INSTITUT DE RECHERCHE
ET DE DÉVELOPPEMENT
EN AGROENVIRONNEMENT

FERTILISATION DE LA CITROUILLE EN SOL MINÉRAL

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

FASCICULE 07 : Citrouille

Version finale

Responsable du projet :	Christine Landry
Auteures :	Christine Landry, Claude-Alla Joseph, Stéphanie Houde et Julie Forest-Drolet.
Collaborateurs :	Simon Guillemette, Mandela M. Jacques, Julie Mainguy, Mylène Marchand, Gabrielle Chevrier, Maude Langelier, Lélia Anderson, Olivier Breton-Bourgault, Anaïs Charles, Mélissa Paradis, Michèle Grenier, Olivier Slupik, Anne-Mary Le Guennec, Catherine Bossé, Maude Lapointe.
Produit pour :	Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation
Date :	Octobre 2022

Fertilisation de la citrouille. Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation du Québec (2020-2023). Fascicule 07 : Citrouille.

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

LE RAPPORT PEUT ÊTRE CITÉ COMME SUIT :

Landry, C., C.-A. Joseph, S. Houde et J. Forest-D. 2022. Fertilisation de la citrouille. Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation du Québec (2020-2023). Fascicule 07. Présenté au ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation. 67 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	Simon Guillemette, M. Sc. Mandela M. Jacques, M. Sc. Lélia Anderson, agr., M. Sc. B. Ing. Olivier Breton-Bourgault, agr. Mélissa Paradis, M. Sc. Julie Desautels, 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

PARTENARIAT CANADIEN pour l'AGRICULTURE

Canada Québec

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 vérifier la possibilité de bonifier la base de données avec les travaux d'autres équipes de recherche québécoises ou de régions pédoclimatiques compatibles, lorsque possible. Un vaste travail de recherche a permis l'envoi de dizaines de requêtes visant la récupération et la valorisation de travaux antérieurs. Les documents reçus à l'issue de cette démarche ont été validés et homogénéisés. Les données utiles ont été extraites et intégrées à la base de données, sur approbation des expéditeurs. Ultimement, ce sont les calculs aux fins de la révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation (VSRF) qui bénéficieront de cette démarche à grande échelle. Dans un troisième volet du MIRVRF, des essais au champ supplémentaires 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 précédent mandat octroyé à l'IRDA (Mandat *Plan de révision des grilles de référence en fertilisation du Québec*, 2017-2020). Le dernier volet du MIRVRF consistait à déterminer les indicateurs et les intervalles des classes de fertilité de sol, ainsi que les valeurs scientifiques de référence en fertilisation (VSRF) qui leur sont associées, pour les cultures sélectionnées.

Les nouvelles classes de sol et leurs VSRF associées, ainsi que des pistes de réflexion lorsqu'une absence de données 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 chercheure Christine Landry sur le site web de l'IRDA, où se retrouvent l'ensemble des publications, à cette adresse :
https://irda.qc.ca/fr/publications/?r=1745&t=1411#documents

NOTE AU LECTEUR

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

TABLE DES MATIÈRES

1. PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES ESSAIS ET DES ANALYSES 10

1.1 PROVENANCE DES DONNÉES 10
1.2 LOCALISATION DES SITES 11
1.3 PROPRIÉTÉS PHYSICO-CHIMIQUES DES SOLS 11
1.4 DISPOSITIFS EXPÉRIMENTAUX ET TRAITEMENTS 12
1.4.1 DISPOSITIFS 12
1.4.2 TRAITEMENTS 13
1.5 RENDEMENTS 16
1.6 ASPECTS ADDITIONNELS POUR L'INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS 18
1.6.1 VARIÉTÉ CULTURALE 18
1.6.2 PRÉCÉDENT CULTURAL 19
1.6.3 IRRIGATION 19
1.7 ANALYSE EXPLORATOIRE 19
1.8 CALCULS ET ANALYSES STATISTIQUES 20
1.8.1 DÉTERMINATION DES CLASSES DE FERTILITÉ DES SOLS 21
1.8.2 DÉTERMINATION DES DOSES OPTIMALES DE FERTILISANTS 22
1.8.3 DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL ET QUANTITÉS D'ÉLÉMENTS NUTRITIFS EXPORTÉS 23
1.8.4 ANALYSE SUR LES PERTES À LA RÉCOLTE 25

2. FERTILISATION AZOTÉE 26

2.1 PORTRAIT ET REPRÉSENTATIVITÉ DES DONNÉES 26
2.2 DÉTERMINATION DES DOSES AGRONOMIQUES OPTIMALES 26
2.2.1 RECHERCHE D'INDICATEURS DE FERTILITÉ DU SOL 26
2.2.2 EFFET DE LA DOSE D'AZOTE SUR LE RENDEMENT TOTAL 27
2.2.3 EFFET DE LA DOSE D'AZOTE SUR LES PERTES À LA RÉCOLTE 30
2.3 DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL ET EXPORTATIONS EN AZOTE 31
2.4 NITRATE RÉSIDUEL À LA RÉCOLTE 32
2.5 FERTILISATION AZOTÉE PROPOSÉE ET COMPARAISON AVEC LES RECOMMANDATIONS AU CANADA ET À L'ÉTRANGER 34

3. FERTILISATION PHOSPHATÉE 39

3.1 PORTRAIT ET REPRÉSENTATIVITÉ DES DONNÉES 39
3.2 DÉTERMINATION DES DOSES AGRONOMIQUES OPTIMALES 39
3.2.1 RECHERCHE D'INDICATEURS DE FERTILITÉ DU SOL 39
3.2.2 ÉTUDE DE L'EFFET DE LA DOSE DE PHOSPHORE SUR LE RENDEMENT TOTAL 40
3.2.3 EFFET DE LA DOSE DE PHOSPHORE LES PERTES À LA RÉCOLTE 42
3.3 DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL ET EXPORTATIONS EN PHOSPHORE 44
3.4 FERTILISATION PHOSPHATÉE PROPOSÉE ET COMPARAISON AVEC LES RECOMMANDATIONS AU CANADA ET À L'ÉTRANGER 45

4. FERTILISATION POTASSIQUE 49

4.1 PORTRAIT ET REPRÉSENTATIVITÉ DES DONNÉES 49
4.2 DÉTERMINATION DES DOSES AGRONOMIQUES OPTIMALES 49
4.2.1 RECHERCHE D'INDICATEURS DE FERTILITÉ DU SOL 49
4.2.2 EFFET DE LA DOSE DE POTASSIUM SUR LE RENDEMENT TOTAL 50
4.2.3 EFFET DE LA DOSE DE POTASSIUM LES PERTES À LA RÉCOLTE 52
4.3 DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL ET EXPORTATIONS EN POTASSIUM 53
4.4 FERTILISATION POTASSIQUE PROPOSÉE ET COMPARAISON AVEC LES RECOMMANDATIONS AU CANADA ET À L'ÉTRANGER 55

5. CONCLUSION 59

6. FERTILISATION DE LA CITROUILLE — VALEURS SCIENTIFIQUES DE RÉFÉRENCE EN FERTILISATION 61

REMERCIEMENTS 62

7. RÉFÉRENCES 63

ANNEXE I 66

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Description sommaire des sites des essais de fertilisation de la citrouille 10

Tableau 2. Description des traitements des essais de fertilisation azotée 14

Tableau 3. Description des traitements des essais de fertilisation phosphatée 15

Tableau 4. Description des traitements des essais de fertilisation potassique 16

Tableau 5. Statistiques descriptives sur les données non validées (avant l'analyse exploratoire) des rendements en citrouilles des essais N, P et K 17

Tableau 6. Variétés culturales ayant fait l'objet des essais N, P et K de citrouille 19

Tableau 7. Bilan de la validation des données à l'issue de l'analyse exploratoire 20

Tableau 8. Répartition des blocs des essais N pour différentes classes de propriétés de sol après la validation des données 26

Tableau 9. Valeurs critiques des indicateurs de sol significatifs selon les tests de Cate-Nelson pour les essais N de citrouilles 27

Tableau 10. Concentrations et exportations en N selon les variétés de citrouille 31

Tableau 11. Concentrations et exportations en N selon le diagnostic nutritionnel 32

Tableau 12. Fertilisation azotée de la citrouille – Valeurs scientifiques de référence en fertilisation 36

Tableau 13. Comparaison des recommandations en N pour la production de la citrouille au Canada et à l'étranger 38

Tableau 14. Répartition des blocs des essais P selon différentes classes de propriétés de sol après la validation des données 39

Tableau 15. Valeurs critiques des indicateurs potentiels de sols significatifs selon les tests de Cate-Nelson pour les essais P de la citrouille 40

Tableau 16. Concentrations et exportations en P_2O_5 selon les variétés de citrouille 44

Tableau 17. Concentrations et exportations en P_2O_5 selon le diagnostic nutritionnel 45

Tableau 18. Fertilisation phosphatée de la citrouille – Valeurs scientifiques de référence en fertilisation 47

Tableau 19. Comparaison des recommandations en P_2O_5 pour la production de citrouille au Canada et à l'étranger 48

Tableau 20. Répartition des blocs des essais K selon différentes classes de propriétés de sol après la validation des données 49

Tableau 21. Valeurs critiques des indicateurs de sols significatifs selon les tests de Cate-Nelson pour les essais K dans la citrouille 50

Tableau 22. Concentrations et exportations en K_2O selon les variétés de citrouille 53

Tableau 23. Concentrations et exportations de potassium en fonction du diagnostic nutritionnel 54

Tableau 24. Fertilisation potassique de la citrouille – Valeurs scientifiques de référence en fertilisation 57

Tableau 25. Comparaison des recommandations en K_2O pour la production de citrouilles au Canada et à l'étranger 58

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1. RÉPARTITION GÉOGRAPHIQUE DES SITES DE CITROUILLE.....11

FIGURE 2. DISTRIBUTION DES BLOCS DES ESSAIS DANS LE TRIANGLE TEXTURAL.....12

FIGURE 3. RENDEMENT MOYEN PAR TRAITEMENT À CHAQUE SITE.....18

FIGURE 4. DÉFINITIONS DES QUADRANTS D'UN TEST DE PARTITION BINAIRE DE CATE-NELSON (1979).....22

FIGURE 5. RÉSULTATS DES ANALYSES DE VARIANCE SUR LA RÉPONSE DE LA CITROUILLE AUX DOSES CROISSANTES D'AZOTE. 29

FIGURE 6. EFFET DES DOSES DE N SUR LES PERTES À LA RÉCOLTE. 30

FIGURE 7. RÉPARTITION DES PERTES À LA RÉCOLTE EN FONCTION DES DOSES CROISSANTES D'AZOTE. 31

FIGURE 8. EXPORTATIONS D'AZOTE DE LA CITROUILLE EN FONCTION DES RENDEMENTS TOTAUX SELON LES VARIÉTÉS (A) ET LE DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL (B). 32

FIGURE 9. INDICES NITRATE DES TRAITEMENTS D'AZOTE DE LA CITROUILLE À LA PROFONDEUR 0-30 CM DANS LES SOLS DES SITES DU MIRVRF. 33

FIGURE 10. RÉSULTATS DES ANALYSES DE VARIANCE SUR LA RÉPONSE AUX DOSES CROISSANTES DE P_2O_5. 42

FIGURE 11. EFFET DES DOSES DE P_2O_5 SUR LES PERTES À LA RÉCOLTE.....43

FIGURE 12. RÉPARTITION DES PERTES À LA RÉCOLTE EN FONCTION DES DOSES CROISSANTES DE P_2O_5. 43

FIGURE 13. EXPORTATIONS DE PHOSPHORE DE LA CITROUILLE EN FONCTION DES RENDEMENTS TOTAUX SELON LES VARIÉTÉS (A) ET LE DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL (B) 45

FIGURE 14. RÉSULTATS DES ANALYSES DE VARIANCE SUR LA RÉPONSE AUX DOSES CROISSANTES DE POTASSIUM. 51

FIGURE 15. EFFET DES DOSES DE K_2O SUR LES PERTES À LA RÉCOLTE. 52

FIGURE 16. RÉPARTITION DES PERTES À LA RÉCOLTE EN FONCTION DES DOSES CROISSANTES DE K_2O. 53

FIGURE 17. EXPORTATIONS DE K_2O EN FONCTION DES RENDEMENTS DE LA CITROUILLE EXPRIMÉS SELON LES VARIÉTÉS (A) ET SELON LE DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL (B). 55

1. PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES ESSAIS ET DES ANALYSES

1.1 Provenance des données

Les classes de sol et les valeurs scientifiques de référence en fertilisation (VSRF) de la citrouille cultivée en sol minéral ont été déterminées à partir des données du *Programme de soutien aux essais de fertilisation des cultures maraîchères* (PSEFCM) et du *Mandat IRDA de révision des valeurs de référence en fertilisation* (MIRVRF). Les essais du PSEFCM se sont tenus entre 2009 et 2013, tandis que ceux du MIRVRF ont eu lieu en 2020 et en 2021. Les sites du MIRVRF ont permis d'améliorer la représentativité des sols les plus susceptibles de répondre à la fertilisation. Ils ont été peu saturés en P et peu pourvus en K, en plus d'améliorer la représentativité dans les groupes de textures pour les essais de fertilisation azotée. Une description sommaire de l'ensemble des sites des essais de citrouille est présentée au Tableau 1.

Tableau 1. Description sommaire des sites des essais de fertilisation de la citrouille

						Essais N		Essais P			Essais K	
# site	Série de sol [1]	Région[2]	Date semis	Durée essai	S-L-A [3]	MO [4]	Rdt total [5]	P_{M3} [6, 7]	ISP_1 [6, 7]	Rdt total [5]	K_{M3} [6, 7]	Rdt total [5]
				jours		%	kg/ha	kg/ha	%	kg/ha	kg/ha	kg/ha
MIRVRF												
1	Batiscan vers Chaloupe	03	9 juin 2020	112	30-53-17	4,5	64 679	27	.	.	191	77 241
2	Dalhousie	04	18 mai 2021	112	13-53-34	5,3	48 684	54	.	.	.	.
3	Le Bras	12	7 juin 2021	121	26-47-26	3,7	61 675	34	1,9	58 632	167	59 643
4	Saint-André	12	20 mai 2021	116	50-26-24	4,8	43 910	89	5,8	46 921	240	49 619
5	Sainte-Rosalie	15	10 juin 2021	91	25-25-51	7,0	33 185	30	3,7	23 975	369	29 259
6	Rougemont	16	29 mai 2021	102	57-28-15	5,5	55 827	26	7,4	55 934	130	51 261
7	Saint-Marcel	16	26 mai 2021	110	41-19-39	3,0	65 021	88	3,1	57 398	286	60 530
8	Du Jour et Aston	16	28 mai 2020	118	53-17-30	3,4	24 509	220	3,6	25 100	180	25 810
PSEFCM												
9	Aston et Courval	14	6 juin 2013	102	69-20-11	2,6	53 857	249	5,7	54 228	199	60 963
10	Sainte-Rosalie	14	26 mai 2012	108	22-57-21	3,8	73 100	101	26,6	74 309	346	73 518
11	Saint-Bernard et Matilda	14	5 juin 2013	110	42-39-20	2,5	70 330	72	25,1	68 906	330	74 903
12	Saint-Bernard	15	1 juin 2012	102	41-23-36	6,7	36 552	28	9,7	42 382	668	35 609
13	Oka	15	31 mai 2010	121	50-24-25	5,9	45 003	71	7,8	49 993	195	58 440
14	.	15	6 juin 2011	113	53-22-25	6,1	59 965	205	3,8	64 884	248	65 168
15	Oka	15	7 juin 2012	104	53-25-22	5,8	75 936	278	10,4	79 495	210	79 320
16	Belle-Rivière	15	11 juin 2009	117	48-31-21	4,7	68 731	263	23,2	67 809	501	67 522
17	.	16	20 mai 2010	117	64-24-13	3,2	59 775	301	28,2	49 099	366	54 010
18	La Rabastalière	16	06 juin 2011	108	77-12-11	3,0	26 840	117	19,3	26 931	204	29 286
19	.	16	2009	.	64-22-14	3,9	74 409	13	32,6	78 107	364	77 631
20	.	16	2010	.	53-22-25	2,5	52 591	32	15,7	46 515	376	46 494
21	Tilly et Platon	12	22 mai 2011	137	60-17-23	4,3	42 412	96	1,8	31 609	109	41 837
22	Platon et Joly	12	21 mai 2012	123	41-30-29	4,6	26 900	117	3,2	31 955	255	28 120
23	Platon	12	25 mai 2013	125	20-46-35	3,0	41 060	27	9,6	46 376	337	50 665
24	Saint-Antoine et Saint-André	12	18 mai 2009	137	66-18-17	3,1	34 716	54	9,6	38 251	273	33 844
	Moyenne			**114**	**47-29-24**	**4,3**	**51 653**	**114**	**11,7**	**50 855**	**285**	**53 508**

[1] Sites 1 à 8 : Séries de sols déterminées par l'équipe des pédologues de l'IRDA. Sites 9 à 24 : Séries de sol retracées à partir des cartes pédologiques numériques MAPAQ et IRDA (https://irda.qc.ca/fr/services/protection-ressources/sante-sols/information-sols/etudes-pedologiques/).

