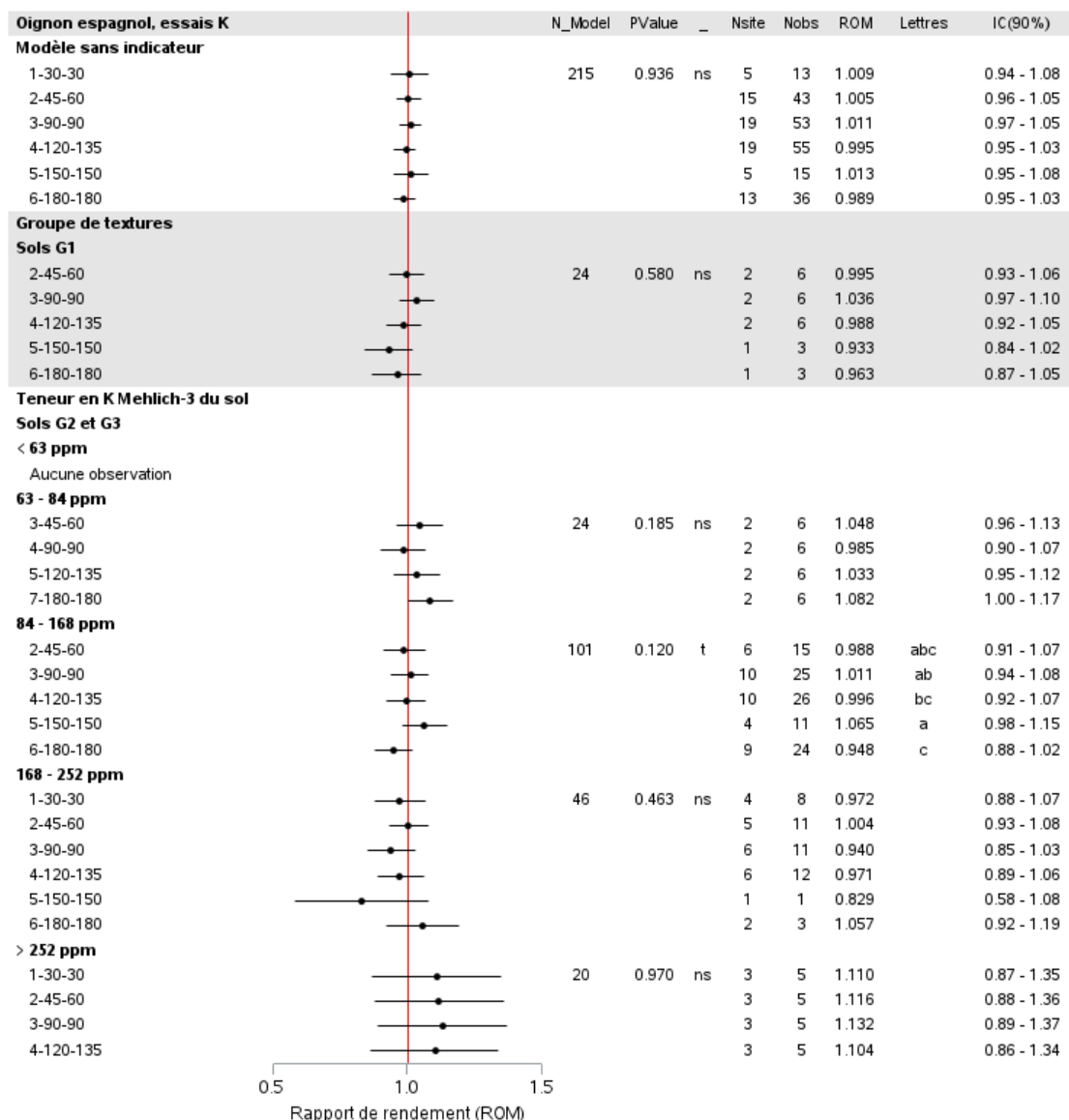


Figure 20. Résultats des analyses de variance sur la réponse de l'oignon espagnol aux doses croissantes de potassium. G1 : sols à texture fine ; G2 : sols à texture moyenne ; G3 : sols à texture grossière ; N_model : nombre d'observations du modèle ; Nsite : nombre de sites ; Nobs : nombre d'observations ; 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 $P < 0,12$.

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

4.2.3.1 Calibres des oignons à la récolte

Tel que mentionné dans la section 1.8.4, les oignons récoltés et séchés ont été classés selon leur taille afin d'évaluer l'effet de la fertilisation potassique sur les calibres obtenus. Les détails concernant les calibres sont présentés au Tableau 8. Dans le cadre des analyses, les oignons ayant un diamètre supérieur à 3 po (jumbo, colossal et super colossal) ont été considérés comme étant les plus recherchés. Les analyses ont donc été

effectuées sur la somme des proportions de rendements obtenus pour ces trois calibres. Dans un premier temps, l'analyse de l'effet de la dose de K_2O sur la proportion des plus gros calibres a été effectuée séparément dans les groupes de textures de sol G1 et G2-G3 (données non présentées). Dans un deuxième temps, dans l'objectif de valoriser l'ensemble des données malgré l'absence de VSRF pour les sols G1, l'analyse a été effectuée en considérant l'ensemble des données (G1-G2-G3; Figure 21). Peu importe les regroupements considérés, il est apparu que la dose de K_2O n'influait pas significativement le rendement en oignons de plus de 3 po ($P = 0,87$). Toutes textures confondues, les proportions des calibres de plus de 3 po ont varié entre 76 et 81 % entre les différents traitements de K_2O , pour les doses respectives de 180 et 150 kg/ha. La répartition du rendement vendable dans les différentes catégories de récolte est présentée à la Figure 21. Ces résultats sont assez en accord avec les observations de la section 4.2.2, où les augmentations de rendements suivant les apports de fertilisation potassique ont été assez faibles dans les catégories observées. Boyhan et al. (2007) avait également observé que la dose de fertilisant potassique n'influait pas les rendements par calibre, au vu d'une faible association entre les rendements et les doses de K_2O .

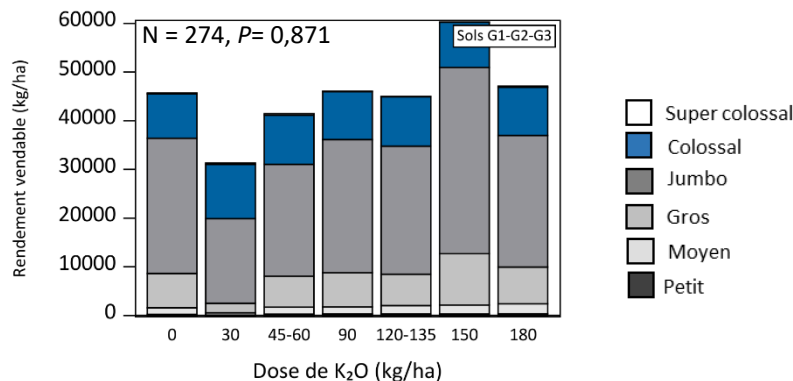


Figure 21. Effet de la dose de K_2O sur les calibres de l'oignon espagnol à la récolte. N = Nombre d'observations.

4.2.3.2 Pertes à la récolte

À l'instar des analyses de la section précédente, l'effet de la dose de K_2O sur les pourcentages de pertes à la récolte a d'abord été vérifié séparément dans les groupes de textures de sol G1 et G2-G3 (données non présentées). Ensuite, dans l'objectif de valoriser l'ensemble des données malgré l'absence de VSRF pour les sols G1, l'analyse a été également effectuée en considérant l'ensemble des données (G1-G2-G3; Figure 22). Peu importe les regroupements considérés, il est apparu que la dose de K_2O n'influait pas significativement le pourcentage de pertes à la récolte ($P = 0,819$). Toutes textures confondues, les pertes en fonction des doses de K_2O ont varié entre 5,1 et 7,4 % pour les doses respectives de 30 et 90 kg/ha. Les principales causes de pertes à la récolte ont été la pourriture bactérienne, la pourriture du collet, les cœurs doubles et les autres types de pourritures (Figure 23).

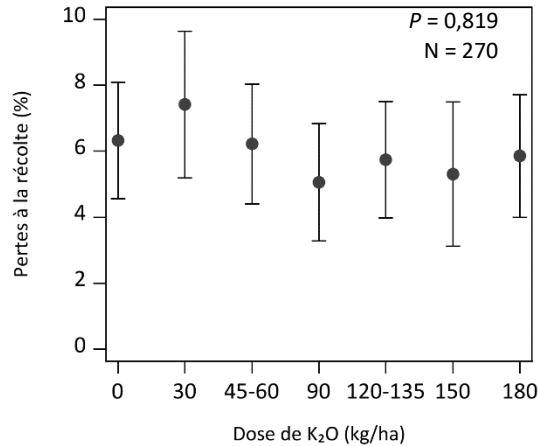


Figure 22. Effet de la dose de K₂O sur les pertes d'oignons espagnols à la récolte, toutes textures de sol confondues. N = Nombre d'observations. Les moyennes présentées sont les valeurs estimées du modèle statistique. Les barres représentent les erreurs-types.

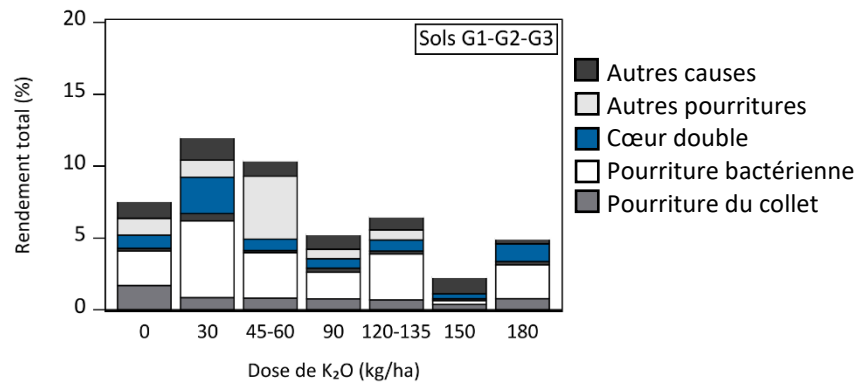


Figure 23. Causes de rejet des oignons espagnols à la récolte en fonction des traitements de fertilisation.

4.2.3.3 Qualité à la récolte

Pour plus d'information sur l'évaluation de la qualité à la récolte, consulter la section 2.2.3.3. Les résultats de l'effet de la fertilisation potassique sur la qualité des oignons à la récolte sont présentés à la Figure 24. Dans le cadre de cette étude, la dose de K₂O a eu tendance à affecter l'occurrence des cœurs doubles, ceux-ci survenant plus fréquemment lors de plus faibles apports ($P = 0,116$). Les autres paramètres de qualité, soit la fréquence de la fusariose, de la pourriture bactérienne et de la pourriture du collet, n'ont pas été affectés par les doses d'engrais potassique. 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 transports 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).

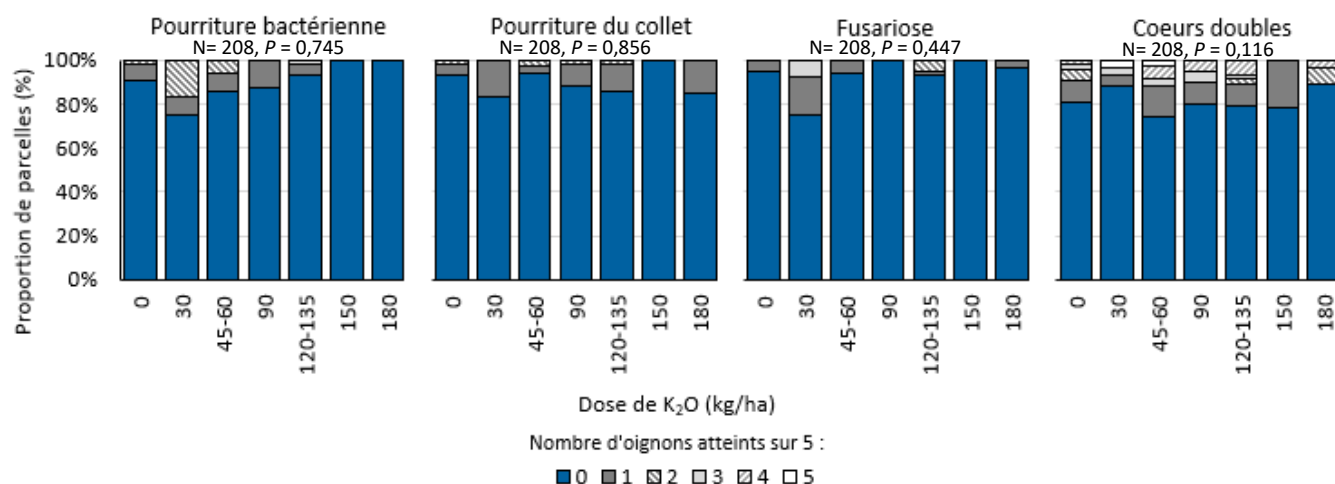


Figure 24. Effet de la dose de K₂O sur la qualité de l'oignon espagnol à la récolte. Nombre d'observations = 208. Pourcentage de parcelles, selon le nombre d'oignons affectés sur 5 oignons de catégorie jumbo tranchés dans chacune.