[2] Région administrative; 03 : Capitale-Nationale; 04 : Mauricie; 12 : Chaudière-Appalaches; 14 : Lanaudière; 15 : Laurentides; 16 : Montérégie.

[3] S-L-A : Sable-limon-argile.

[4] MO : Matière organique du sol mesurée par perte au feu (PAF).

[5] Rdt total : Rendement total (vendable et non-vendable) sur base fraîche.

[6] P_{M3} : Teneur du sol en P mesurée par la méthode Mehlich-3. ISP_1 : Indice de saturation du sol en phosphore $(P/Al)_{M3}$. K_{M3} : Teneur du sol en K mesurée 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.

[7] Les seuils critiques préétablis au protocole étaient une teneur de 200 kg P_{M3}/ha (sites 9 à 24) ou un ISP_1 de 7,6 ou 13,1 % (sites 1 à 8) selon la teneur en argile pour les essais P et une teneur de 400 kg K_{M3}/ha pour les essais K (tous les sites).

1.2 Localisation des sites

La répartition géographique des essais de citrouille est présentée à la Figure 1. Les essais du PSEFCM (16 sites) ont été conduits dans les régions administratives de Chaudière-Appalaches, de Lanaudière, des Laurentides et de la Montérégie. Les essais du MIRVRF (8 sites) ont été conduits, quant à eux, dans les régions administratives de la Capitale-Nationale, de Chaudière-Appalaches, de la Mauricie, des Laurentides et de la Montérégie.

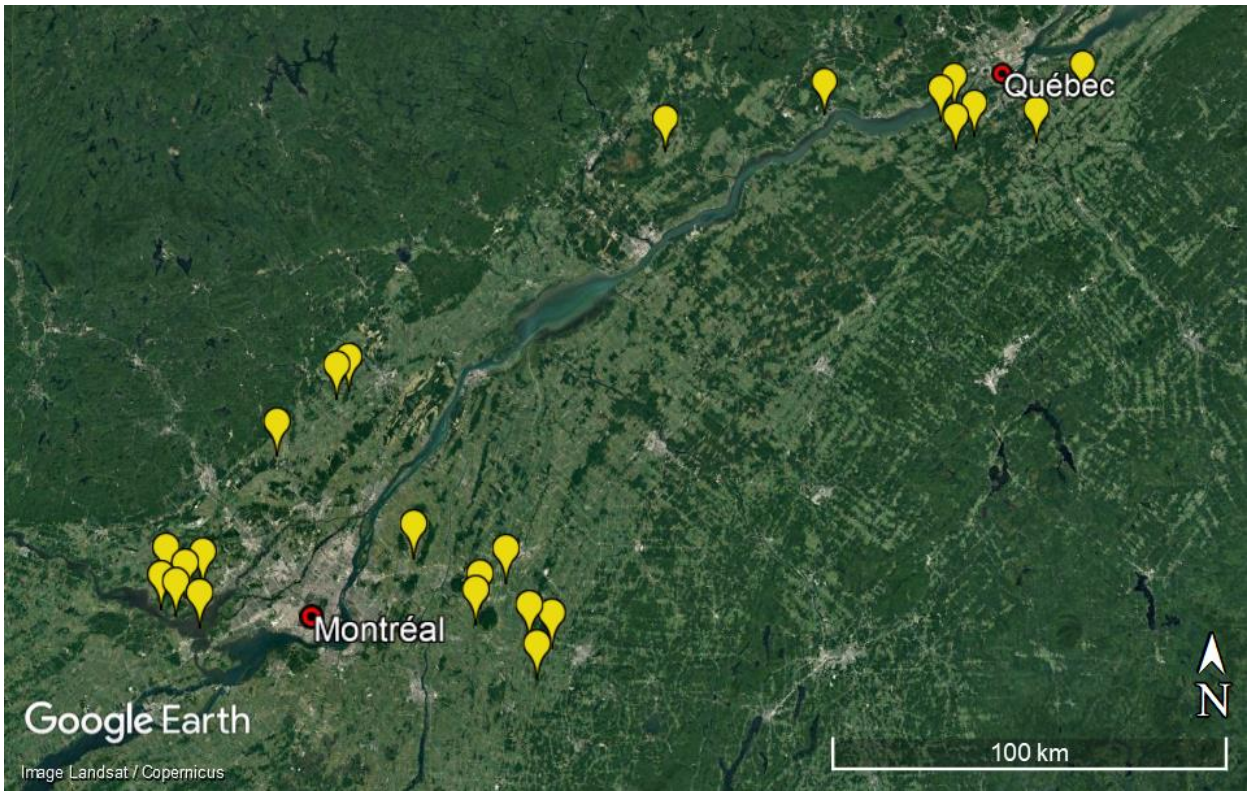

Figure 1. Répartition géographique des sites de citrouille. L'emplacement des repères est approximatif et vise seulement à représenter la répartition géographique des sites sur le territoire du Québec.

1.3 Propriétés physico-chimiques des sols

Les analyses physico-chimiques des sols (0-20 cm) ont été effectuées par bloc ou par tiroir afin de déterminer des indicateurs de fertilité. La teneur en matière organique a été déterminée par perte au feu (PAF) dans les tiroirs d'essais P et K du PSEFCM et dans les blocs du MIRVRF. La méthode Walkley-Black (WB) a été utilisée dans les blocs du PSEFCM. Les teneurs en éléments nutritifs du sol (méthode Mehlich-3), le pH_{eau}, la masse volumique apparente, la granulométrie et la teneur du sol en $N\text{-}NO_3$ (0-30 cm; méthode KCl 2M) au semis ont été mesurées par tiroir dans le PSEFCM et par bloc dans le MIRVRF.

Les essais ont été menés sur sols de textures variées (Figure 2). De plus, pour chaque site du MIRVRF, une analyse des profils de sol a été réalisée par l'équipe des pédologues de l'IRDA, laquelle a servi à identifier les séries de sols et leurs particularités pédologiques, à valider le groupe de textures et à prendre en considération l'état de

santé du sol lors de l'analyse exploratoire. Les sols contenaient entre 8 et 62 % d'argile avec une majorité ayant moins que 30 %. En effet, seulement 23 % des sols des essais appartenaient au groupe de textures fines (G1), tandis que les groupes de textures moyennes (G2) et grossières (G3) comptaient pour respectivement 52 et 25 % des sols.

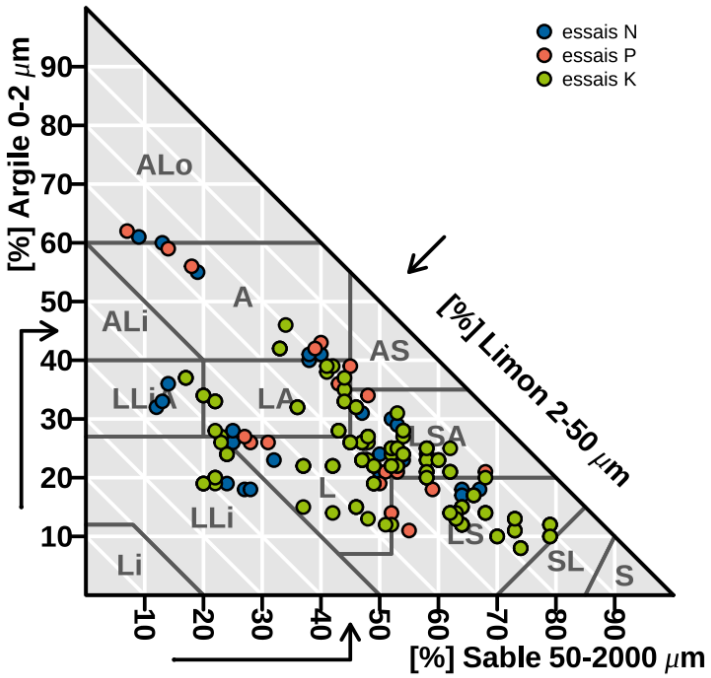

Figure 2. Distribution des blocs des essais dans le triangle textural. ALo : Argile lourde ; ALi : Argile limoneuse ; A : Argile ; LLiA : Loam limono-argileux ; LA : Loam argileux ; AS : Argile sableuse ; L : Loam ; Li : Limon; LLi : Loam limoneux ; LSA : Loam sablo-argileux ; LSA : Loam sableux ; SL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

Le pH_{eau} moyen du sol était de 6,5 ± 0,6, alors que le CRAAQ (2010) définit le pH adéquat pour la culture des cucurbitacées à 6,3. En Ontario, un intervalle de pH optimal similaire variant de 6,1 et 6,5 est recommandé pour cette culture (MAAARO, 2011). Dans l'ensemble, 22 % des sols contenaient entre 2 et 3 % de matière organique déterminée par PAF (MO_{PAF}), tandis que près de 50 % se retrouvaient dans l'intervalle de 3 à 5 % (étendue de 1,8 à 8,0 %). Les analyses par la méthode Mehlich-3 ont révélé que les ISP_1 des sols variaient entre 1,4 et 38,9 % (moyenne de 10,6 %). Les teneurs des sols en K_{M3} variaient largement entre 44 et 355 ppm K_{M3}, pour une valeur moyenne de 130 ppm.

1.4 Dispositifs expérimentaux et traitements

1.4.1 Dispositifs

La structure du dispositif expérimental des essais a varié selon que les données étaient issues du PSEFCM ou du MIRVRF. Dans le cas des sites du PSEFCM, le dispositif était un plan en tiroirs (parcelles divisées; split-plot) comportant trois blocs complètement aléatoires. Chaque bloc du dispositif était constitué de trois parcelles principales représentant chacune un élément nutritif (N, P ou K) à l'essai, à l'intérieur desquelles se trouvaient

quatre sous-parcelles où les doses de N, de P ou de K étaient testées. Dans tous les essais du PSEFCM, il n'y avait pas de traitement 0 N randomisé à l'intérieur de chacun des tiroirs N, P et K. Le traitement 0 N consistait en une « bande de référence » implantée entre les blocs 1 et 2 ou 2 et 3 des essais. Quant aux sites du MIRVRF, les essais de fertilisation N, P et K étaient indépendants et répartis aléatoirement à l'intérieur d'un site. Pour chaque essai, les traitements étaient disposés selon un plan en trois à quatre blocs complètement aléatoires. Ces essais comportaient cinq traitements, incluant un témoin 0, pour chaque élément (N, P, K) testé. Tant pour les sites du PSEFCM que pour ceux du MIRVRF, les unités expérimentales était composées de 4 rangs simples d'une longueur minimale de 8 m, incluant au minimum 10 plants sur le rang. La distance entre les rangs a varié de 1,4 à 2,3 m (médiane de 1,5 m) et l'espacement entre les plants s'étendait de 0,5 à 1,5 m (médiane de 0,8 m), selon la régie du producteur.

1.4.2 Traitements

Dans les essais de fertilisation P et K, les traitements ont été choisis en fonction de la classe de fertilité du sol pour l'élément testé (sections 1.4.2.2 et 1.4.2.3). Dans le PSEFCM, ce sont les teneurs en P_{M3} et en K_{M3} qui étaient utilisées pour la classification de la fertilité des sols, tandis que dans le MIRVRF, la combinaison de l'ISP_1 et de la teneur en argile a remplacé le P_{M3} pour les essais P, le K_{M3} demeurant pour les essais K. Ainsi, des doses plus élevées de P_2O_5 et de K_2O ont été testées dans les sols de classes de fertilité plus faibles, tandis que de plus faibles apports étaient prévus dans les sols dits à « fortes teneurs ». Cependant, trois sites des essais P et trois sites des essais K du PSEFCM ont été mal classés de part et d'autre des seuils présumés de plus faible réponse de la culture et n'ont pas reçu les doses prévues (ex.: doses élevées pour des sites ayant une 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.

Les moments et modes d'application ont généralement varié entre les programmes (PSEFCM ou MIRVRF) et les années (2020 ou 2021). Dans le PSEFCM, les engrais des essais de fertilisation N, P et K étaient appliqués en bande, c.-à-d. dans un sillon creusé près de la ligne de plants et refermé avec une binette. La première application avait lieu après l'émergence des plantules et sans dépasser le stade cotylédon, tandis que la deuxième application était faite 3 à 5 semaines plus tard, soit avant que les vignes ne courent. En 2020, lors de la première année des essais MIRVRF, les modes et moments d'application étaient les mêmes que ceux décrits plus haut, à l'exception du fait que le P était apporté en totalité à l'émergence. En 2021, le protocole a été modifié pour les essais de fertilisation N et K de façon à être plus représentatif des méthodes culturales des entreprises agricoles et afin de prévenir les excès de salinité. Ainsi, une partie des doses de N et de K était apportée en bande à l'émergence, tandis que le reste était appliqué en « ruban », soit en surface sur une largeur d'environ 10 cm, à 20 cm de la ligne des plants. L'incorporation de l'engrais a été faite par le sarcleur du producteur. Deux applications en ruban avaient lieu, lorsque nécessaire selon les doses totales, soit au stade 2-3 feuilles et au stade des boutons floraux. Bien que le fractionnement des doses de K soit une pratique moins courante auprès des producteurs, les plus fortes doses de K ont été fractionnées en deux ou trois applications afin d'éviter les apports supérieurs à 100 kg [$N+K_2O$] au semis (MAAARO, 2017), et par conséquent, prévenir les risque de salinité.

De plus, le fractionnement des doses permet de mieux synchroniser les apports d'engrais avec les besoins en éléments nutritifs de la culture à différents stades de son développement.

1.4.2.1 Doses d'azote

Les traitements des essais de fertilisation azotés, présentés au Tableau 2, ont varié selon les programmes (PSEFCM ou MIRVRF) et les années (2020 ou 2021). Durant le PSEFCM (2009–2013), les traitements correspondaient à quatre doses de N variant de 35 à 140 kg/ha. Quant aux essais du MIRVRF (2020-2021), ceux-ci incluaient une dose témoin 0 N et les doses variaient entre 0 et 180 kg/ha. L'azote a été appliqué sous formes de nitrate d'ammonium calcique, de phosphate mono- ou bi-ammoniacal ou d'une combinaison des deux. Tous les traitements de N, incluant la bande de référence du PSEFCM, comportaient des apports complémentaires de P_2O_5 et de K_2O dont la dose, le mode et la période d'application correspondaient aux T7 et T11 des essais P et K dans le PSEFCM et aux T8 et T12 dans le MIRVRF (Tableaux 3 et 4).

Tableau 2. Description des traitements des essais de fertilisation azotée

Essais N			Dose de N (kg/ha)				
Années (Programme)	Nombre de sites	Mode[1] et période d'application		T1	T2	T3	T4
2009-2013 (PSEFCM)	16	En bande en post-émergence		35	35	70	90
		En bande avant que les vignes ne courent (3 à 5 sem.)		0	35	35	50
		Apport total		**35**	**70**	**105**	**140**
			T0	T1	T2	T3	T4
2020 (MIRVRF)	2	En bande en post-émergence	0	45	50	80	100
		En bande avant que les vignes ne courent (3 à 5 sem.)	0	0	40	55	80
		Apport total	**0**	**45**	**90**	**135**	**180**
2021 (MIRVRF)	6 [2]	En bande en post-émergence	0	45	45	45	45
		En ruban au stade 2-3 feuilles	0	0	0	45	45
		En ruban au stade boutons floraux	0	0	45	45	90
		Apport total	**0**	**45**	**90**	**135**	**180**

[1] En bande : dans un sillon creusé près de la ligne de plants et refermé après application. En ruban : en surface, en une bande étroite et parallèle à la ligne de plants, incorporé au sarcleur.
[2] Une erreur dans le calcul des engrais au site 7 a entraîné l'application des doses 0, 29, 58, 87 et 116 kg N/ha.

1.4.2.2 Doses de phosphore

Les traitements des essais de phosphore, présentés au Tableau 3, ont varié selon les programmes (PSEFCM ou MIRVRF). Dans le PSEFCM, les doses de P_2O_5 prévues variaient de 0 à 90 kg/ha ou de 0 à 180 kg/ha, en fonction de la teneur en P_{M3} du sol. Dans le MIRVRF, les doses de P_2O_5 variaient de 0 à 60 kg/ha ou de 0 à 180 kg/ha, en fonction du niveau de saturation en P des sols (ISP_1) défini par le REA selon leur teneur en argile (MDDEP, 2010; Tableau 3). Les engrais étaient appliqués sous forme de phosphate mono- ou bi-ammoniacal ou encore de superphosphate triple. 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 aux T3 et T11 des essais N et K dans le PSEFCM et aux T3 et T12 dans le MIRVRF (Tableaux 2 et 4).

Tableau 3. Description des traitements des essais de fertilisation phosphatée

Essais P				Dose de P_2O_5 (kg/ha)				
Années (Programme)	Nombre de sites [1]	Mode [2] et période d'application						
		P_{M3}			T5	T6	T7	T8
2009-2013 (PSEFCM)	6	≤ 200 kg/ha	En bande en post-émergence		0	60	70	100
			En bande avant que les vignes ne courent (3-5 sem.)		0	0	50	80
			Apport total		**0**	**60**	**120**	**180**
	10	> 200 kg/ha	En bande en post-émergence		0	30	60	60
			En bande avant que les vignes ne courent (3-5 sem.)		0	0	0	30
			Apport total		**0**	**30**	**60**	**90**
		ISP_1 [3]		T5	T6	T7	T8	T9
2020-2021 (MIRVRF)	6 [4]	≤ 7,6 ou ≤ 13,1 %	En bande en post-émergence	0	30	60	120	180

[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] En bande : dans un sillon creusé près de la ligne de plants et refermé après application. En ruban : en surface, en une bande étroite et parallèle à la ligne de plants, incorporé au sarcleur.

[3] ISP_1 : 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.

[4] Une erreur dans le calcul des engrais au site 7 a entraîné l'application des doses 0, 19, 39, 77 et 116 kg P_2O_5/ha.

1.4.2.3 Doses de potassium

Les traitements des essais de potassium, présentés au Tableau 4, ont varié selon la source des données (PSEFCM ou MIRVRF) et les années (2020 ou 2021). Dans le PSEFCM (2009 à 2013), les doses e K_2O prévues variaient entre 0 et 180 ou 0 et 90 kg/ha en fonction de la teneur K_{M3} du sol. Dans le MIRVRF, en 2020, seules les doses prévues pour les sites de moins de 400 kg K_{M3}/ha ont été appliquées, lesquelles variaient entre 0 et 280 kg/ha. En 2021, les doses de K_2O variaient de 0 à 220 et de 0 à 120 kg/ha selon la teneur du sol en K_{M3}. Les engrais étaient apportés sous forme de muriate de potassium (0-0-60) ou de sulfate de potassium et de magnésium (0-0-22-11Mg) lorsque du Mg était nécessaire. Tous les traitements de K_2O comportaient des apports complémentaires de N et de P_2O_5 dont la dose, le mode et la période d'application correspondaient aux T3 et T8 des essais N et P dans le PSEFCM et aux T3 et T8 dans le MIRVRF (Tableaux 2 et 3).

Tableau 4. Description des traitements des essais de fertilisation potassique

Essais K				Dose de K_2O (kg/ha)			
Années (Programme)	Nombre de sites [1]	K_{M3} (kg/ha)	Mode[2] et période d'application	T9	T10	T11	T12
2009-2013 (PSEFCM)	11	≤ 400	En bande en post-émergence	0	60	70	100
			En bande avant que les vignes ne courent (3-5 sem.)	0	0	50	80
			Apport total	**0**	**60**	**120**	**180**
	5	> 400	En bande en post-émergence	0	30	30	60
			En bande avant que les vignes ne courent (3-5 sem.)	0	0	30	30
			Apport total	**0**	**30**	**60**	**90**
				T10	T11	T12	T13	T14
2020 (MIRVRF)	2 [3]	≤ 400	En bande en post-émergence	0	70	80	120	140
			En bande avant que les vignes ne courent (3 à 5 sem.)	0	0	60	90	140
			Apport total	**0**	**70**	**140**	**210**	**280**
2021 (MIRVRF)	3	≤ 400	En bande en post-émergence	0	40	40	40	40
			En ruban au stade 2-3 feuilles	0	0	35	35	90
			En ruban au stade boutons floraux	0	15	35	90	90
			Apport total	**0**	**55**	**110**	**165**	**220**
	2 [4]	> 400	En bande en post-émergence	0	30	30	40	40
			En ruban au stade 2-3 feuilles	0	0	0	0	30
			En ruban au stade boutons floraux	0	0	30	50	50
			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] En bande : dans un sillon creusé près de la ligne de plants et refermé après application. En ruban : en surface, en une bande étroite et parallèle à la ligne de plants, incorporé au sarcleur.
[3] Au site 1, une erreur d'application a entraîné l'application de 189 kg K_2O/ha au T13 du bloc 3.
[4] Une erreur dans le calcul des engrais au site 7 a entraîné l'application des doses 0, 19, 38, 58 et 77 kg K_2O/ha.

1.5 Rendements

Les rendements ont été mesurés sur la masse des citrouilles récoltées. 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 moyens étaient de 51 406, 50 190 et 52 777 kg/ha dans les essais N, P et K, respectivement. Ceux-ci ont varié de façon importante entre les différents sites, essais et traitements, s'étendant de 10 185 à 113 135 kg/ha. Les rendements totaux et vendables en fonction des traitements de fertilisation sont présentés à la Figure 3. Dans tous les essais, une majorité de sites a atteint la moyenne provinciale des rendements de référence de 2013 à 2019, illustrée par la ligne jaune (21 720 kg/ha).

Dans le PSEFCM, les pertes à la récolte (différence entre les rendements totaux et vendables) se sont avérées élevées, en moyenne de 40 % et jusqu'à 100 % dans certains cas, en raison du fait que le protocole était trop sévère quant au classement des citrouilles par calibres et aux critères du marché (ex. autocueillette). En effet, beaucoup de citrouilles ont été rejetées en fonction d'un calibre trop gros ou trop petit alors que celles-ci auraient pu être commercialisées. De plus, la méthode choisie pour mesurer les rendements n'a pas permis pas

de réajuster les rendements vendables sur la base de critères moins sévères. Conséquemment, suivant un examen approfondi des rendements et des pertes, il a été jugé préférable de conduire les analyses statistiques sur les rendements totaux plutôt que les rendements considérés comme commercialisables par les protocoles expérimentaux, particulièrement ceux du PSEFCM.

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

		Nb obs. [1]	Moyenne	Écart-type	Minimum	Maximum
Rendement total (kg/ha)						
	N	312	51 406	18 419	10 185	99 770
	P	278	50 190	20 227	0	113 135
	K	293	52 777	19 009	11 103	107 543
Rendement vendable (kg/ha)						
	N	312	32 563	19 147	0	97 539
	P	278	30 698	20 036	0	109 257
	K	293	32 568	20 171	0	94 165
Pertes à la récolte (%)						
	N	312	38	26	0	100
	P	278	41	28	0	100
	K	293	40	27	0	100

[1] Nb obs. : nombre d'observations;

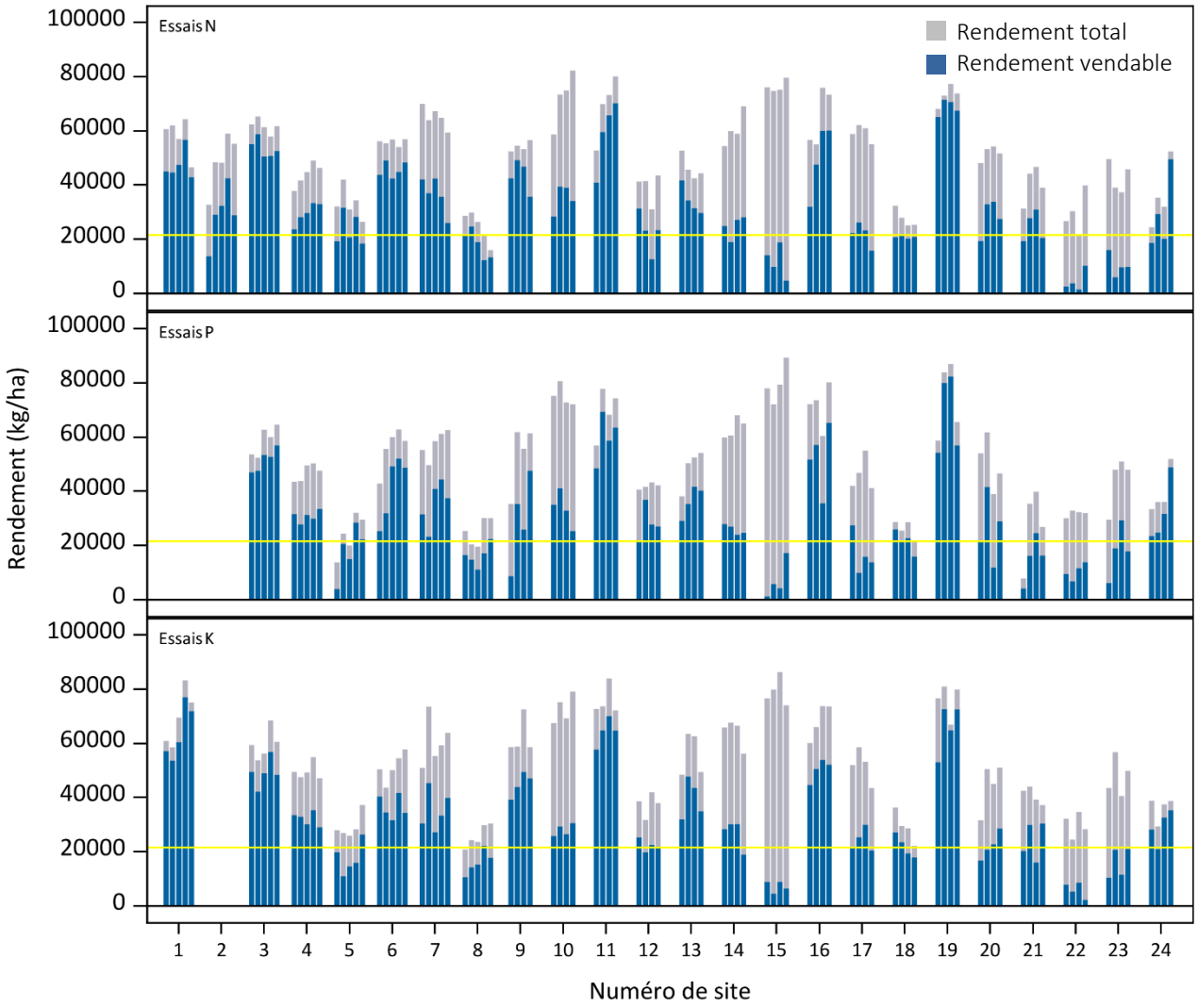

Figure 3. Rendement moyen par traitement à chaque site. Bleu : rendement vendable selon les critères établis au site, gris: rendement total. Les traitements de fertilisation sont les doses croissantes d'engrais de l'élément à l'essai et sont détaillés à la section 1.4. Les rendements de référence de la culture (21 720 kg/ha; ligne jaune) sont une moyenne des rendements à l'hectare du Québec pour les années 2009 à 2013 (min.: 16 700, max.: 27 100 kg/ha; Statistique Canada, 2021).

1.6 Aspects additionnels pour l'interprétation des résultats

1.6.1 Variété culturale

Les essais ont été réalisés exclusivement avec des variétés de citrouille utilisées en conditions commerciales au moment des essais (2009 à 2021). Les variétés Magic Lantern et Aladdin ont été utilisées dans les plus grandes proportions, suivies des variétés Zeus, Orange Sunrise et Magic Wand. Les variétés et leurs proportions respectives dans chaque essai sont détaillées au Tableau 6.

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

Variété	Proportion des essais sur lesquels était testée chaque variété (%)			Format attendu [1]	Rendement total (kg/ha)
	N	P	K		
Magic Lantern	21 [2]	23	21	Moyen	59 160
Aladdin	19	21	20	Large	44 581
Zeus	14	11	10	Moyen	41 018
Orange Sunrise	10	5	10	Moyen	61 475
Magic Wand	9	10	9	Moyen	65 543
Sorcerer	8	8	8	Moyen	64 969
Cronus	5	5	5	Large	28 806
Hannibal	4	4	4	Large	39 592
Mystic plus	4	4	4	Petit à moyen	27 663
Inconnue	8	8	8	-	50 629

[1] Le format attendu réfère à la taille d'une citrouille selon les catalogues commerciaux de semences.

[2] Par exemple, 21 % des essais N ont utilisé la variété Magic Lantern pour laquelle le rendement total moyen - essais N, P et K confondus - a été de 59 160 kg/ha.

1.6.2 Précédent cultural

Les essais de citrouilles ont principalement suivi des cultures de maïs et de céréales, dans une proportion de 30 % des données (soit sept sites) pour chacun des précédents. Dans des proportions plus faibles (≈ 5 à 8 % des données pour chacun), les essais ont suivi des cultures de citrouilles, de courges, de fraises, de carottes, de choux-fleurs, de soya et de tomates.

1.6.3 Irrigation

Parmi les 24 sites de citrouille, 21 (88 %) étaient non irrigués. Deux sites du MIRVRF, soit les sites 1 et 3, ont été irrigués par un système de goutte-à-goutte en surface afin de permettre l'implantation du site malgré les conditions sèches qui prévalaient. Ces systèmes ont été mis en fonction ponctuellement, au besoin. Enfin, l'information quant à l'absence ou la présence d'un système d'irrigation était manquante pour un site. Des conditions de stress hydrique ou de sécheresse peuvent limiter le rendement et rendre l'effet de la fertilisation nulle ou indétectable (Reiners et Riggs, 1997). Ainsi, la prise en compte des commentaires des collaborateurs, de même qu'une analyse visuelle de la régularité et de la quantité des précipitations de la saison, ont servi à identifier les sites qui auraient pu subir un stress hydrique sévère et, le cas échéant, à les exclure des analyses.

1.7 Analyse exploratoire

Lorsque réalisés en plein champ, les essais de fertilisation peuvent faire l'objet de multiples problématiques pouvant entraîner une exclusion de données. Lors de la réalisation des essais, lorsque nécessaire, certaines parcelles ont été abandonnées par l'équipe de terrain pour des raisons diverses, dont la sécheresse, le mauvais établissement de la culture dû à la fonte des semis, la présence de maladies foliaires, etc. Dans le cadre du traitement des données, une analyse exploratoire a été également réalisée minutieusement, ce qui a permis entre autres de détecter la présence de données aberrantes ou influentes, et de vérifier la représentativité des

données de rendements en comparaison à ce qui est obtenu en contexte de production commerciale sur la même période. Dans le cadre de cette procédure, les statistiques descriptives sur les rendements et la densité de la population ont été analysées, notamment les coefficients de variation associés aux données de chacun des sites. Par la suite, une attention plus particulière a été portée sur les sites présentant une variation de rendements et de densité de population supérieure à 30 % et à 15 %, respectivement. Une régression robuste a aussi été 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). Finalement, les interprétations des résultats des profils de sol réalisés par l'équipe de pédologie de l'IRDA ont parfois révélé des cas de dégradations de sols (structure massive, consistance ferme à très ferme, etc.) à certains sites, lesquels ont été éliminés du jeu de données lorsque d'autres observations confirmaient la non-validité des données. Les profils de sol ont également révélé la présence d'un remblai au site 8, lequel a été exclu des analyses.