4.2.3.4 Pertes suivant l'entreposage

Suivant l'analyse exploratoire, 63 % de l'ensemble des données validées des essais K ont également eu des données d'entreposage servant pour l'analyse en entreposage, 27 % avaient des données d'entreposage considérées aberrantes (ex. mauvaises conditions d'entreposage), tandis que 10 % n'ont pas été évalués pour la conservation en entrepôt en raison de la non-disponibilité de structures de stockage sur le site. Les oignons ont été entreposés en moyenne 66 ± 7 jours dans des conditions variées en fonction des sites et des installations disponibles : entrepôt chauffé (8 %), serre chauffée (34 %) ou réfrigération (26 %). Dans une proportion de 31 %, l'information sur le type d'entrepôt était manquante. L'humidité relative a été notée à deux sites, où elle était de 77,5 et 80 %. Ce dernier paramètre est pourtant l'un des plus importants pour assurer le succès de l'entreposage dans cette culture, alors qu'il ne devrait idéalement pas dépasser 75 % (Leblanc, 2004). Une humidité relative supérieure pourrait favoriser les maladies et la reprise de croissance. Quant à la température, elle a varié considérablement, passant de 4 ou 5 °C (35 % des sites) à 22 °C (9 %), alors qu'elle était manquante dans 56 % des cas. Idéalement, elle se situerait entre -1 et 0 °C (Leblanc, 2004). Des conditions d'entreposage inadéquates ont parfois mené à des pourcentages de pertes hors-normes (ex. : > 80 % de rejet) à certains sites, entraînant leur exclusion du jeu de données.

Ainsi, un faible nombre de données validées a fait en sorte que l'effet a été analysé sans tenir compte de la texture du sol. Les résultats de l'analyse sont présentés à la Figure 25. Ceux-ci démontrent que l'augmentation de la dose de K₂O tendait ($P = 0,077$) à diminuer le pourcentage de pertes suivant une période d'entreposage. Toutefois, les pertes diminuent progressivement avec la dose de K₂O, sans que cette différence ne soit significative avant l'apport de 150 kg/ha. Les pertes ont varié, entre les traitements, de 4,5 à 11,9 % pour les doses respectives de 150 et 0 kg K₂O/ha. Les raisons principales des rejets ont été la pourriture bactérienne, la pourriture du collet et le déchirement du disque racinaire. Au Québec, l'oignon espagnol se destine en grande partie au marché frais, ainsi, peu de données existent pour comparer les présents résultats.

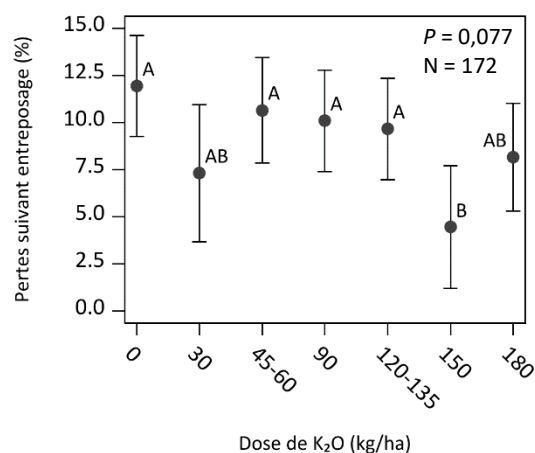


Figure 25. Effet de la dose de K₂O sur les pertes d'oignons espagnols suivant une période d'entreposage.
 N = nombre d'observations. Les moyennes présentées sont les valeurs estimées du modèle statistique. Les moyennes suivies d'une même lettre ne diffèrent pas statistiquement (LSD, $P < 0,1$). Les barres représentent les erreurs-types.

4.2.3.5 Qualité suivant l'entreposage

Les résultats obtenus pour l'effet de la fertilisation potassique sur les critères d'évaluation de la qualité à l'entreposage sont présentés à la Figure 26. Les traitements de fertilisation potassique n'ont pas affecté la grosseur du collet, la rétention des pelures ni la présence de tuniques translucides ($P = 0,97$; $0,99$ et $0,90$, respectivement). Toutefois, le déséquilibre du jeu de données ainsi que sa taille réduite ne permettent pas de conclure hors de tout doute sur l'effet ou sur l'absence d'effet de la fertilisation potassique sur les critères de qualités à l'entreposage.

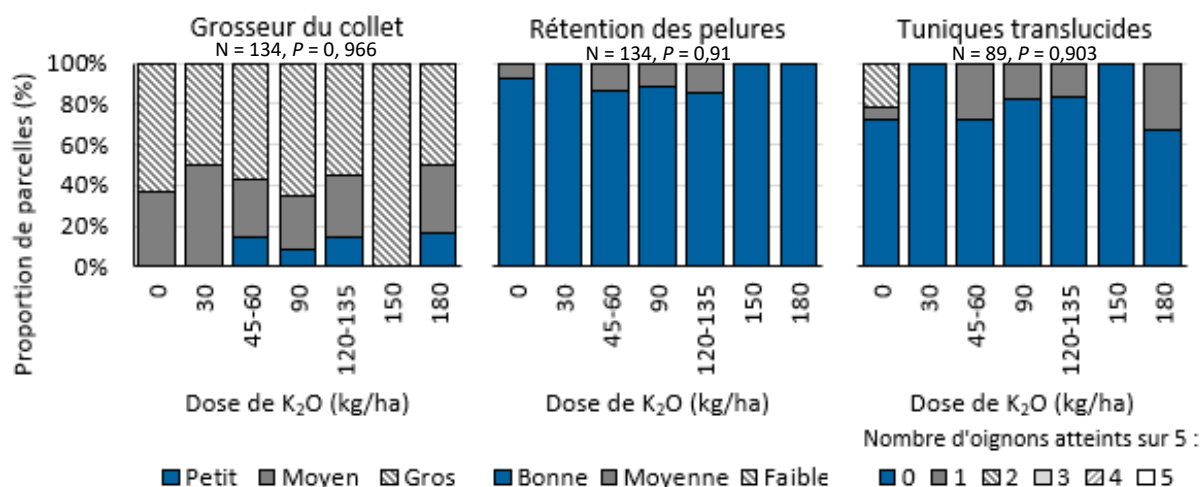


Figure 26. Effet de la dose de K₂O sur la qualité de l'oignon espagnol suivant une période d'entreposage.
 L'évaluation de la qualité a été réalisée avec un échantillon de 5 oignons de catégorie jumbo tranchés. N = nombre d'observations.

4.3 Diagnostic nutritionnel et exportations

À l'instar des essais précédents (N et P), un diagnostic nutritionnel basé sur les rendements et la composition des bulbes d'oignons a été effectué. Les résultats sont présentés au Tableau 20. Les résultats des analyses ont montré une concentration de $1,49 \pm 0,61$ kg K₂O/tonne pour la population de tête.