Le bilan de la validation des données est présenté au Tableau 7. À l'issue de l'analyse exploratoire, 61 % (58, 62 et 63 % 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

	Jeu de données initial		Jeu de données final		Validation
Essai	Nb sites	Nb obs.	Nb sites	Nb obs.	(%)
N	24	426	16	249	58
P	22	378	16	236	62
K	23	393	17	249	63

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 la citrouille, 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 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; IRDA, 2020a). Ce test de partition consiste à mettre en relation le rendement relatif de la culture (RRel, %) et l'indicateur de prédiction de la fertilité du sol (ex. la teneur en K_{M3}).

Le RRel est calculé par bloc, en divisant le rendement vendable du témoin ($Rendement_{Témoin}$) par le rendement vendable maximal ($Rendement_{Maximal}$) parmi tous les traitements du bloc, incluant le témoin (Éq. 1). Dans le cas où une unité expérimentale est écartée à l'analyse exploratoire, le rendement maximal du bloc concerné est considéré impossible à déterminer et aucun RRel n'est déterminé.

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

Dans le cas spécifique de la citrouille et pour les essais de fertilisation azotée du PSEFCM uniquement, en l'absence d'un traitement randomisé sans azote, c'est le rendement de la bande de référence (voir section 1.4) qui a été considéré comme le rendement du témoin aux fins du calcul du rendement relatif.

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 créé est ensuite divisé en quatre quadrants selon un axe vertical et un axe horizontal placés de façon à maximiser le nombre de points dans les quadrants dits vrais négatifs et vrais positifs, tout en minimisant ceux dans les quadrants dits faux négatifs et faux positifs (Figure 4). L'axe vertical correspond au seuil principal d'indicateur de fertilité de sol (axe qui fixe la valeur critique en abscisse, ex. teneur en K_{M3}) qui permet de distinguer deux catégories de sols qui répondent différemment à la fertilisation, habituellement ceux qui répondent davantage de ceux qui répondent peu ou pas à l'apport d'engrais. Ces deux catégories principales peuvent par la suite être resubdivisées par des seuils secondaires en sous-catégories répondant différemment à la fertilisation. Cela est possible en utilisant la procédure de Cope et Rouse (Cope et Rouse, 1973; Benjannet et al., 2018) qui consiste à diviser la valeur critique principale par un facteur arbitraire (ex. divisée ou multipliée par deux ou par quatre) ou, lorsque possible, en exploitant directement la procédure de Cate-Nelson. Pour sa part, l'axe horizontal correspond au rendement relatif optimal (RRel, valeur seuil à l'ordonnée), lequel se trouve généralement fixé autour de 80-85 % (Black, 1993; Cate et Nelson, 1971; Nelson et Anderson, 1977; Pellerin et al., 2006). Des valeurs inférieures ou supérieures peuvent toutefois être sélectionnées dans certains cas, que ce soit pour le seuil principal ou dû à l'élaboration de seuils secondaires. Ainsi, au Québec, Pellerin et al. (2006) rapporte un seuil optimal de rendement relatif aussi faible que 50 % pour la culture de maïs-grain.

Pour s'assurer de la qualité des partitions et de la performance des seuils déterminés, les valeurs du *P* de Fisher ainsi que les mesures de précision, de sensitivité et de 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).

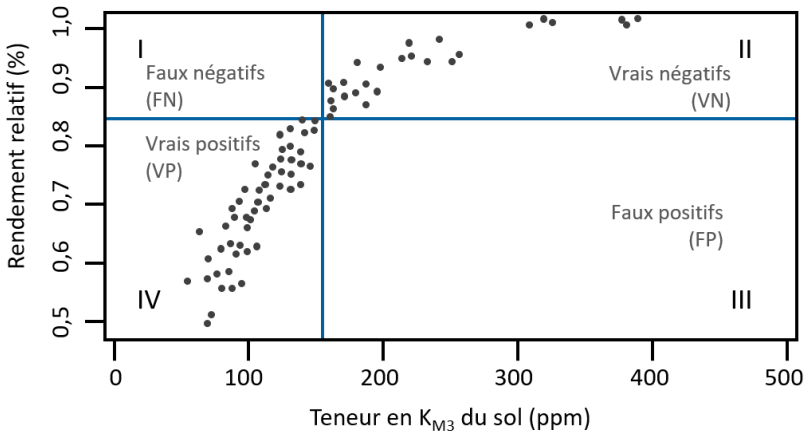

Figure 4. Définitions des quadrants d'un test de partition binaire de Cate-Nelson (1979).

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

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

Dans le cas spécifique de la citrouille, les protocoles des essais de fertilisation azotée du PSEFCM ne prévoyaient aucun traitement témoin (0 N) randomisé à l'intérieur de chacun des tiroirs N, P et K. À la place, une bande de référence (0 N et apports complémentaires de P et de K) a été implantée dans chaque dispositif, entre les blocs 1 et 2 ou 2 et 3. Les rendements ont tout de même été mesurés dans celle-ci (un rendement « témoin » par site) et ont servi dans les calculs des ROM comme $Rendement_{Témoin}$, pour les essais du PSEFCM (Éq. 2). La possibilité alternative d'utiliser comme $Rendement_{Témoin}$ dans le calcul du ROM les rendements des parcelles ayant reçu la plus petite dose randomisée prévue au protocole (T1) a aussi été explorée. Toutefois, cette dernière façon de faire amputait les essais d'un traitement de fertilisation, en plus d'être incompatible avec les essais du MIRVRF. Ainsi, c'est le rapport avec le rendement de la bande de référence qui a été retenu.

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. À titre exploratoire, les ANOVA réalisées pour chaque site individuellement ont également été consultées dans le cadre de la détermination des VSRF.

Puisque les doses à tester dans les divers essais varient parfois selon les années ou que des erreurs d'application ont pu survenir (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 : 1-50-60. Dans ce cas, par exemple, il s'agit du 1er groupe de doses testées (<u>1</u>-50-60) et les doses qui le composent varient de 50 à 60 kg/ha de l'élément testé (1-<u>50-60</u>). 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 et quantités d'éléments nutritifs exportés

Le taux d'humidité et la concentration en éléments nutritifs (majeurs et mineurs) dans les tissus ont été mesurés sur des citrouilles saines et représentatives de la parcelle, prélevés à la récolte. Le diagnostic nutritionnel a été effectué sur la base des concentrations en éléments nutritifs des tissus et les rendements totaux (citrouilles vendables et non vendables). Les exportations en N, P_2O_5 et K_2O ont été calculées en considérant exclusivement le rendement total des fruits sans les feuilles ni les tiges. Ainsi, les valeurs d'exportations obtenues s'appliquent à la régie de production habituelle, laquelle laisse les parties végétatives au champ lors de la récolte.

Les calculs ont été effectués à partir d'un sous-ensemble d'individus appelé population de tête, regroupant les individus ayant présenté les rendements totaux 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 (2020b) :

1- La méthode de sélection de la population de référence : Cette population est déterminée *a priori* (De Bauw et al., 2016) en sélectionnant le quart supérieur (25 %) des rendements triés en ordre décroissant. Ce sous-groupe dit à haut rendement servira à la détermination numérique, en plusieurs dimensions, de l'équilibre en N, P, K, Ca et Mg (c.-à-d. la norme, voir l'étape 2).

2- La méthode de calcul de la norme : Des estimateurs MCD (*Minimum Covariance Determinant*) ont servi à évaluer la norme. Ces estimateurs correspondent à la moyenne ($\boldsymbol{\mu}_{\mathrm{MCD}}$) et à la covariance ($\Sigma_{\mathrm{MCD}}$) d'un sous-ensemble optimal de points (Hubert et Debruyne, 2010). L'utilisation des MCD permet, entre autres, l'obtention d'une composition équilibrée par l'exclusion des individus en déséquilibre nutritif.

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

1.8.4 Analyse sur les pertes à la récolte

Dans tous les essais (fertilisation N, P et K), une analyse a été effectuée afin d'évaluer l'effet des doses d'engrais sur les pertes à la récolte pour les sites du MIRVRF seulement. À cette fin, un modèle linéaire mixte a été utilisé et combiné à des tests de comparaison des moyennes, au besoin. Les données du PSEFCM n'ont pas fait l'objet des analyses sur les pertes à la récolte en raison des pourcentages de pertes qui étaient anormalement élevés en comparaison de ceux habituellement observés chez les producteurs. En effet, les critères des protocoles étaient trop restrictifs quant à la taille (calibres) et à l'immaturité du fruit.

2. FERTILISATION AZOTÉE

2.1 Portrait et représentativité des données

Les résultats des analyses physico-chimiques de la couche de sol de surface (0-20 cm) pour les essais N sont résumés au Tableau 8. Le pH des sols a varié de 5,4 à 7,8, avec plus de la moitié des sites qui se situait dans l'intervalle allant de 6,0 à 7,0. Le pH optimal pour la culture des cucurbitacées est établi à 6,3 au Québec (CRAAQ, 2010) et entre 6,1 à 6,5 en Ontario (MAAARO, 2011). Dans le cadre des essais d'azote, seuls 24 % des blocs des essais se situaient dans cet intervalle. Les trois groupes de textures (G1, G2 et G3) ont été représentés de façon inégale dans le jeu de données. En effet, les sols de textures moyennes (G2) ont prédominé à 58 %, tandis que les G1 et les G3 ont représenté respectivement 24 et 13 % des données validées. Cette situation représente probablement la réalité terrain puisque la culture des cucurbitacées n'est pas recommandée en sol lourds, susceptibles à la compaction (MAAARO, 2011). Dans les sols du groupe G1, près de la moitié des blocs détenaient entre 2 et 5 % de MO_{PAF}, tandis que 69 % des blocs des sols G2 et G3 se situaient dans le même intervalle. Tant dans les sols G1 que dans ceux G2 et G3, aucun bloc ne présentait une teneur en MO_{PAF} inférieure à 2 %. Par conséquent, la réponse à la fertilisation n'a pu être adéquatement étudiée dans les classes de sols les plus pauvres en MO. Quant aux teneurs en nitrate au semis, presque la totalité (98 %) des sols pour lesquels les données ont été disponibles avaient plus de 5 ppm $N\text{-}NO_3$. Pour 29 % des blocs, la teneur en $N\text{-}NO_3$ a été comprise entre 5 et 10 ppm.

Tableau 8. Répartition des blocs des essais N pour différentes classes de propriétés de sol après la validation des données

pH_{eau} [1]	Blocs (%)	MO_{PAF} (%) [2]	Blocs (%)		$N\text{-}NO_3$ [3] (ppm)	Blocs (%)	Groupe de textures [4]	Blocs (%)
			G1	G2-G3				
5,5 – 6,0	26	≤ 2	0	0	≤ 5	2	G1	24
6,0 – 6,5	24	2 – 3	17	27	5 – 10	29	G2	58
6,5 – 7,0	29	3 – 5	31	42	10 – 15	14	G3	13
> 7,0	17	5 – 6	27	21	> 15	32	nd	5
nd	4	> 6	25	10	nd	24	-	-

[1] Le pH du sol optimal pour les cucurbitacées est de 6,3 au Québec (CRAAQ, 2010) et de 6,1 à 6,5 en Ontario (MAAARO, 2011).
[2] Matière organique déterminée par la méthode par perte au feu.
[3] Nitrate mesuré au semis dans la couche de sol 0-30 cm, déterminé par la méthode KCl 2M et dosé par colorimétrie.
[4] G1 : sols à texture fine ; G2 : sols à texture moyenne ; G3 : sols à texture grossière ; nd : non disponible.

2.2 Détermination des doses agronomiques optimales

2.2.1 Recherche d'indicateurs de fertilité du sol

Plusieurs variables de sol 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. Le potentiel de plusieurs indicateurs à expliquer la réponse à la fertilisation a donc été testé avec le test de Cate-Nelson (1971) : la teneur en nitrate du sol ($N\text{-}NO_3$; 0-30 cm) au semis, 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 G1, G2 et G3. Pour alléger la présentation des résultats, seuls les tests dont la valeur de $P < 0,12$ sont

présentés (Tableau 9). Les valeurs critiques obtenues sont ensuite utilisées pour les analyses de variance en tant que seuils de réponse agronomique de la culture à la fertilisation.

Tel qu'indiqué précédemment (section 1.5), c'est le rendement total qui a été utilisé aux fins des analyses de variance dans la citrouille. Conséquemment, les rendements relatifs aux fins du test de Cate-Nelson ont été calculés à partir de ces derniers.

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 9. La teneur en $N\text{-}NO_3$ (0-30 cm) au semis et la teneur en MO_{PAF} se sont révélés être des indicateurs potentiels performants de la réponse de la citrouille à la fertilisation azotée. Le seuil de MO_{PAF} déterminé (5,0 %) a été le même que les groupes de textures soient analysés tous ensemble (G1, G2 et G3) ou que les sols G2-G3 soient analysés séparément. Un seuil de $N\text{-}NO_3$ au semis a également été déterminé dans les sols G2-G3. Dans le cas du groupe de textures G1, aucun seuil propre à ce groupe n'a pu être déterminé, probablement en raison du faible nombre d'observations.

Tableau 9. Valeurs critiques des indicateurs de sol significatifs selon les tests de Cate-Nelson pour les essais N de citrouilles

Indicateur de sol [1]	Groupes de textures [2]	N [3]	Valeur critique	RRel [4] (%)	Sensitivité	Spécificité	Précision	*P*
$N\text{-}NO_3$ au semis (ppm ; 0-30 cm)	G2, G3	29	19,5	74	77	100	90	< 0,001
Matière organique (%)	G1, G2, G3	37	5,0	74	60	73	68	< 0,001
	G2, G3	29	5,0	74	62	88	76	< 0,001

[1] La teneur en nitrate au semis a été dosée par la méthode au KCl 2M. 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 total

Comme mentionné à la section 1.8.2, les analyses de variance (ANOVA) de l'effet de la fertilisation sur la productivité des cultures ont été effectuées en utilisant les rapports de rendements (ROM) (rendement total/rendement du témoin). Les comparaisons multiples de moyennes ont permis de sélectionner le meilleur traitement. Sur les graphiques en forêt (Figure 5), 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. En absence de différences significatives entre les traitements, les intervalles de confiances à 90 % permettent de déterminer si le rendement obtenu pour un traitement donné est numériquement différent du témoin. Seuls les résultats des ANOVA permettant l'interprétation agronomique de la réponse de la culture à la fertilisation azotée sont présentés dans le présent rapport.

En premier lieu, une ANOVA a été effectuée sans indicateur de classe de fertilité en considérant l'ensemble des observations (Figure 5, modèle A). Ce modèle démontre un effet significatif (P = 0,013; n = 218) des doses de N sur les ROM. Les comparaisons des moyennes indiquent que l'apport de 105 kg N/ha a mené à l'obtention du rendement agronomique optimal, pour un gain de rendement moyen de 38,4 % par rapport au témoin.

En second lieu, l'analyse des résultats par groupes de textures a été peu concluante. Ainsi, le modèle B n'a pas permis de déceler des ROM statistiquement différents selon les doses de N pour les sols des groupes de textures G1 (P = 0,445) et G3 (P = 0,883), bien que des gains de rendement moyens de 44 et 18 % y aient été mesurés, respectivement, suivant un apport de N. À l'inverse, dans les sols G2, les doses de N ont eu un effet significatif (P = 0,026) sur les ROM, avec le groupe de doses optimales de 70-90 kg N/ha, pour un gain de 30 % par rapport au témoin sans fertilisation azotée. L'incapacité des modèles statistiques à détecter des différences entre les ROM dans les groupes de textures G1 et G3 pourrait s'expliquer, d'une part, par le faible nombre d'observations disponibles dans ces deux groupes de textures, comparativement au groupe G2. D'autre part, dans les sols G3, cela pourrait également être dû à la répartition des teneurs en MO. En effet, contrairement aux sols G2 où 72 % des observations se situaient en dessous de 5 % de MO, une plus faible proportion (54 %) des sols G3 se sont retrouvés dans cette plage de MO, où une réponse au N est généralement attendue. De même, dans les sols G1, ce sont 60 % des observations qui avaient moins de 5 % de MO.

En troisième lieu, comme les analyses à l'intérieur des groupes de textures se sont avérées peu concluantes, un modèle considérant la MO_{PAF} (seuil déterminé par le test de Cate-Nelson) et sans égard à la texture du sol a été évalué (modèle C) afin de préciser la réponse à la fertilisation observée au modèle A. Le seuil de 5,0 % déterminé avec le test de Cate-Nelson a été utilisé et combiné avec la limite inférieure du jeu de données, soit 2,2 % de MO_{PAF}. Ainsi, dans les sols ayant entre 2,2 et 5,0 % de MO_{PAF}, les ROM ont augmenté significativement avec l'augmentation des doses de N jusqu'à l'atteinte d'un plateau de production à 105 kg N/ha (P = 0,024; gain de rendement moyen de 48,6 %). Au-delà du seuil agronomique de réponse de 5,0 % de MO_{PAF}, les gains de rendement n'ont pas différé entre les doses de N, bien que toutes les doses testées aient permis un gain par rapport au témoin sans engrais (moyenne de 18 %). Ainsi, pour cette catégorie de sols, la dose agronomique optimale de N se situait dans le plus petit groupe de doses testées, 35-45 kg/ha. La matière organique du sol peut en effet fournir du N par minéralisation avec plus ou moins d'intensité selon les conditions prévalant au champ (N'Dayegamiye et al., 2007; Walters, 2020). Au Québec, il est généralement admis que la minéralisation peut fournir environ 15 kg N/ha à la culture pour chaque 1 % de matière organique au-dessus de 4 %, jusqu'à concurrence de 7 % (CRAAQ, 2010). Il est donc attendu qu'un sol mieux pourvu en MO et dont la santé globale n'est pas compromise sera moins dépendant de l'azote apporté par la fertilisation. De surcroît, l'apport d'une dose plus faible dans ces sols ayant un plus grand potentiel à fournir du N permettra, entre autres, d'éviter les excès de N, pouvant causer un retard dans la maturité des fruits (Swiader et al., 1988) ou être à l'origine d'un feuillage excessif (Warncke, 2007).

En complément au modèle C, une analyse de variance a été effectuée en tenant compte de la teneur en $N\text{-}NO_3$ des sols G2-G3 (au semis) comme indicateur de fertilité (modèle D). Le seuil critique de de 19,5 ppm $N\text{-}NO_3$ obtenu à partir du test de Cate-Nelson (Tableau 9) a permis d'apporter une précision supplémentaire quant à la réponse de la citrouille à la fertilisation azotée. Afin d'alléger le document, seuls les résultats obtenus pour les sols ayant moins de 19,5 ppm et ayant contribués à améliorer les propositions de VSRF sont rapportés dans le texte. En effet, en dessous de ce seuil nitrate, la dose agronomique optimale a été de 135-140 kg N/ha (gain moyen de 50,0 % par rapport au témoin; P = 0,029), traduisant que les sols de textures moyennes à grossières, moins pourvus en $N\text{-}NO_3$ pourraient bénéficier d'un apport de N supplémentaire à celle de 105 kg/ha, indépendamment de la teneur en MO. Au-delà du seuil de 19,5 ppm, la plus petite dose de N testée (35-40 kg/ha) a permis d'obtenir le gain de rendement optimal (données non-présentées, P = 0,06).

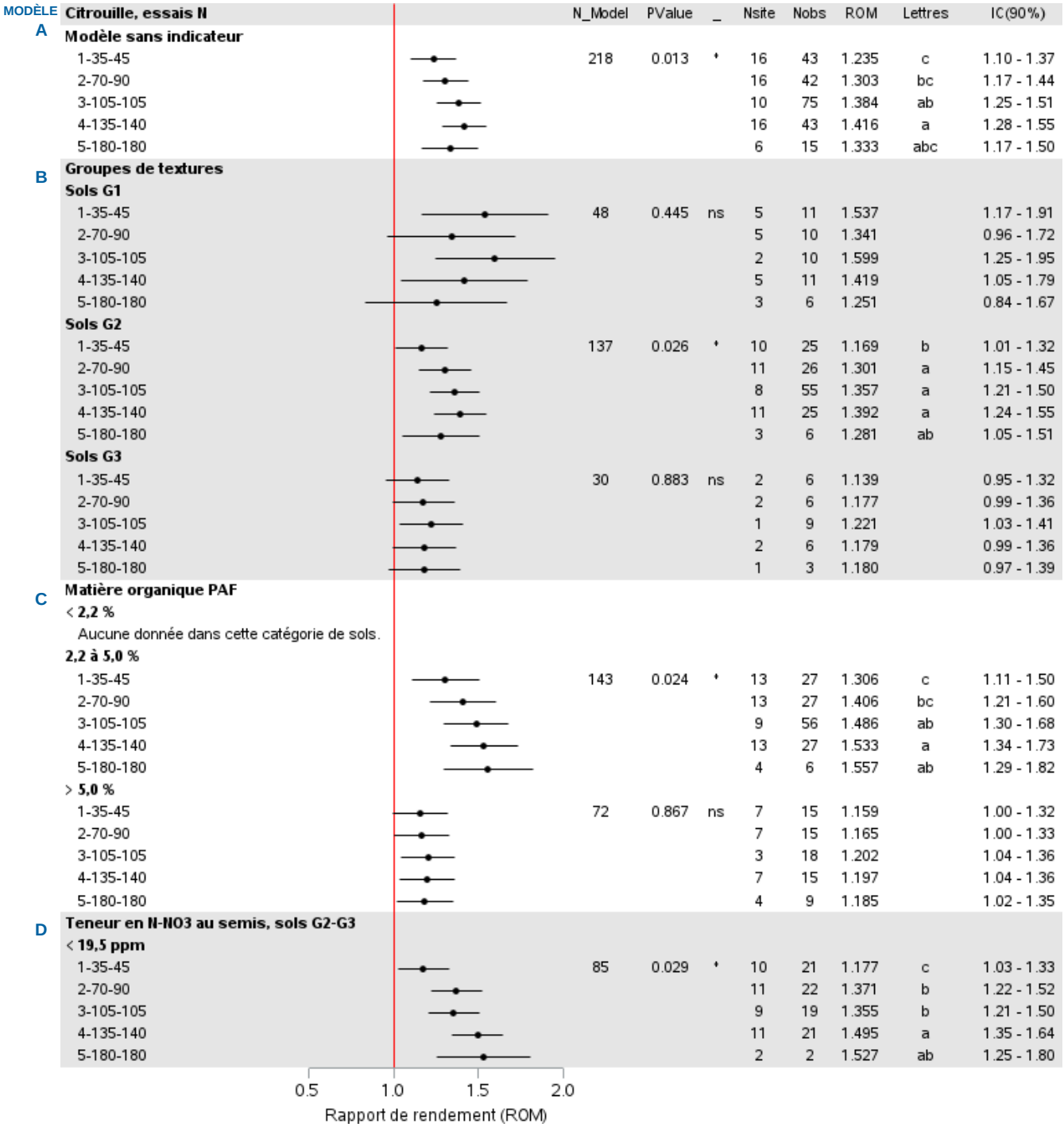

Figure 5. Résultats des analyses de variance sur la réponse de la citrouille aux doses croissantes d'azote. G1 : sols à texture fine ; G2, sols à texture moyenne ; G3 : sols à texture grossière ; N_model : nombre d'observations du modèle ; Nsite : nombre de sites ; Nobs : nombre d'observations ; ROM : rapport de rendement (rendement parcelle fertilisée/rendement parcelle témoin) ; IC : Intervalle de confiance ; Les moyennes d'une même catégorie qui ne partagent pas la même lettre sont significativement différentes au seuil $P < 0,12$.

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

Comme expliqué précédemment, les analyses en vue de déterminer les doses agronomiques optimales ont été effectuées sur le rendement total plutôt que sur le rendement vendable en raison des critères trop restrictifs de classification des citrouilles dans le PSEFCM (10/16 sites validés) quant aux calibres et à l'immaturité du fruit, lesquels ont occasionné des pourcentages de pertes anormalement élevés en comparaison à ceux habituellement observés chez les producteurs. Dans les essais du MIRVRF, les critères ont été ajustés pour refléter la réalité du marché. La taille et l'immaturité des fruits sont des facteurs d'une importance moindre dans le contexte de la mise en marché des citrouilles, souvent récoltées en autocueillette ou pour la vente aux marchés publics et choisies à des fins décoratives rendant attrayantes toutes les tailles et formes. Pour ces raisons, l'analyse des pertes selon les doses d'azote n'a été réalisée qu'en considérant les données du MIRVRF (6/16 sites, Figure 6). Les résultats sont présentés à titre indicatif seulement, les analyses en vue de déterminer la dose agronomique optimale ayant été effectuées sur le rendement total plutôt que le vendable. Selon les résultats, l'application de N a contribué à la diminution des pertes à la récolte (P = 0,038). Exception faite de la dose de 70-90 N, la diminution des pertes a été la même à partir de la plus petite dose testée (35-45 N). Dans tous les cas, les apports de N ont conduit à une diminution des pertes, indiquant que les doses recommandées en fonction des ANOVA sont sécuritaires pour cet aspect.

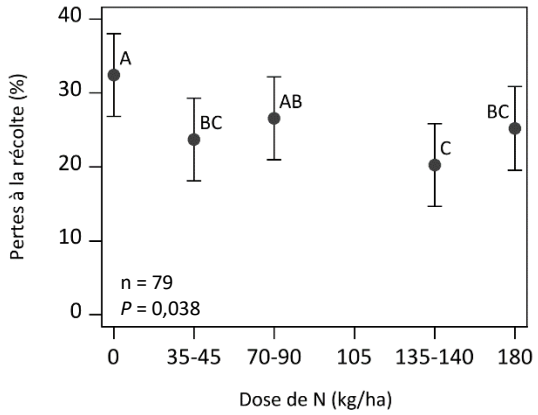

Figure 6. Effet des doses de N sur les pertes à la récolte. Essais du MIRVRF seulement. Les moyennes qui ne partagent pas la même lettre sont significativement différentes entre elles (LSD, P < 0,12). Les barres représentent les erreurs-types. n : nombre d'observations.

Dans le cadre du MIRVRF, sur l'ensemble des traitements, les pertes à la récolte ont été majoritairement (66 à 80 %) causées par l'obtention de citrouilles de trop petit calibre, tandis qu'entre 4 et 12 % du rendement non-vendable a été rejeté pour immaturité (Figure 7). De plus, la dose de N n'a pas affecté significativement les pertes pour immaturité (P = 0,278), contrairement à certaines références qui indiquent que les excès de N pourraient retarder la production des fruits primaires et nuire à l'atteinte du stade de maturité des fruits (Swiader et al., 1988, Swiader et al., 1994).

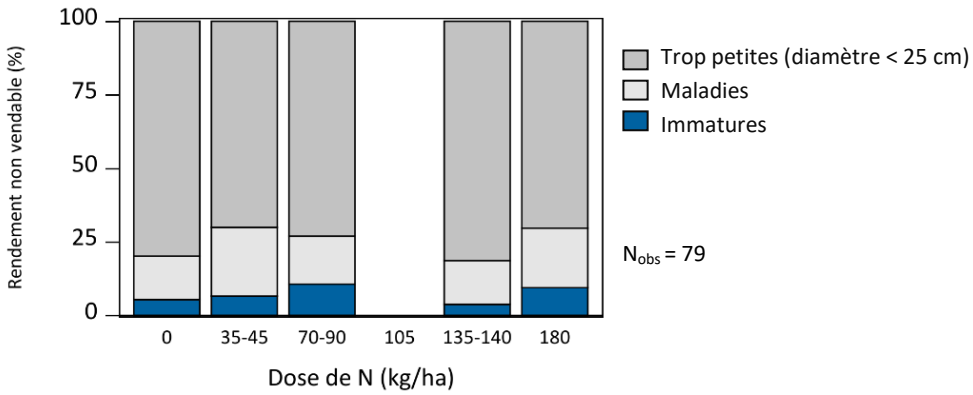

Figure 7. Répartition des pertes à la récolte en fonction des doses croissantes d'azote. Essais du MIRVRF seulement.

2.3 Diagnostic nutritionnel et exportations en azote

La citrouille est une culture qui présente des différences variétales importantes, tant pour la forme, la couleur et la taille que pour la composition chimique (Biesiada et al., 2011; Gajewski et al., 2008). Ces différences ont été observées dans le cadre des essais pour la teneur en éléments nutritifs des différentes variétés (Tableau 10).

Tableau 10. Concentrations et exportations en N selon les variétés de citrouille

	Nombre de sites	Humidité	Exportations			Rendement total
			(kg N/t humide)		(kg N/ha)	(kg/ha)
		(%)	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Moyenne
Sorcerer	1	90	2,89	0,78	163	56 589
Cronus	1	96	1,72	0,32	53	31 253
Magic Lantern	4	93	1,51	0,35	89	58 413
Orange Sunrise	2	95	1,19	0,26	75	64 317
Zeus	2	94	1,18	0,23	64	54 658
Aladin	3	95	1,17	0,36	45	40 175

Les concentrations et les exportations de N dans les citrouilles en fonction du diagnostic nutritionnel sont présentées au Tableau 11. La population de tête (groupe d'individus à haut rendement et à l'équilibre nutritionnel) a eu une concentration moyenne en N de 1,32 ± 0,40 kg/tonne humide (Tableau 11), pour une humidité de 94 %. Dans l'actuel guide de référence en fertilisation du Québec (CRAAQ, 2010), aucune valeur de concentration n'est présentée pour la culture de la citrouille. La valeur mesurée dans cette étude est similaire à celle présentée par l'USDA Plants Database (USDA, 2021), soit, 1,55 kg N/tonne humide, lorsque rapportée à 94 % d'humidité. Au Michigan, Warncke et al. (2004) rapportent quant à eux une valeur un peu plus élevée mais assez similaire à celle de la présente étude, soit 1,8 kg/tonne.

Considérant un rendement total moyen de 67 569 kg/ha, les exportations de la population de tête ont varié de 54 à 172 kg N/ha, avec une moyenne de 89 kg N/ha. Cette grande variation observée au niveau des exportations de la culture est probablement attribuable aux différents calibres produits et teneurs en éléments des tissus propres aux variétés, considérant qu'entre les variétés formant la population de tête, la concentration en N a

varié entre 1,02 et 2,13 kg par tonne humide, pour un coefficient de variation de 36 %. Ces variations des exportations inter-variétés et intra-population (déterminées par le diagnostic nutritionnel) sont observables à la Figure 8. Par ailleurs, cette variation spécifique aux variétés est en accord avec les travaux d'autres auteurs démontrant également que la composition chimique des citrouilles (et autres cucurbitacées) varie grandement entre les variétés (Biesiada et al., 2011; Gajewski et al., 2008).

Tableau 11. Concentrations et exportations en N 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 »)	94	1,32	0,40	89	85	54	172
Faible rendement et équilibre nutritionnel	94	1,27	0,27	67	60	55	99
Faible rendement et déséquilibre nutritionnel	94	1,60	0,75	76	63	26	231
Haut rendement et déséquilibre nutritionnel	93	1,66	0,78	106	92	44	220

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

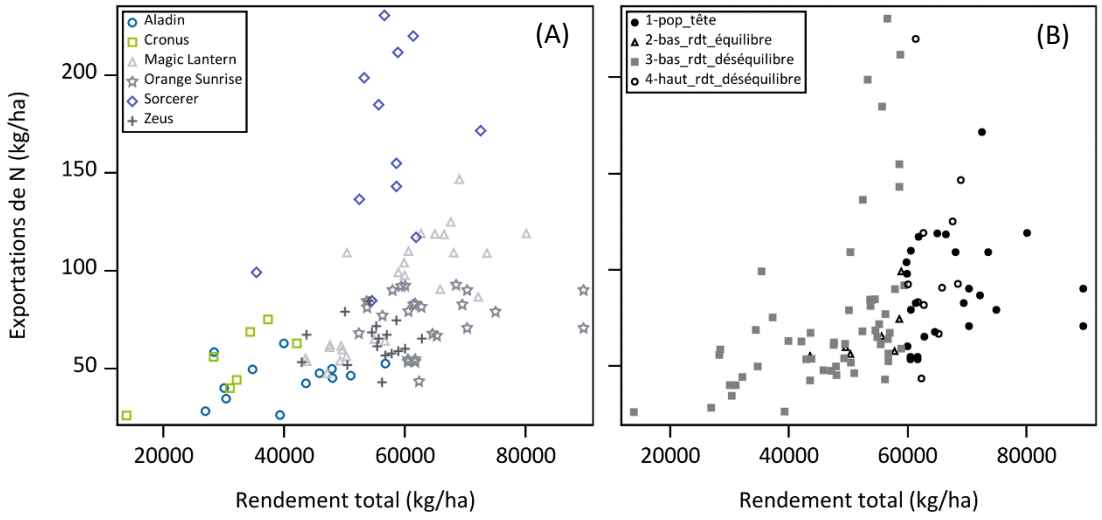

Figure 8. Exportations d'azote de la citrouille en fonction des rendements totaux selon les variétés (A) et le diagnostic nutritionnel (B).