Les concentrations de K₂O dans les bulbes d'oignon espagnol ont varié de 1,31 à 1,87 kg K₂O/tonne humide. La plus forte concentration a été analysée pour la variété Valero, tandis que la variété SV6672NW F1 montre la plus faible valeur (données non présentées). De manière générale, la concentration en K₂O retrouvée dans la présente étude est plus faible que celle de 2,4 kg K₂O/tonne rapportée dans l'actuel guide du CRAAQ (2010). Toutefois, en Nouvelle-Zélande, Reid et Morton (2019) rapportent une concentration similaire de 1,40 kg K/tonne de matière sèche, correspondant à 1,68 kg K₂O/tonne humide si rapportée à 90 % d'humidité. L'exportation moyenne de la population de tête (Tableau 20), calculée à partir du rendement (bulbes seulement) associé à ce groupe a été de 142 kg K₂O/ha, avec des valeurs variant de 123 à 215 kg/ha. Cette valeur est comparable à celle de 179 kg/ha (160 lb/ac) rapportée dans l'est de l'Oregon (Sullivan et al., 2017). Dans une revue de littérature réalisée sur l'oignon espagnol, Khokhar (2019) rapporte une exportation en K₂O de 144 kg/ha. Pire et al. (2001) rapportent également une exportation de 120 ± 19 kg K₂O/ha par les bulbes d'oignons.

La Figure 27 montre que les exportations de l'oignon espagnol varient de manière considérable avec le rendement et les variétés. Cette figure illustre également la grande variation de rendement existant pour certains cultivars, notamment Valero et Delgado où les rendements totaux ont varié entre $\approx 20\,000$ kg/ha à plus de $100\,000$ kg/ha. Cela traduit que des facteurs autres que la fertilisation ou les cultivars peuvent influencer de manière non négligeable la production de rendement par la plante, et par conséquent, les exportations en éléments nutritifs. 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.

Tableau 20. Concentrations et exportations de potassium des bulbes d'oignons espagnols selon le diagnostic nutritionnel

	Humidité			Exportations ¹			
	(%)	(kg K ₂ O/t humide)		(kg K ₂ O/ha)			
		Moy	Éc-T	Moy	Med	Min	Max
Haut rendement et équilibre nutritionnel (« population de tête »)	90	1,40	0,22	142	138	123	215
Faible rendement et équilibre nutritionnel	88	2,26	0,83	154	144	68	267
Faible rendement et déséquilibre nutritionnel	90	1,60	0,32	65	59	23	208
Haut rendement et déséquilibre nutritionnel	91	1,39	0,12	136	132	125	155

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

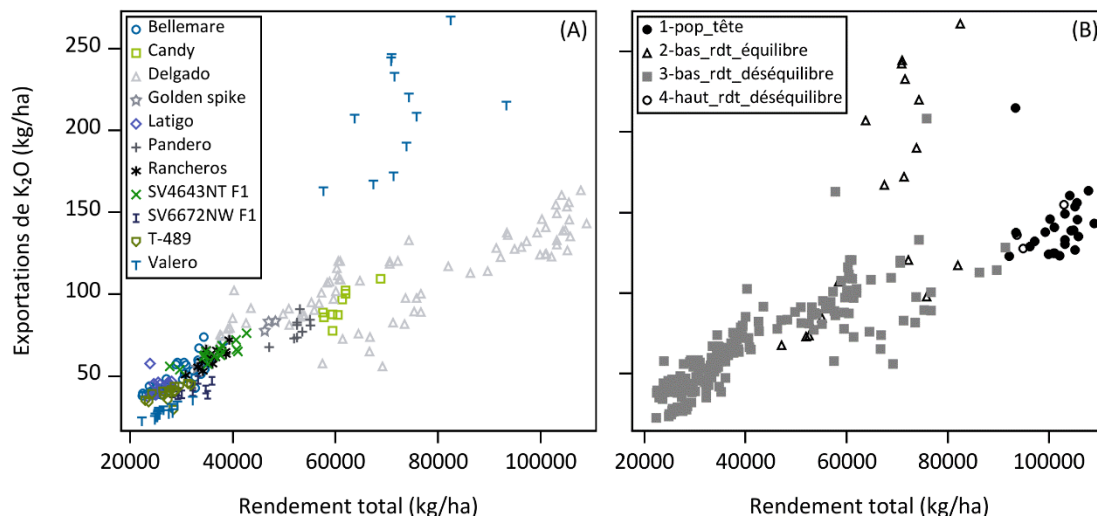


Figure 27. Exportations de K₂O dans les bulbes d'oignons espagnols en fonction des rendements, identifiées selon les variétés (A) et le diagnostic nutritionnel (B).

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

Suivant l'ensemble des analyses, les VSRF présentées dans le Tableau 21 sont proposées pour la fertilisation potassique de l'oignon espagnol en sol minéral sur la base de la teneur en K_{M3} du sol. En raison du faible nombre d'observations dans les sols du groupe de textures G1, aucune VSRF n'a été calculée pour cette catégorie de sols.

Pour les sols des groupes de textures G2 et G3, quatre classes de fertilité ont été déterminées selon la teneur en K_{M3} du sol (Tableau 21). Aucune donnée n'était disponible pour les sols ayant moins de 63 ppm K_{M3} , tandis que seulement deux sites font l'objet de la classe de fertilité suivante (64-84 ppm K_{M3}). Ainsi, il est suggéré de regrouper ces deux catégories pour n'en former qu'une, dans laquelle la plus forte dose testée (180 kg K₂O/ha) est recommandée. Cette dose a été jugée suffisante pour la 1^{ère} classe car elle correspond à 1,3 fois les exportations médianes (138 kg K₂O /ha), ce qui devrait assurer le comblement des besoins nutritifs de la culture dans les sols les moins bien pourvus tout en limitant le risque que le niveau de K_{M3} s'abaisse davantage. Pour la seconde classe, s'ajoute à ce justificatif une tendance ($P = 0.185$) à répondre avec les meilleurs gains (8 %) (intervalles de confiance section 4.2.2) suivant l'apport de cette dose de 180 kg K₂O/ha.

Pour les sols dont la teneur en K_{M3} est comprise entre 85 et 168 ppm, la dose agronomique optimale de 150 kg K₂O/ha a été retenue. Pour la classe de fertilité suivante (de 169 à 252 ppm K_{M3}), une dose de 60 kg K₂O/ha est proposée afin de minimiser les risques de pertes de rendement. Enfin, au-delà du seuil de 252 ppm, l'intervalle de dose allant de 0-30 kg K₂O/ha est proposée. La proposition d'un intervalle de doses se base sur le fait que pour cette catégorie de sol, les teneurs en K du sol sont relativement élevés et représentent au moins 4 $[(252 \times 2,24)/138 \text{ kg K}_{2\text{O}_{\text{exporté}}/\text{ha}}]$ fois la quantité médiane de K₂O exportée par la culture. De ce fait, ces sols semblent présenter un niveau de suffisance quant à la fourniture de K à la plante. Toutefois, dans le cadre de cette étude, le peu de données disponibles dans cette catégorie de sol n'a pas permis de prouver hors de tout

doute l'absence de gain de rendement puisque des gains à fertiliser, les plus élevés de toutes les classes et se situant entre 10 - 13 %, étaient encore mesurés dans cette catégorie de sol.