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 ($N\text{-}NO_3$) résiduel a été mesuré immédiatement après la récolte sur deux profondeurs (0-30 et 30-60 cm) dans les essais du PSEFCM et sur la couche de sol de 0-30 cm uniquement dans le MIRVRF. Les concentrations en $N\text{-}NO_3$ des différents traitements ont été analysées en tant qu'« indice nitrate ». Cet indice s'obtient en divisant la teneur en $N\text{-}NO_3$ du traitement fertilisé par la teneur en $N\text{-}NO_3$ de la

parcelle témoin. Ainsi, un indice nitrate supérieur à 1 signifie qu'il y a une hausse (significative ou non) du nitrate dans les parcelles fertilisées, en comparaison du témoin.

Dans les sites de citrouille du PSEFCM, le protocole ne prévoyait ni de traitement 0 N randomisé dans le dispositif, ni le dosage du nitrate dans la bande de référence 0 N, ce qui a rendu impossible le calcul de l'indice nitrate. Ainsi, les résultats de l'analyse du nitrate résiduel dans le sol sont présentés exclusivement pour les sites du MIRVRF et pour la couche de surface (0-30 cm) seulement (Figure 9).

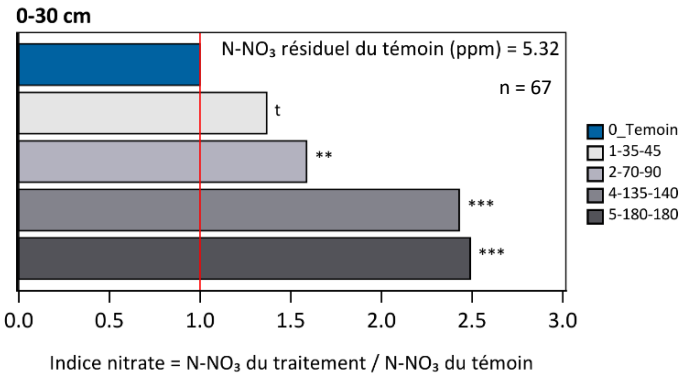

Figure 9. Indices nitrate des traitements d'azote de la citrouille à la profondeur 0-30 cm dans les sols des sites du MIRVRF. La statistique présentée à droite des barres horizontales indique si le traitement est différent du témoin 0 N. n : nombre d'observations; NS : non significatif ; t : tendance à $P < 0,12$; * : $0,05 > P > 0,01$; ** : $0,01 > P > 0,001$; *** : $P < 0,001$.

La fertilisation azotée a entraîné une hausse des teneurs en $N\text{-}NO_3$ dans le sol par rapport au témoin non-fertilisé. En effet, dès l'application de la plus petite dose de N, soit 45 kg N/ha dans le MIRVRF, l'augmentation tendait à être significative. À partir de 90 kg N/ha, l'augmentation en $N\text{-}NO_3$ résiduel a été croissante, de même que le niveau de signification associé. Aux plus fortes doses, les indices nitrate ont grimpé jusqu'à atteindre près de 2,5 fois la valeur du témoin. Ces résultats démontrent que malgré la réponse importante à l'engrais azoté, une partie de celui-ci demeure non prélevée et à risque d'être perdue après la récolte. Dans les sols propices au lessivage, divers aspects des VSRF pourront permettre d'atténuer le risque environnemental, notamment l'ajustement de la dose en fonction de la fertilité des sols, de même qu'un fractionnement de la dose totale en plusieurs apports afin de synchroniser les applications avec les besoins de la culture (Reid et al., 2019).

Malgré l'impossibilité de calculer l'indice nitrate sur les données du PSEFCM, des tests de comparaison des moyennes ont été effectués sur les teneurs en $N\text{-}NO_3$ (ppm) (données non présentées). Un effet significatif de la dose de N sur la teneur en $N\text{-}NO_3$ a été observé en surface (0-30 cm) et en profondeur (30-60 cm), respectivement à $P < 0,001$ et $P = 0,002$. En surface, les teneurs en $N\text{-}NO_3$ résiduel des parcelles ayant reçu les doses de N de 35 à 105 kg/ha (moyennes de 6,1 à 6,6 ppm) n'ont pas différé statistiquement entre elles, tandis que toutes ont été inférieures à celles des parcelles ayant reçu la dose de 140 kg/ha (moyenne de 8,8 ppm). La dose recommandée de 105 kg/ha pourrait donc ne pas conduire à un enrichissement trop important en comparaison de la dose de 35 kg/ha, choisie pour les sols plus pourvus en MO, en plus d'être préférable aux doses 135-140 kg/ha, que les ANOVA sur les rendements montraient comme également avantageuses dans les

sols de 2 à 5 % de MO. En profondeur, l'effet observé a été similaire, bien que seules les doses de N entre 35 et 70 kg/ha (moyennes de 2,7 à 2,8 ppm) aient statistiquement différé de la dose de 135 kg/ha (moyenne de 3,6 ppm), la dose de 105 kg/ha étant intermédiaire. Cette analyse n'a pas permis de comparer avec des parcelles témoin non-fertilisées. Les conclusions sont toutefois en adéquation avec celles issues de l'analyse des données du MIRVRF, soit que l'augmentation des doses de N peut conduire à une augmentation du $N\text{-}NO_3$ dans le sol dans la culture de la citrouille.

D'importantes quantités de $N\text{-}NO_3$ sont demeurées au sol à la fin du cycle cultural malgré la capacité de la culture à s'enraciner profondément, soit jusqu'à plus d'un mètre (Alberta Agriculture and Rural Developpement, 2014; OMAFRA, 2011). Les conditions du sol doivent toutefois être favorables afin que les cucurbitacées s'enracinent à leur plein potentiel (Warncke, 2007). Ceci concorde avec le fait que les coefficients apparents d'efficacité en azote ont été faibles, soit de 28 % en moyenne, variant de 18 à 45 % pour les doses plus élevées à plus faibles, tel qu'aussi observé par Naderi et al. (2017) pour la citrouille. La combinaison de ces observations pourrait suggérer que la culture a compté sur l'azote présent dans le sol, peut-être en profondeur, pour combler ses besoins plutôt que sur l'azote exogène, laissant ainsi une quantité résiduelle importante à la fin du cycle cultural. Enfin, il n'est pas non plus à exclure que les faibles CUA soient dus à des différences variétales qui n'ont pu être détectées dans les essais. En effet, certaines variétés pourraient avoir des besoins moins importants et laisser de plus grandes quantités de $N\text{-}NO_3$ au sol à la fin du cycle. De plus, il convient de mentionner que les coefficients apparents d'efficacité en azote ont été calculés exclusivement sur la base de trois sites du MIRVRF pour lesquels l'ensemble des données nécessaires étaient disponibles et que ceux-ci ont été partiels, étant donné que le feuillage n'a pas pu être considéré lors des calculs. Ces dernières observations sont donc à considérer avec prudence.

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

La fertilisation azotée proposée pour la culture de la citrouille au Québec est présentée au Tableau 12. La teneur en matière organique du sol a été retenue comme principal indicateur de fertilité des sols, en combinaison avec la teneur en $N\text{-}NO_3$ au printemps (au semis), laquelle permet de préciser la recommandation dans les sols de textures moyennes à grossières (G2 et G3).

À partir du seuil de MO_{PAF} de 5,0 % déterminé par le test de Cate-Nelson (section 2.2.1) et la borne inférieure du jeu de données, trois classes de fertilité du sol en azote ont été distinguées : 1) ≤ 2,1 % de MO_{PAF}, 2) 2,2 à 5,0 % de MO_{PAF} et 3) > 5,0 % de MO_{PAF}. Pour la première classe de fertilité, regroupant les sols ayant une teneur en MO_{PAF} inférieure à 2,2%, aucune donnée n'a été disponible, empêchant la réalisation d'ANOVA et la détermination d'une dose agronomique optimale de N. Dans cette classe, la dose testée subséquente à celle optimale pour la deuxième classe de fertilité (2,2 à 5,0 % de MO), soit 135 kg N/ha, est proposée. Malgré l'absence de données, celle-ci est jugée sécuritaire et adéquate. D'abord, les analyses de variances selon la teneur en $N\text{-}NO_3$ du sol montrent que cette dose est celle optimale dans les sols les moins pourvues en $N\text{-}NO_3$ au semis. De plus, des gains de rendements importants étaient observables dans les sols entre 2,2 et 5,0 % de

MO_{PAF}. Ainsi, il est probable qu'une dose de N plus élevée que 105 kg/ha permettrait des gains dans les sols les moins pourvus (< 2,2 % de MO), bien que ceux-ci ne faisaient pas partie des essais. Des études effectuées à l'étranger rapportent toutefois une réponse de la culture à des doses de N plus élevées (> 200 kg/ha) dans des sols faiblement pourvus (≤ 2,1 %) en matière organique (Chen et al., 2019; Naderi et al., 2017). Pour les sols ayant une teneur en MO_{PAF} comprise entre 2,2 et 5,0 %, la dose agronomique optimale de 105 kg N/ha est proposée. Au-delà du seuil de 5,0 % de MO_{PAF}, puisque les traitements de fertilisation n'ont pas différé statistiquement entre eux, la médiane du plus petit groupe de doses de N testées, soit 35 kg N/ha, a été retenue. Finalement, un modèle considérant le seuil agronomique de réponse de $N\text{-}NO_3$ de 19,5 ppm, déterminé avec le test de Cate-Nelson, permet d'ajuster la dose recommandée dans les sols G2 et G3. En effet, dans ces derniers, lorsque la teneur en $N\text{-}NO_3$ est inférieure à 19,5 ppm, l'apport de 135 kg N/ha est recommandé indépendamment de la teneur en MO.

Bien que les analyses aient été conduites dans l'ensemble sur les rendements totaux, les résultats suggèrent que les VSRF choisies permettront de minimiser les pertes de rendement à la récolte. En effet, les résultats de l'analyse réalisée sur les sites du MIRVRF ont permis d'observer qu'un apport de N minimal (35-45 kg N/ha) avait diminué significativement les pertes par rapport au témoin sans apport azoté, tandis que les pertes les plus faibles ont été obtenues avec l'application des doses de 135-140 kg N/ha. La dose de 105 kg N/ha n'a pas été testée dans le MIRVRF, seul programme pour lequel l'analyse des pertes a pu être effectuée.

En fonction du mode et de la somme des apports combinés de N et de K_2O, les doses totales proposées pourront être fractionnées en deux ou trois applications (semis + 1 ou 2 fractionnements). Ceci permettra d'éviter les problèmes de salinité et représentera davantage les pratiques actuelles, selon les diverses consultations tenues avec des agronomes et des experts terrains (Tableau 2). En effet, pour les applications en bande au semis, le MAAARO (2011) recommande de ne pas dépasser un apport de 100 kg/ha de $[N+K_2O]$ pour les cucurbitacées. Ainsi, par exemple, dans le cas d'un sol ayant moins de 44 ppm de K_{M3} et moins de 2,2 % de MO, 135 kg de N (Tableau 12) et 210 kg de K_2O (voir Tableau 24) seront recommandés, soit un total de 345 kg $[N+K_2O]$/ha. De ce fait, l'apport combiné de la dose au semis atteindra 115 kg $[N+K_2O]$/ha. Donc, dans le cas où l'engrais serait appliqué en bande (i.e. dans un sillon creusé et refermé), il est recommandé de reporter une partie de l'application en saison, en 1 ou 2 fractionnements, à moins de mettre une partie de l'engrais au semis à la volée, d'autant plus que dans les essais de fertilisation, les fortes doses de N et de K n'ont pas été testées en combinaison.

Comparativement aux recommandations actuellement utilisées au Québec (CRAAQ, 2010), les propositions de la présente étude sont similaires ou différentes, selon les classes de fertilité considérées (Tableau 13). En effet, les doses proposées de 135 ou 105 kg N/ha dans les sols de moins de 5,0 % de MO_{PAF} sont comparables à l'actuelle recommandation de 115 kg N/ha. Toutefois, dans les sols dont la teneur en MO_{PAF} est supérieure à 5,0 %, la recommandation d'un apport de 35 kg N/ha constitue une diminution notable. Il convient de mentionner que ces nouvelles VSRF sont spécifiques à la culture de la citrouille, alors que la recommandation actuelle du CRAAQ (2010), à l'instar de l'Ontario et de l'Alberta, regroupe plusieurs cucurbitacées qui présentent de grandes différences de développement et de production de biomasse. Les autres grilles présentées au Tableau 13, toutes américaines, proposent quant à elles des doses plus spécifiques à la citrouille ou aux cultures semblables, comme la courge d'hiver. Les doses recommandées par l'Ontario, l'Alberta et le Michigan étant

similaires à celle du CRAAQ, les mêmes conclusions peuvent être émises pour la comparaison avec les nouvelles VSRF du Québec. Les grilles du Mid-Atlantic, de la Nouvelle-Angleterre et de l'Illinois proposent quant à elles des intervalles de doses de N similaires aux présentes VSRF. Quant au choix de la matière organique comme indicateur de fertilité, il est également présent dans la grille de l'Illinois.

En comparaison de l'actuelle grille du CRAAQ (2010) dans laquelle se retrouvaient à la fois le concombre et la citrouille, il est intéressant de constater que les présentes VSRF démontrent que ces deux cultures se comportent différemment. En effet, les VSRF produites pour le concombre de transformation (voir le Fascicule 09 de cette série; Landry et al. (2022)) ont montré que la matière organique n'était pas un bon indicateur de fertilité dans cette culture, alors que l'inverse a été observé pour la citrouille.

Tableau 12. Fertilisation azotée de la citrouille – Valeurs scientifiques de référence en fertilisation

Groupe de textures [1]	Classe de fertilité MO_{PAF} (%) [2,3]	Période d'application [4 &]	Fractionnement [5] (kg N/ha)	VSRF [6] * (kg N/ha)
G1, G2, G3	(≤ 2,1)	Semis	45	(135) [7,8]
		En saison (en 1 ou 2 apports)	90	
	2,2 – 5,0	Semis	45	105 [9]
		En saison (en 1 ou 2 apports)	70	
	> 5,0	Semis	35	35 [10]

* Dans les sols des groupes de textures G2 et G3 ayant moins de 19,5 ppm de $N\text{-}NO_3$ au semis, un apport 135 kg N/ha est suggéré indépendamment de la teneur en MO. Le $N\text{-}NO_3$ a été dosé au KCl 2M en laboratoire sur la profondeur 0-30 cm.

& En fonction du mode d'application et de la quantité de $[N+K_2O]$ recommandée, la dose totale d'engrais peut être fractionnée en deux ou trois applications (semis, stades 2-3 feuilles et/ou stade boutons floraux) afin d'éviter les problèmes de salinité que peuvent engendrer les engrais azotés et potassiques.

[1] G1 : sols de texture fine ; G2 : sols de texture moyenne ; G3 : sols de texture grossière.

[2] MO_{PAF} : matière organique déterminée par la méthode par perte au feu.

[3] Le seuil de 2,2 % de MO_{PAF} représente la borne inférieure du jeu de données.

[4] Dans le cadre des essais, la première application des engrais a été effectuée après la levée (une à deux semaines après le semis) pour des raisons techniques.

[5] Les fractionnements proposés tels que testées lors des plus récents essais réalisés en 2021.

[6] VSRF : Valeur scientifique de référence en fertilisation.

[7] En absence de données en quantité suffisante pour cette catégorie de sols, le niveau de dose subséquent à la dose optimale de la classe de fertilité de sol suivante est proposé.

[8] Dans l'éventualité où de fortes doses de $N+K_2O$ seraient apportées en bande et non à la volée, dans le but d'amoindrir les risques de salinité au semis, une part des engrais peut être appliquée à la volée ou reportée à la deuxième application.

[9] Dose agronomique optimale dans cette catégorie de sols.

[10] Dose agronomique optimale sur la base des intervalles de confiance.

Mode et stade d'application des engrais

Les VSRF proposées dans le cadre de cette étude ont été calculées à partir d'essais de fertilisation réalisés en plein champ où l'azote a été appliqué de différentes façons selon les années (voir Tableau 2). Dans l'éventualité où le mode d'apport d'une entreprise agricole serait différent (ex.: volée) de ceux testés, un suivi est recommandé puisqu'un ajustement des doses pourrait être requis.

Fractionnement des doses de N

En 2021, les doses de N les plus élevées ont été apportés en trois apports plutôt que deux, et les stades visés ont été ajustés en conséquence afin de mieux synchroniser les apports avec les prélèvements de la culture et d'atténuer les risques de salinité au semis (MAAARO, 2011). Dans l'éventualité où les apports combinés de N et de K au semis dépasseraient le seuil critique de 100 [N+K_2O] kg/ha, une partie de l'apport au semis pourrait être appliquée à la volée, ou la balance d'engrais pourrait être apporté en deux fractionnements de saison. Pour une régie de fertilisation comprenant trois moments d'apports, les périodes et les doses suggérées sont les suivantes, conformément à ce qui a été testé :

Groupe de textures	Classe de fertilité MO_{PAF} (%)	Période d'application	Fractionnement (kg N/ha)	VSRF (kg N/ha)
G1, G2, G3	(≤ 2,1)	Semis	45	(135)
		Stade 2-3 feuilles	45	
		Stade boutons floraux	45	
	2,2 – 5,0	Semis	35	105
		Stade 2-3 feuilles	35	
		Stade boutons floraux	35	
	> 5,0	Semis	35	35 [10]

Méthode de dosage du nitrate au semis

Le nitrate au semis a été dosé par la méthode au KCl 2M dans un laboratoire certifié. La corrélation entre la méthode KCl et d'autres méthodes, par exemple le Nitracheck, n'a pas été évaluée. Comme les seuils peuvent varier selon la méthode (Wetselaar et al., 1998), il n'est pas possible, pour l'instant, d'émettre un seuil équivalent pour une autre méthode. De plus, actuellement au Québec, l'analyse de la teneur en nitrate dosée au KCl ne fait pas partie des paramètres analysés systématiquement par les entreprises à chaque début de saison. Pour ces raisons, la proposition de diminuer la dose à un seuil de N-NO_3 a été intégrée sous la forme d'une note de bas de tableau plutôt que comme indicateur de fertilité principal.

Dans le cas où des contraintes de temps ne permettraient pas de recevoir le résultat du dosage du NO_3 dans un délai permettant l'ajustement de la fertilisation avant la date prévue du semis, l'agronome en charge de la recommandation pourrait décider d'ajuster la dose en fonction du NO_3 du sol au fractionnement, bien que cette façon de procéder n'a pas été testée dans le cadre des essais.

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

Province / état	Cultures ciblées par la grille	Mode et période d'application	Fractionnement	Indicateurs		Dose N (kg/ha)	Source
				Fertilité du sol	Rendement visé		
Québec (CAN)	Concombre, cornichon, citrouille, melon, courge	À la volée avant le semis En bande à l'apparition des fleurs **Dose totale**	Oui	-	-	80 35 **115**	CRAAQ (2010)
Ontario (CAN)	Concombre, cantaloups, melons, citrouille, courge	À la volée avant le semis À la volée, avant que les vignes ne courent **Dose totale**	Oui	-	-	65 45 **110**	MAAARO (2011)
Alberta (CAN)	Cucurbitacées	À la volée et incorporé avant le semis A la volée, avant que les vignes ne courent **Dose totale**	Oui	-	-	63 29-33 **92-96**	Alberta Agriculture and Rural Developement (2014)
Michigan (É-U)	Citrouille	À la volée et incorporé avant le semis A la volée, avant que les vignes ne courent **Dose totale**	Oui	-	-	45 45 **90**	Warncke et al. (2004)
Mid-Atlantic (É-U)	Citrouille et courge d'hiver	À la volée et incorporé avant le semis A la volée, avant que les vignes ne courent **Dose totale**	Oui	-	-	28-56 28-56 **56-112**	Virginia Cooperative Extension (2020)
Nouvelle Angleterre (É-U)	Citrouille et courge d'hiver	À la volée et incorporé à la transplantation En bande au semis (semis direct) A la volée, avant que les vignes ne courent **Dose totale**	Oui	-	-	56 22-45 45-56 **67-112**	University of Massachusetts Amherst (2022)
Illinois (É-U)	Citrouille et cultures similaires	Au semis À la volée avant que les vignes ne courent **Dose totale**	Oui, sol sableux	MO	15-25 t/acre	 **34-111**	Swiader (2006)
New York (É-U)	Citrouille	À la volée et incorporé à la transplantation OU en bande au semis A la volée, avant que les vignes ne courent **Dose totale**	Oui	-	-	45 22-34 22-34 **44-79**	Reiners (2012)

3. FERTILISATION PHOSPHATÉE

3.1 Portrait et représentativité des données

La répartition des blocs des essais de fertilisation phosphatée à travers les différentes classes de propriétés de sol (0-20 cm) est présentée au Tableau 14. Le pH optimal pour la culture des cucurbitacées est établi à 6,3 au Québec (CRAAQ, 2010) et entre 6,1 à 6,5 en Ontario (MAAARO, 2011). Seulement 17 % des essais se situaient dans cet intervalle, bien que dans l'ensemble, 45 % ont eu un pH entre 6,0 et 7,0. Près du tiers des blocs des essais ont eu un pH sous-optimal (entre 5,5 et 6,0), ce qui pourrait influencer l'expression de la réponse au P en raison du fait que le P disponible pourrait être fixé par le fer et l'aluminium du sol à la suite de son application (Busman et al., 2002). Les trois groupes de textures (G1, G2 et G3) ont été représentés de façon inégale dans le jeu de données : en effet, les sols de textures moyennes (G2) ont prédominé à 65 %, tandis que les G1 et les G3 ont constitué respectivement 21 et 14 % de la base de données validée. Cette situation représente probablement la réalité terrain puisque la culture des cucurbitacées n'est pas recommandée en sol lourds, susceptibles à la compaction (MAAARO, 2011). Par ailleurs, dans les sols G1 et G2, les sols faiblement ou moyennement saturés en P ont été bien représentés (Tableau 14). Par contre, les sols G3 couvraient un plus petit intervalle d'ISP_1 (entre 4,7 et 9,7 % d'ISP_1), et ne présentaient aucun sol faiblement saturé (≤ 3,8 %). Ainsi, la réponse à la fertilisation dans les sols G3 pourrait être inadéquatement représentée dans cette étude. Enfin, toutes textures confondues, 65 % des blocs ont eu un ISP_1 inférieur à 8,0 % et 75 % contenaient moins de 100 ppm de P_{M3} (ou 224 kg/ha).

Tableau 14. Répartition des blocs des essais P selon différentes classes de propriétés de sol après la validation des données

pH_{eau}[1]	Blocs (%)	ISP_1 (%) [2]	Blocs (%)	ISP_1 (%) [2]	Blocs (%)		ISP_1 (%) [2]	Blocs (%)	P_{M3} (ppm)	Blocs (%)	Gr. de textures[3]	Blocs (%)
			G1		G2	G3		G1-G2-G3				
5,5 - 6,0	28	≤ 3,8	47	≤ 3,8	30	0	≤ 2,0	11	≤ 50	36	G1	21
6,0 - 6,5	17	3,8 - 7,6	33	3,8 - 6,5	18	45	2,0 - 4,0	21	50 - 100	39	G2	65
6,5 - 7,0	28	7,6 - 15,2	20	6,5 - 13,1	18	55	4,0 - 8,0	33	100 - 200	11	G3	14
> 7,0	28	> 15,2	0	13,1 - 20	12	0	8,0 - 12,0	8	200 - 300	12	-	-
-	-	-		> 20	22	0	12,0 - 16,0	7	300 - 400	2	-	-
							> 16,0	19				

[1] Le pH du sol optimal pour les cucurbitacées est de 6,3 au Québec (CRAAQ, 2010) et de 6,1 à 6,5 en Ontario (MAAARO, 2011).
[2] ISP_1 : indice de saturation en phosphore = [P_{M3} /Al_{M3}] × 100, éléments extraits au Mehlich-3 (Mehlich, 1984).
[3] 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'ISP_1, le pH_{eau} et la teneur en argile ont été vérifiés avec le test de Cate-Nelson (1971). Lorsque possible, ces indicateurs ont été testés à l'intérieur des groupes de textures G1, G2 et G3. Dans le but d'alléger la présentation des résultats, seuls les paramètres statistiques des principaux indicateurs significatifs sont présentés (Tableau 15). Parmi tous les indicateurs de fertilité testés, la teneur en

P_{M3} et l'indice de saturation en P ont été les plus performants afin de prédire la réponse à la fertilisation de la citrouille.

Toutes textures confondues, le test de Cate-Nelson a permis de déterminer un seuil de réponse à 12,0 % d'ISP_1. Pris individuellement, aucun seuil n'a pu être déterminé dans les sols du groupe G1 en raison du faible nombre de données disponibles (7 observations). Dans les sols des groupes G2 et G3, un seuil de réponse d'ISP_1 de 10,0 %, a été déterminé. Contrairement aux autres seuils retenus, celui-ci présente une valeur de *P* supérieure au seuil habituel de 0,12 (*P* = 0, 382). De plus, la précision de la partition est de 65 %, une valeur légèrement inférieure à celle de 70 % généralement visée. L'investigation du jeu de données a révélé que la présence des points dans le quadrant des faux négatifs (voir Figure 4) qui ont abaissé le niveau de précision et de signification s'expliquait par le pH des sols non optimal (autour de 5,6 ou entre 7,1 et 7,4) et par les différences variétales chez la citrouille. En effet, la totalité de ces faux négatifs provenaient d'essai réalisés avec la variété Magic Lantern. De plus, ce seuil permet de mieux tenir compte du patron d'évolution des rendements relatifs de la culture. Quant au P_{M3}, un seuil a été établi à 129,8 ppm, toutes textures confondues, mais en raison du fait que l'ISP_1 est reconnu comme un meilleur indicateur de la biodisponibilité du P que le P_{M3} seul (Khiari et al., 2000), l'ISP_1 a été retenu pour la suite des analyses.

Tableau 15. Valeurs critiques des indicateurs potentiels de sols significatifs selon les tests de Cate-Nelson pour les essais P de la citrouille

Indicateur de sol [1]	Groupes de textures [2]	n [3]	Valeur critique	RRel [4] (%)	Sensitivité	Spécificité	Précision	*P*
ISP_1 (%)	G1, G2, G3	33	12,0	83	0,45	0,86	0,73	0,082
	G2, G3	26	10,0	84	0,44	0,77	0,65	0,382
$P_{Mehlich-3}$ (ppm)	G1, G2, G3	33	129,8	83	0,36	0,91	0,73	0,146

[1] ISP_1 = indice de saturation en phosphore = [P_{M3}/Al_{M3}] × 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] n : Nombre d'observations.
[4] RRel : Rendement relatif (100 × rendement du témoin/rendement maximum par bloc).

3.2.2 Étude de l'effet de la dose de phosphore sur le rendement total

Les résultats des analyses de variance (ANOVA) sont illustrés à la Figure 10. Pour plus d'explication concernant l'interprétation de la figure, consulter la section 2.2.2. Quatre modèles sont présentés : sans indicateur (A) ; selon les groupes de textures (B); selon l'ISP_1 en fonction du seuil agro-environnemental de 7,6 % dans les sols G1 (C) et selon l'ISP_1 en fonction du seuil déterminé au Cate-Nelson et du seuil agro-environnemental de 13,1 % dans les sols G2 et G3 (D).

Les analyses de variance réalisées sur l'ensemble du jeu de données (modèle A, sans indicateur, n = 170) ont révélé un effet significatif de la fertilisation phosphatée sur le ROM (*P* = 0,033), avec des gains moyens de 18,3 à 33,9 %. La dose agronomique optimale, soit la plus petite dose menant au meilleur gain de rendements, a été de 60 kg P_2O_5/ha, toutes textures et saturations en P confondues.

L'analyse par groupe de textures de sol (modèle B), suggère que l'effet significatif de doses observé au modèle A reposait probablement principalement sur les sols de textures G2 et G3. En effet, les résultats indiquent que la dose agronomique optimale pour ces sols tendait vers 60 kg P_2O_5/ha, menant à des gains de rendements moyens de 18 % par rapport au témoin (*P* = 0,123; n = 135). Des gains plus importants ont été enregistrés avec

les doses de 77-90 kg P_2O_5/ha (gains de 26 %), mais le test de comparaison de moyennes indique que ce résultat n'est pas différent de celui de la dose précédente au seuil de $P \leq 0,12$ (1,18 **ab** vs. 1,26 **a**). En contrepartie, dans les sols G1, la présence d'une part importante de sols ayant un ISP_1 sous 3,8 % pourrait expliquer les ROM élevés mesurés pour ce groupe. L'effet de doses n'est toutefois pas ressorti comme statistiquement significatif ($P = 0,331$; n = 34), probablement en partie à cause du peu d'essais établis dans ce groupe de sols et à la grande variation mesurée des ROM (larges intervalles de confiance). Bien que le modèle soit non significatif, les ROM moyens obtenus suggèrent tout de même que l'apport de la plus petite dose testée (30 kg P_2O_5/ha) pourrait, dans certains cas, être insuffisante pour la nutrition de la culture. En effet, des gains appréciables (72 %) et des intervalles de confiance plus sécuritaires (> 1) sont obtenus avec la dose suivante, soit 60 kg P_2O_5/ha.

Dans le modèle C, l'effet des doses de P_2O_5 selon l'ISP_1 n'a pas pu être étudié dans les sols G1 d'ISP_1 inférieur à 2,0 % en raison de l'absence de données dans cette catégorie de sols. En absence d'un seuil déterminé au test de Cate-Nelson, l'intervalle étudié est donc constitué de la borne d'ISP_1 inférieure du jeu de données (2,0 %) et du seuil agro-environnemental (7,6 %). Dans cet intervalle, l'effet des doses de P_2O_5 a été non significatif ($P = 0,738$). Tel qu'observé précédemment pour ces sols (modèle B), les ROM ont varié grandement et des gains de rendements élevés (33 à 106 %) ont été obtenus par rapport au témoin non fertilisé. Les intervalles de confiance étaient larges, dû à la difficulté du modèle à estimer les effets, considérant le faible nombre d'essais. Cependant, malgré l'absence de différence significative entre les ROM, la dose de P_2O_5, les intervalles de confiance suggèrent que la dose de 60 kg/ha est celle étant la plus susceptible d'entraîner les meilleurs gains de rendements (gains de 47 à 165 %), en plus de n'avoir posé aucun risque de pertes (intervalles de confiance du ROM strictement > 1). Enfin, dans les sols de plus de 7,6 % d'ISP_1, les traitements n'ont pas différé entre eux, suggérant que l'application de la plus petite dose testée a été suffisante (gain moyen de 68 % par rapport au témoin).

Enfin, les résultats du modèle D a permis de préciser ceux du modèle B pour les sols G2-G3. L'effet de la fertilisation phosphatée sur le ROM a été significatif dans les sols d'ISP_1 inférieurs à 10 % ($P = 0,049$; n = 89). Le groupe de doses 77-90 kg P_2O_5/ha a mené aux meilleurs gains de rendements, soit 43,6 % en moyenne. De ce groupe de doses, la médiane, soit 90 kg P_2O_5/ha, a été retenue comme dose optimale. Au-delà de ce seuil et jusqu'au seuil agro-environnemental de 13,1 %, aucune différence significative n'a été observée entre les traitements, suggérant que la plus petite dose testée (60 kg/ha) a été suffisante dans cette catégorie de sols (gain moyen de 7,8 %). Peu d'observations constituaient cette catégorie de sols moyennement saturés en P, ce qui pourrait expliquer que les intervalles de confiance soient larges. À partir de 13,2 % d'ISP_1, l'apport des plus petites doses testées, soit 30-39 kg/ha de P_2O_5, a été adéquat pour l'obtention des meilleurs rendements (gains moyens de 4 % jusqu'à 26,2 % d'ISP_1 et de 11 % au-delà de cette valeur).