Pour deux les premières classes de fertilité, où les doses supérieures testées de 180 et de 150 kg K₂O/ha sont proposées, un fractionnement de la dose est suggéré en vue d'assurer une meilleure utilisation de l'engrais par la plante et d'éviter les risques de salinité que pourraient provoquer les engrais potassiques en raison de leur indice relativement élevé de salinité. Dans le cas de l'apport de 150 kg/ha, celui-ci est proposé tel que fractionné dans les essais de fertilisation, soit 100 kg/ha à la transplantation suivi de 50 kg/ha au stade 5 à 7 feuilles. L'apport de 180, quant à lui, a été testé en deux combinaisons différentes de fractionnements, soit [150 + 30] et [130 + 50] kg/ha. Dans le cadre des VSRF, afin de favoriser la synchronisation des apports avec les prélèvements de la culture et pour diminuer le risque de salinité, l'apport de 130 kg K₂O/ha à la transplantation suivi de 50 kg/ha au stade 5 à 7 feuilles a été préconisé.

De manière générale, ces recommandations (30 à 180 kg K₂O/ha) sont similaires aux recommandations actuelles du CRAAQ (2010), exception faite de la classe de fertilité regroupant les sols ayant entre 85 et 168 ppm de K_{M3}. Elles 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 22). 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 21. Fertilisation potassique de l'oignon espagnol – Valeurs scientifiques de référence en fertilisation

Groupe de textures ¹	Classe de fertilité K _{M3} (ppm) ²	Période d'application	Fractionnement	VSRF ³ (kg K ₂ O/ha)
G2, G3 (G1) ⁴	≤ 63	À la transplantation, incorporé	(100)	(180) ⁵
		Stade 5 – 7 feuilles, incorporé	(80)	
	64 – 84	À la transplantation, incorporé	100	180 ⁶
		Stade 5 – 7 feuilles, incorporé	80	
	85 – 168	À la transplantation, incorporé	100	150 ⁷
		Stade 5 – 7 feuilles, incorporé	50	
	169 – 252	À la transplantation, incorporé	-	60 ⁶
	> 252	À la transplantation, incorporé	-	0-30 ⁷

¹ G1 : sols à texture fine ; G2 : sols à texture moyenne ; G3 : sols à texture grossière.

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

³ VSRF : Valeur scientifique de référence en fertilisation.

⁴ Les sols G1 ont été regroupés avec les sols G2 et G3. Les données en quantité insuffisante ne permettaient pas de créer une classe spécifique à ces sols. Les VSRF ont été déterminées uniquement sur la base des sols G2 et G3.

⁵ En l'absence de données dans cette catégorie de sols, dose proposée correspondante à la dose optimale pour les sols ayant entre 63 et 84 ppm K_{M3} étant donné que celle-ci couvrent 1.3 fois les exportations.

⁶ Dose agronomique optimale dans cette catégorie de sols considérant les intervalles de confiance.

⁷ Dose agronomique optimale dans cette catégorie de sols. La proposition de réduire l'apport en K₂O jusqu'à une dose nulle se base sur le fait que pour cette catégorie, les teneurs en K_{M3} du sol sont relativement élevées et représentent au moins 4 fois la quantité moyenne de K₂O exportée par la culture, traduisant un certain niveau de suffisance du sol quant à la fourniture de K à la plante.

Absence de données sous 63 ppm de K_{M3} pour le groupe de textures G2-G3

Dans le cadre des essais K du PSEF, aucune donnée n'était disponible pour les sols ayant moins de 63 ppm de K_{M3} . Ainsi, la dose de 180 kg K_2O /ha est proposée en vue de regrouper cette catégorie de sols avec la catégorie suivante (64 à 84 ppm de K_{M3}). Cette dose a été jugée suffisante car elle correspond à 1,3 fois les exportations médianes (138 kg K_2O /ha, section 4.3), ce qui devrait assurer le comblement des besoins nutritifs de la culture dans les sols les moins bien pourvus tout en limitant le risque que le niveau de K_{M3} s'abaisse davantage.

Absence de VSRF pour le groupe de textures G1

En raison de données en quantité insuffisante, aucune VSRF n'a pu être émise pour les sols du groupe G1. Il est attendu que peu de productions d'oignon espagnol soit cultivés dans ces sols, ce qui pourrait expliquer le faible nombre de site en sol G1. En effet, l'oignon espagnol est une culture qui se prête moins aux sols lourds pour plusieurs raisons, notamment le réchauffement plus lent des sols G1 au printemps alors que la culture a besoin d'une longue saison de croissance. Ainsi, afin de compléter la recommandation, nous suggérons d'étendre les VSRF calculées sur la base des essais en sols G2-G3 à toutes les textures de sol.

Fractionnement des doses élevées de potassium



Dans le cadre de la réalisation des essais, la dose de 180 kg K_2O /ha a été testée selon deux fractionnements différents durant les années, soit [130 + 50] ou [100 + 80], répartis entre la transplantation et le stade 5-7 feuilles. La répartition [100 + 80] a été favorisée afin de maximiser le synchronisme entre les apports et les prélèvements par la plante.

Ajout d'une dose intermédiaire

Afin de diminuer l'écart entre les doses consécutives de 150 et de 60 kg K_2O /ha, une classe intermédiaire regroupant les sols ayant entre 135-230 ppm de K_{M3} pourrait être proposée. La dose de 90 kg K_2O /ha pourrait y être suggérée. Cette classe intermédiaire a été déterminée en se basant sur l'étude détaillée de la réponse de la culture à la fertilisation potassique sur cette plage de valeur de K_{M3} des sols, combinée à la consultation des ANOVA par site de chaque essai pris séparément. Le choix de cette dose est entre autres appuyé par le fait que les deux sites se trouvant dans cette classe de fertilité présentent une dose optimale de 90 kg K_2O /ha (données non présentées). La grille deviendrait ainsi :

Classe de fertilité K_{M3} (ppm)	VSRF (kg K_2O /ha)
< 84	180
85 - 134	150
135 - 230	90
231 - 252	60
> 252	0-30

VSRF : Valeur scientifique de référence en fertilisation.

Fertilisation potassique des sols ayant plus de 252 ppm de K_{M3}



Dans les sols ayant plus de 252 ppm de K_{M3} , un intervalle de doses 0 - 30 kg K_2O /ha est proposé. D'une part, les teneurs en K du sol sont relativement élevées et représentent au moins 4 [(252 × 2,24) / 142 kg $K_2O_{\text{exporté}}$ /ha] fois la quantité moyenne de K_2O exportée par la culture. De ce fait, ces sols semblent présenter un niveau de suffisance quant à la fourniture de K à la plante. Toutefois, dans le cadre de cette étude, le peu de données disponibles dans cette catégorie de sol n'a pas permis de prouver hors de tout doute l'absence de gain de rendement puisque des gains à fertiliser, les plus élevés de toutes les classes et se situant entre 10-13%, étaient encore mesurés dans cette catégorie de sol

Tableau 22. Comparaison des recommandations en K_2O pour la production d'oignon espagnol en sol minéral en Amérique du Nord

Provinces/États	Mode et période d'application	Fractionnement	Indicateurs		Dose K_2O (kg/ha)	Source
			Fertilité du sol	Autres		
Québec (CAN)	-	-	0-45 ppm K_{M3}	-	185	CRAAQ (2010)
			46-89		160	
			90-134		125	
			135-179		95	
			180-223		65	
			224-268		40	
			269 et +		20	
Ontario (CAN)	-	-	K du sol (K acétate d'ammonium)	-	0-230	MAAARO (2011)
Alberta (CAN)	À la volée avant le semis et incorporé ou en bande au semis	non	-	-	76-198	Alberta Agriculture and Rural Development (2014)
Michigan (É-U)	À la volée avant le semis et incorporé	Appliquer 20 kg/ha de K_2O pour une application en bande au semis et les reste en post levée	K du sol (K acétate d'ammonium)	CEC du sol	0-212	Warncke et al. (2004)
Mid-Atlantic (É-U)	À la volée et incorporé	non	K du sol (K_{M3})	-	0-224	Virginia Cooperative Extension (2018)
Nouvelle Angleterre (É-U)	À la volée et incorporé	non	K du sol	-	0-196	University of Massachusetts Amherst (2021)
Nord-ouest pacifique (É-U)	À la volée avant le semis et incorporé	Si sol très sableux	K du sol (K bicarbonate de sodium, Olsen)	-	0-269	Sullivan et al. 2001
Nouvelle Zélande	-	-	-	-	0 Une application d'entretien peut être nécessaire	Reid et Morton (2019)
Pennsylvanie (É-U)	En bande à la plantation	non	-	-	90	Sanchez et al. 2020
	À la volée avant la plantation				179	

Dans le but d'homogénéiser les unités et faciliter les comparaisons, les coefficients suivants ont été utilisés lorsque nécessaire : 1 ppm = 2,24 kg/ha ; 1 lb/ac = 1,12 kg/ha ; 1 ac = 0,404 69 ha.

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 espagnol cultivé en sol minéral, en plus de mettre à jour les classes de fertilité et doses optimales d'apports des éléments majeurs pour cette culture. Ces recommandations reposent sur l'analyse des données validées d'expérimentations scientifiques québécoises réalisées au champ, appuyée de l'expertise agronomique et de principes scientifiques reconnus dans le domaine de la nutrition des cultures. Pour les éléments azote et phosphore, en raison de la faible réponse à la fertilisation observée pour l'oignon espagnol, des réductions substantielles ont été apportées par rapport à la grilles actuelles du CRAAQ (2010), et ce, sans risques de pertes de rendements ou de détérioration de la qualité des bulbes. Toutefois, pour le potassium, les doses optimales proposées demeurent similaires à celles des grilles antérieures (CRAAQ, 2010). Dans l'ensemble, pour les trois éléments (N, P et K) à l'étude, les résultats des analyses complémentaires ont montré peu d'effet significatif de la fertilisation sur les critères d'évaluation de la qualité des bulbes et les pertes de rendement mesurées à la récolte et à l'entreposage. Le climat, les conditions d'humidité prévalant au champ et les conditions locales d'entreposage ont été des facteurs largement plus déterminants que la fertilisation.

Désormais, les apports azotés sont modulés sur la base de la richesse en matière organique du sol. De même, la fertilisation phosphatée est précisée par le groupe de textures du sol et son indice de saturation en P (ISP_1). En effet, la texture du sol influence grandement le dynamisme et la biodisponibilité du P, tandis que l' ISP_1 est reconnu pour être un meilleur indicateur agroenvironnemental de la biodisponibilité du P que la concentration du P considérée seule. Par conséquent, la considération du groupe de textures des sols est une amélioration importante et complémentaire à l'utilisation des seuils critiques environnementaux du REA conformément à la réglementation en vigueur, aussi intégrés dans les recommandations de l'IRDA. Enfin, un biais important a été corrigé pour l'indicateur de fertilité du sol en potassium (K) par l'usage de la concentration du sol en ppm telle que mesurée par le laboratoire, plutôt que de la valeur convertie en kg/ha obtenue par calcul avec le facteur de conversion de 2,24. Les travaux de l'IRDA permettront aux acteurs du milieu agricole de bénéficier de recommandations propres aux sols et au climat québécois, permettant de mieux concilier la productivité et la conservation des ressources.

6. FERTILISATION DE L'OIGNON ESPAGNOL

VALEURS SCIENTIFIQUES DE RÉFÉRENCE EN FERTILISATION

AZOTE				
Groupe de textures	Classe de fertilité MO _{PAF} (%)	Période d'application	Fractionnement	VSRF (kg N/ha)
G1 ¹ , G2, G3	≤ 3,0	À la transplantation, incorporé	50	80
		Stade 5 -7 feuilles, incorporé	30	
	> 3,0	À la transplantation, incorporé	-	40 ²

PHOSPHORE				
Groupe de textures	Classe de fertilité ISP ₁ (%)	Période d'application		VSRF (kg P ₂ O ₅ /ha)
G1	≤ 7,6	À la transplantation, incorporé		45
	7,7 – 15,2			(30) ⁴
	>15,2			0
G2, G3	(≤ 5,0) ³	À la transplantation, incorporé		(60) ⁴
	(5,1) – 13,1			45
	13,2 – 26,2			30
	>26,2			0

POTASSIUM				
Groupe de textures	Classe de fertilité K _{M3} (ppm)	Période d'application	Fractionnement	VSRF (kg K ₂ O/ha)
G1 ¹ , G2, G3	(≤ 63) ³	À la transplantation, incorporé	100	180 ⁵
		Stade 5 – 7 feuilles, incorporé	80	
	(64) – 84	À la transplantation, incorporé	100	180
		Stade 5 – 7 feuilles, incorporé	80	
	85 – 168	À la transplantation, incorporé	100	150
		Stade 5 – 7 feuilles, incorporé	50	
	169 – 252	À la transplantation, incorporé	-	60
	> 252	À la transplantation, incorporé	-	0-30 ⁶

Abréviations : G1 : sols de texture fine ; G2 : sols de texture moyenne ; G3 : sols de texture grossière ; MO_{PAF} : matière organique par perte au feu ; VSRF : Valeur scientifique de référence en fertilisation ; ISP : indice de saturation (P/Al)_{Mehlich-3} ; K_{M3} : K extrait au Mehlich-3.

Dans le cadre de cette étude, les engrais ont été appliqués en bande pour la plupart, ce qui a pu favoriser une meilleure efficacité d'utilisation des engrais.

Les exportations moyennes sur un hectare de la culture à l'équilibre nutritionnel et à haut rendement sont de 100 kg N, 55 kg P₂O₅ et 142 kg K₂O. Ces valeurs considèrent l'exportation des bulbes uniquement, le feuillage demeurant généralement au champ lors des récoltes.

¹ Les sols G1 ont été regroupés avec les sols G2 et G3. Les données en quantité insuffisante ne permettaient pas de créer des classes de fertilité spécifiques à ces sols. Les VSRF ont été déterminées uniquement sur la base des sols G2 et G3.

² Dans le cadre de cette étude, les doses de N ont été testées en bande. Ainsi, si l'application des engrais est faite à la volée et surtout si ceux-ci sont laissés en surface, un rehaussement des doses proposées pourrait être nécessaire en vue d'assurer une bonne nutrition de la culture.

³ Les seuils de classe de fertilité entre parenthèses sont des limites du jeu de données et ne constituent pas un seuil agronomique de réponse.

⁴ Les VSRF entre parenthèses sont le résultat de considérations basées sur les exportations en P₂O₅ de la culture.

⁵ En l'absence de données dans cette catégorie de sols, la dose proposée correspond à la dose optimale pour les sols ayant de 63 à 84 ppm K_{M3} étant donné que celle-ci couvrent 1,3 fois les exportations.

⁶ Dose agronomique optimale dans cette catégorie de sols. La proposition de réduire l'apport en K₂O jusqu'à une dose nulle se base sur le fait que pour cette catégorie, les teneurs en K_{M3} du sol sont relativement élevées et représentent au moins 4 fois la quantité moyenne de K₂O exportée par la culture, traduisant un certain niveau de suffisance du sol quant à la fourniture de K à la plante.



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 présentées dans ce document, en raison de la prise en compte de considérations agronomiques ou techniques autres que les données des présents essais.

Remerciements

L'équipe de l'IRDA tient à remercier d'une manière spéciale les divers intervenants, les producteurs et spécialistes pour leur collaboration facilitant la prise en compte des contraintes et des pratiques culturelles de la culture de l'oignon espagnol.

7. RÉFÉRENCES

- Abdissa, Y., Tekalign, T. et Pant, L. M. (2011). Growth, bulb yield and quality of onion (*Allium cepa* L.) as influenced by nitrogen and phosphorus fertilization on vertisol I. growth attributes, biomass production and bulb yield. *African Journal of Agricultural Research*, 6(14), 3252-3258.
- Amare, G. (2020). Review on Mineral Nutrition of Onion (*Allium cepa* L). *The Open Biotechnology Journal*, 14(1), 134-144.
- Anderson, C. et Schumacker, R. E. (2003). A comparison of five robust regression methods with ordinary least squares regression: Relative efficiency, bias, and test of the null hypothesis. *Understanding Statistics: Statistical Issues in Psychology, Education, and the Social Sciences*, 2(2), 79-103.
- 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. *Journal of Food Science and Nutrition*, 01(02).
- Bélangier, 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. <https://doi.org/10.2134/jeq2003.6070>
- Black, C. A. (1993). Soil Fertility Control and Evaluation. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.
- Boyhan, G. E., Coolong, T., Dutta, B., Sparks, S., Riley, D., Culpepper, A. S., Hurst, W. C. et Fonsah, E. G. (2017). *Onion production guide* (édité par Fort Valley State University et U.S. Department of Agriculture). University of Georgia. https://secure.caes.uga.edu/extension/publications/files/pdf/B_1198_3.PDF
- Boyhan, G. E., Torrance, R. L., Cook, J., Riner, C. et Hill, C. R. (2009). Sowing date, transplanting date, and variety effect on transplanted short-day onion production. *HortTechnology*, 19(1), 66-71.
- 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.
- Brady, N. C. (1990). Soil reaction: acidity and alkalinity. Dans *The nature and properties of soils*. (10^e éd., p. 189-222). Macmillan Publ. Co.
- Brewster, J. L. (2008). *Onions and Other Vegetable Alliums* (2nd éd., vol. 88; édité par J. Atherthon et A. Rees).
- Brewster, J. L. et Butler, H. A. (1989). Effects of nitrogen supply on bulb development in onion *Allium cepa* L. *Journal of Experimental Botany*, 40(10), 1155-1162.
- Brown, B. (2000). Onions. Southern Idaho Fertilizer Guide. CIS 1081.
- 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.
- Buckland, K., Reeve, J. R., Alston, D., Nischwitz, C. et Drost, D. (2013). Effects of nitrogen fertility and crop rotation on onion growth and yield, thrips densities, Iris yellow spot virus and soil properties. *Agriculture, ecosystems & environment*, 177, 63-74.
- Cate, R. et Nelson, L. (1971). A Simple Statistical Procedure for Partitioning Soil Test Correlation Data Into Two Classes. *Soil Science Society of America Journal*, 35(4), 658-660.
- Centre de Référence en Agriculture et Agroalimentaire du Québec. (2003). *Guide de référence en fertilisation*. Sainte-Foy, Québec: Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du
- Cope, J. T., Rouse, R. D., Walsh, L. M. et Beaton, J. D. (1973). Interpretation of soil test results. *Soil testing and plant analysis*, 35-54.

- CRAAQ. (2010). *Guide de référence en fertilisation. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec* (2e éd.). Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec, Commission chimie et fertilité des sols, Québec, Canada.
- 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.
- FADQ. (2000). *Rendements de référence 2000 en assurance récolte*. Financière agricole du Québec. <https://www.fadq.qc.ca/fileadmin/fr/statistiques/assurance-recolte/rendements-references-2000.pdf>
- FADQ. (2001). *Rendements de référence 2001 en assurance récolte*. Financière agricole du Québec. <https://www.fadq.qc.ca/fileadmin/fr/statistiques/assurance-recolte/rendements-references-2001.pdf>
- Fulford, A. M. et Culman, S. W. (2018). Over-fertilization does not build soil test phosphorus and potassium in Ohio. *Agronomy Journal*, 110(1), 56-65.
- Garg, K. P. et Welch, L. F. (1967). Growth and Phosphorus Uptake by Corn as Influenced by Phosphorus Placement 1. *Agronomy Journal*, 59(2), 152-154.
- Giroux, M., Cantin, J., Rivest, R. et Tremblay, G. (2002). *Évolution des teneurs en phosphore de sols selon la fertilisation, les rotations de cultures et les types de sols*. (p. 19).
- Giroux, M. et Royer, R. (2007). Effets à long termes des applications de phosphore sur les rendements, l'évolution des teneurs, de la saturation et de la solubilité du P dans deux sols très riches. *Agrosolutions*, 18(1), 17-24.
- Grant, C. A., Flaten, D. N., Tomaszewicz, D. J. et Sheppard, S. C. (2001). The importance of early season phosphorus nutrition. *Canadian Journal of Plant Science*, 81(2), 211-224.
- Hubert, M. et Debruyne, M. (2010). Minimum covariance determinant. *Wiley Interdisciplinary Reviews Computational Statistics*, 2(1), 36-43.
- Institut de la statistique du Québec. (2020). *Superficie des grandes cultures et production, par regroupement de régions agricoles, Québec, 2007-2019*. <https://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/agriculture/grandes-cultures/grandes-cultures-2007-2019.html>
- IRDA. (2021). Institut de recherche et développement en agroenvironnement. Package cnd version 1.2, `cndMethodRobustIrda.R`, [lien GitHub à venir].
- Jha, A. K., Pal, N. et Singh, N. (2000). Phosphorus uptake and its utilization by onion varieties at different stages of growth. *Indian Journal of Horticulture*, 57(4), 347-350.
- 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., 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.
- Khokhar, K. M. (2019). Mineral nutrient management for onion bulb crops—a review. *Journal of Horticultural*

Science and Biotechnology, 94(6), 703-717. <https://doi.org/10.1080/14620316.2019.1613935>

Leblanc, M. (2004). *Oignon espagnol : guide de production*.

<https://www.agrireseau.net/documents/63858/oignon-espagnol-guide-de-production>

MAPAQ. (2020). *Portrait diagnostique sectoriel de l'industrie des grains au Québec*.

<https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Publications/Monographiegrain.pdf>

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.

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.

OMAFRA. (2010). *Vegetable Production Recommendations 2010-2011—Publication 363*. Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario.

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., 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, L., Pellerin, A. et Khiari, L. (2002). Le flux et la dynamique du phosphore dans les sols agricoles québécois. Colloque sur le phosphore.

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*. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fpls.2013.00449>

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., Ramírez, H., Riera, J. et Norma Gómez De, T. (2001). Removal of N, P, K and CA by an onion crop (*Allium cepa* L.) in a silty-clay soil, in a Semiarid region of Venezuela. *Acta Horticulturae*, 555(September 2014), 103-109.

Reid, J. B. et Morton, J. (2019). *Nutrient management for vegetable crops in New Zealand*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2401910>

Sanchez, E., Ford, T., Lynn, K., Harper, J. et Orzolek, M. (2020). *Onion production*. PennState Extension. <https://extension.psu.edu/onion-production>

SAS Institute inc. (2018). SAS/STAT® 15.1 User's guide. SAS Institute inc.

Shock, C., Feibert, E. et Saunders, L. (2012). *Onion Variety Response to Plant Population and Irrigation System*.

Singh, R. B. et Singh, S. B. (2000). Significance of nitrogen, phosphorus and potassium on onion (*Allium cepa* L.)

raised from onion sets (bulblets). *Vegetable Science*, 27(1), 88-89.

Sullivan, D., Brown, B. D., Shock, C. C., Horneck, D. a., Stevens, R. G., Pelter, G. Q. et Feibert, E. B. G. (2001). Nutrient Management for Onions in the PNW. *A Pacific Northwest Extension Publication, PNW 546*(February).

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.

ANNEXE I

Sommaire des données exclues de l'analyse et justifications

Site	Donnée exclue	Raison justifiant l'exclusion
2	Essai N : 204 Essai P : 212, 216 Essai K : 207	Chute anormale du rendement par rapport aux autres traitements du même bloc. Parcelles présentant une faible densité de population entraînant un faible rendement. Parcelle présentant une faible densité de population entraînant un faible rendement.
3	Essai N : 116 et bloc 3	Forte pression des mauvaises herbes entraînant un faible rendement.
5	Essai N : bloc 2 Site complet : Biomasse foliaire	Patron de rendements irrégulier (rendements en W). Important déclassement à la récolte dû aux maladies par pourritures bactériennes, sans lien apparent avec la fertilisation. Faible pression de maladie fongique foliaire.
6	Essai N Essai K : 105 Site complet : données d'entreposage	Patrons de rendement irréguliers dans les trois répétitions (patron de rendement en W, grands écarts entre les traitements; CV de 81 % pour le témoin). Plusieurs données manquantes. Rendement anormalement faible (CV de 49 % sur le rendement vendable). Conditions d'entreposage inadéquates entraînant le déclassement de 30 à 50 % des oignons.
7	Essai P : parcelle 304 Site complet : données d'entreposage	Rendement anormalement élevé (CV de 39 %). Mauvaises conditions d'entreposage entraînent le déclassement de 40 à 60 % des oignons des trois essais.
8	Site complet	Forte présence de la teigne du poireau affectant la qualité de la récolte
9	Essai P : 103	Forte présence de la teigne du poireau affectant la qualité de la récolte Différence importante quant à la hauteur des plants des rangs 2 et 3. Plus grande variation de la hauteur des plants sur le rang 2.
10	Essai N : 207 Essai K : bloc 2	Forte présence de mauvaises herbes entraînant une chute drastique du rendement dans cette parcelle. Rendement anormalement faible du témoin, patron de rendements irrégulier.
12	Site complet : données d'entreposage	Pour certaines parcelles, le poids du sac après l'entreposage est supérieur au poids du sac avant l'entreposage. La cause a été investiguée mais demeure inconnue.
13	Site complet : données d'entreposage	Pour certaines parcelles, le poids du sac après entreposage est supérieur au poids du sac avant l'entreposage. La cause a été investiguée mais demeure inconnue.
14	Essai P blocs 1, 2 et 3 Essai P, bloc 1 : T2, T3 et T5	Problème de pente causant une accumulation d'eau dans le bas du dispositif. Observations uniques pour les doses de 30, 60 et 120 kg/ha causant un déséquilibre du jeu de données.
16	Essai N : 101, 201, 301	Accumulation d'eau en bas du dispositif.
18	Site complet : données d'entreposage	Période d'entreposage trop longue comparée aux autres essais et mauvaises conditions d'entreposage.
19	Essai K : 204, 302 Essai P : 309	Rendements anormalement faibles par rapport aux autres traitements, CV de 38 %. Rendement anormalement faible par rapport aux autres traitements, CV de 29 %.
20	Essai K : 213, 215	Rendements faibles par rapport aux autres essais. Problème au niveau du patron du dispo
23	Essai K	Site avec des observations uniques pour les doses de 15 et de 30 kg K ₂ O/ha dans les sols G2-G3, causant un déséquilibre du jeu de données.
24	Site complet : données d'entreposage	Survie de 10-20%, conditions d'entreposage non adéquates.