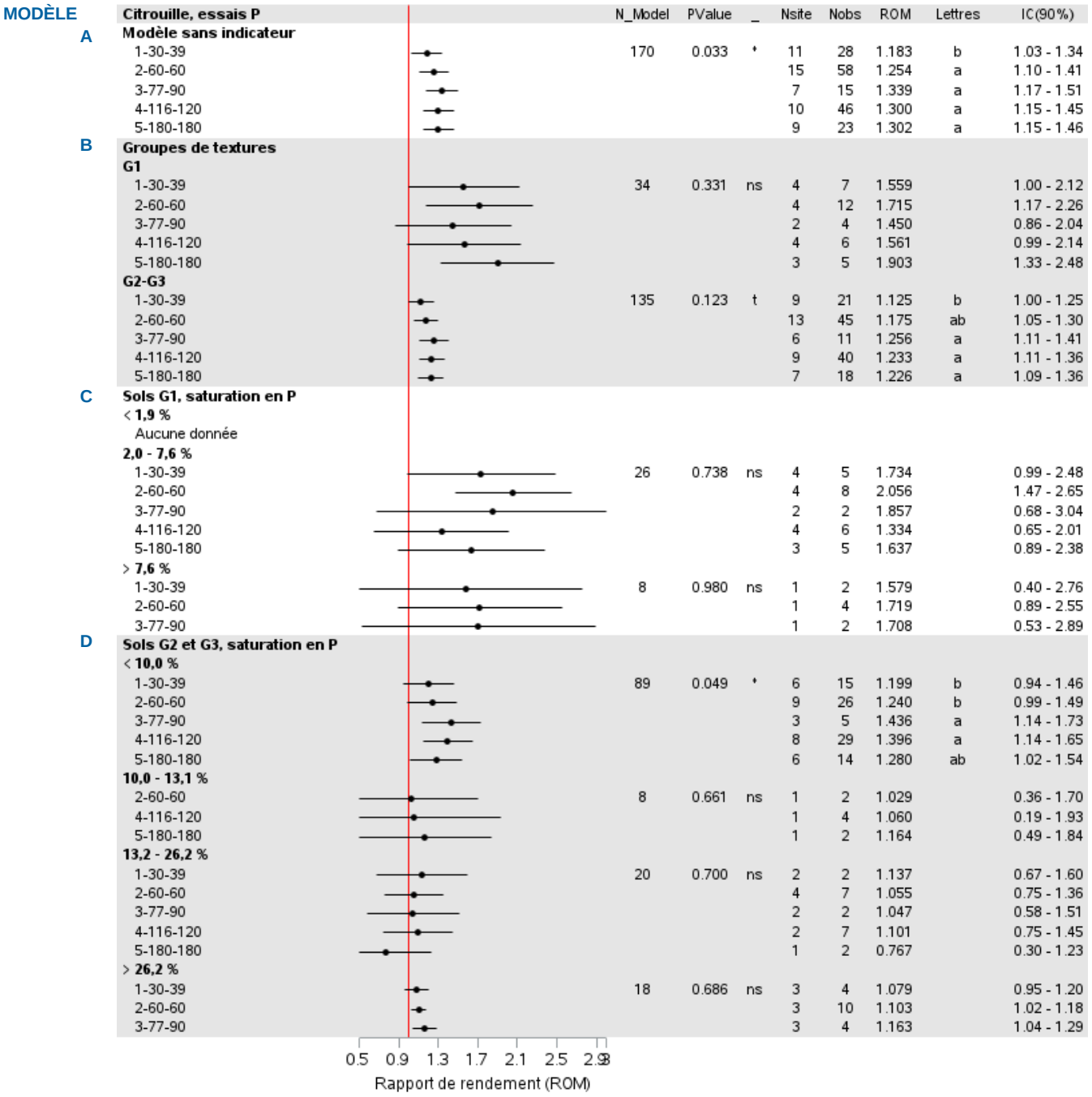

Figure 10. Résultats des analyses de variance sur la réponse aux doses croissantes de P_2O_5. G1 : sols à texture fine ; G2 : sols à texture moyenne ; G3 : sols à texture grossière ; N_model : nombre d'observations du modèle ; Nsite : nombre de sites ; Nobs : nombre d'observations ; ROM : rapport de rendement (rendement parcelle fertilisée/rendement parcelle témoin) ; IC : Intervalle de confiance ; Lettres : résultats du test de comparaison des moyennes.

3.2.3 Effet de la dose de phosphore les pertes à la récolte

Pour les raisons expliquées à la section 2.2.3, les analyses des pertes à la récolte ont été effectuées sur les sites du MIRVRF uniquement. De plus, celles-ci sont présentées à titre indicatif seulement, les analyses en vue de

déterminer la dose agronomique optimale ayant été effectuées sur le rendement total plutôt que le vendable. Les résultats, présentés à la Figure 11, n'ont pas démontré d'effet significatif de l'apport de P_2O_5 sur les pertes de rendement à la récolte (P = 0,251). Toutefois, bien que l'effet ait été non significatif, l'apport de P par fertilisation a entraîné une diminution numérique des pertes de rendements dès la plus petite dose. Le pourcentage de pertes le plus élevé (36,8 %) a donc été enregistré dans le traitement témoin, alors que le plus faible pourcentage (21,9 %) a été obtenu avec la dose la plus élevée.

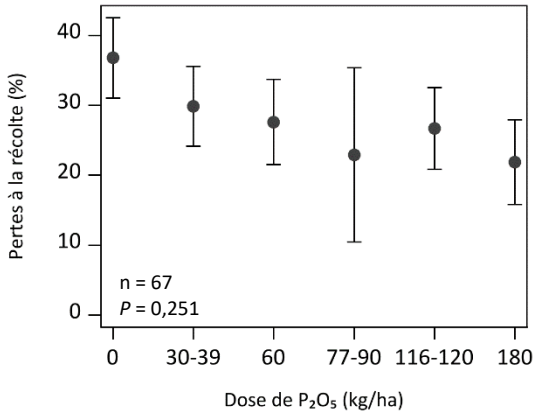

Figure 11. Effet des doses de P_2O_5 sur les pertes à la récolte. Essais du MIRVRF seulement. n : nombre d'observations.

Dans l'ensemble des traitements de fertilisation, les pertes ont été majoritairement causées par des citrouilles trop petites, soit ayant un diamètre de moins de 25 cm, tandis que l'occurrence de maladies et de citrouilles immatures est restée faible. Hormis la dose de 77-90 kg/ha, les pertes dues à un trop petit diamètre ont été numériquement plus élevées pour les deux plus petites doses testées (Figure 12).

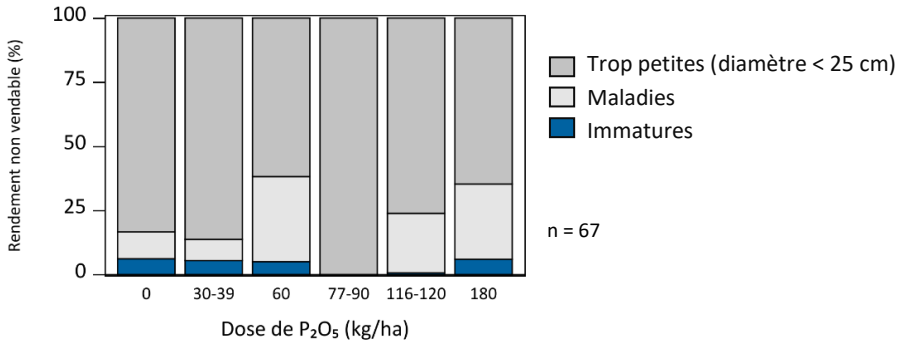

Figure 12. Répartition des pertes à la récolte en fonction des doses croissantes de P_2O_5. Essais du MIRVRF seulement. n : nombre d'observations.

3.3 Diagnostic nutritionnel et exportations en phosphore

Les moyennes des concentrations et des exportations en P_2O_5 de la citrouille sont présentées au Tableau 16 pour l'ensemble des variétés. Les valeurs se situent généralement entre 0,34 et 0,66 kg P_2O_5/tonne humide, bien que la variété Sorcerer ait enregistré des valeurs de 1,14 kg P_2O_5 et plus par tonne humide.

Tableau 16. Concentrations et exportations en P_2O_5 selon les variétés de citrouille

	Nombre de sites	Humidité	Exportations			Rendement total
			(kg P_2O_5/t humide)		(kg P_2O_5/ha)	(kg/ha)
		(%)	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Moyenne
Sorcerer	1	90	1,14	0,27	64	56 589
Cronus	1	96	0,66	0,15	21	31 253
Orange Sunrise	2	95	0,42	0,10	27	64 317
Zeus	2	94	0,42	0,08	23	54 658
Magic Lantern	4	93	0,39	0,07	23	58 413
Aladin	3	95	0,34	0,10	13	40 175

Les valeurs calculées d'humidité, de concentrations et d'exportations en P_2O_5 en fonction du diagnostic nutritionnel sont présentées au Tableau 17. La population de tête, présentant des hauts rendements et à l'équilibre nutritionnel, a eu 0,49 ± 0,14 kg P_2O_5 par tonne humide de rendement (94 % d'humidité). Cette concentration en P_2O_5 a résulté en une exportation moyenne, à l'hectare, de 33 kg P_2O_5 pour un rendement humide total de 67 569 kg. Les exportations ont varié entre 22 et 73 kg P_2O_5/ha. Dans l'actuel guide de référence en fertilisation du Québec (CRAAQ, 2010), aucune valeur de concentration n'est présentée pour la culture de la citrouille, faisant en sorte que ces nouvelles valeurs sont un gain de connaissances pour la production de citrouilles au Québec. La concentration en P_2O_5 obtenue dans le cadre de cette étude est très similaire à celle présentée au Michigan pour la citrouille, soit 0,54 kg de P_2O_5 par tonne de biomasse fraîche récoltée (Warncke et al., 2004). L'USDA Plant Database (2021) présente également une valeur équivalente à 0,54 kg P_2O_5 par tonne humide, si la tonne humide est rapportée à 94 % d'humidité comme dans la présente étude.

L'analyse de la Figure 13 et du Tableau 16 illustre qu'une bonne partie de la variabilité observée au niveau des exportations en P_2O_5 de la culture est due à des effets de variété, parfois difficiles à distinguer des effets de sites, certaines variétés ayant été testée sur un seul site. Le coefficient de variation inter-variétés a été de 55 %. Comme mentionné dans la section sur l'azote (section 2.3), la variation de la composition chimique en fonction des variétés a déjà été documentée dans la citrouille (Biesiada et al., 2011; Gajewski et al., 2008). Pour exemple, la variété Sorcerer a présenté des exportations particulièrement élevées malgré un rendement moyen, en raison de sa concentration en P_2O_5 qui atteint 1,14 kg/tonne, soit plus du double de la moyenne de la population de tête.

Tableau 17. Concentrations et exportations en P_2O_5 selon le diagnostic nutritionnel

	Humidité			Exportations[1, 2]			
	(%)	(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 »)	94	0,49	0,14	33	32	22	73
Faible rendement et équilibre nutritionnel	94	0,37	0,04	20	19	15	26
Faible rendement et déséquilibre nutritionnel	94	0,54	0,32	26	19	8	80
Haut rendement et déséquilibre nutritionnel	93	0,44	0,32	28	23	17	87

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

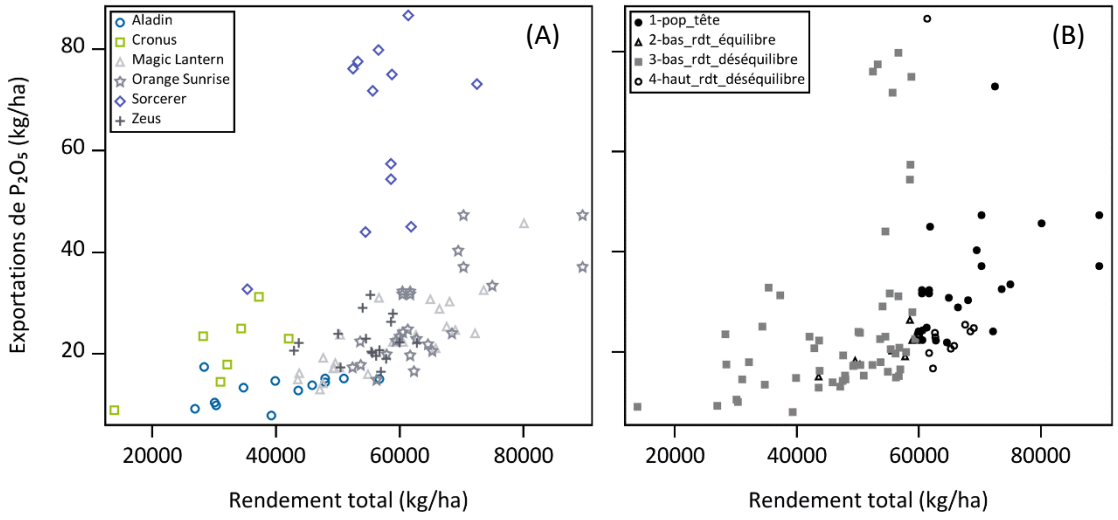

Figure 13. Exportations de phosphore de la citrouille en fonction des rendements totaux selon les variétés (A) et le diagnostic nutritionnel (B)

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

Les VSRF de P_2O_5 proposées pour la culture de la citrouille sont présentées au Tableau 18. Les groupes de textures des sols (G1 vs. G2-G3) ont été combinés à la saturation en P afin de créer les différentes classes de fertilité de sols. Dans les sols du groupe G1, aucun seuil n'a pu être déterminé avec le test de Cate-Nelson. C'est donc le seuil critique environnemental de 7,6 % d'ISP_1 qui a été utilisé pour déterminer les classes de fertilité. Dans les sols de moins de 7,6 % d'ISP_1, la dose agronomique optimale, déterminée sur la base des intervalles de confiance du modèle statistique, a été établie à 60 kg P_2O_5/ha. Dans ce groupe de sols, aucun n'avait une saturation en P inférieure à 2,0 %, ne permettant donc pas l'étude de la fertilisation dans cette classe. Il a toutefois été jugé adéquat d'étendre la recommandation de 60 kg/ha à cette classe de sols également. En effet, les exportations de la culture étant de seulement 33 kg P_2O_5 (de 22 à 73 kg P_2O_5), un apport de 60 kg est jugé suffisant pour couvrir les besoins en P de la culture sur ces sols faiblement saturés et qui tendent en général à fixer le P apporté

par fertilisation. Dans les sols ayant plus de 7,6 % d'ISP_1 et jusqu'à 15,2 %, c'est la dose de 30 kg P_2O_5/ha qui constitue la VSRF. Au-delà de cette valeur, aucune donnée ne faisait partie des essais de fertilisation. Toutefois, de la même façon qu'un apport de 0-30 kg P_2O_5/ha est proposé dans les sols G2-G3 de plus de 26,2 % d'ISP_1 (voir plus bas dans la section), un intervalle de 0 à 30 kg P_2O_5 est proposé pour les sols G1 saturés au double du seuil critique environnemental.

Dans les sols des groupes G2 et G3, le seuil d'ISP_1 de 10,0 %, déterminé au test de Cate-Nelson, combiné au seuil environnemental critique du REA a permis de délimiter quatre classes de fertilité phosphatée du sol. Dans la première classe, regroupant les sols ayant un ISP_1 inférieur ou égal à 10,0 %, la dose de 90 kg P_2O_5/ha a été optimale. Dans la classe de fertilité suivante, délimitée par un ISP_1 de 10,1 % et le seuil d'ISP_1 critique environnemental du REA (13,1 % d'ISP_1), la dose de 60 kg/ha, soit la plus petite dose testée en absence de différence entre les traitements, constitue la VSRF. Bien que peu de données aient été disponibles pour cette classe de fertilité de sols, cette dose a été considérée sécuritaire dans cette catégorie de sols, car elle couvre largement les exportations de la culture. À cela s'ajoute également le fait que ces sols ayant un ISP_1 compris entre 10,1 et 13,1 % ont une saturation en P de niveau moyen supérieur et par conséquent, une plus faible capacité fixatrice du P et une capacité plus élevée à fournir du P à la plante que la classe de fertilité précédente. Dans les sols dont l'ISP_1 est compris entre 13,1 et 26,2 %, la plus petite dose testée, soit 30 kg P_2O_5/ha est proposée. Pour la dernière classe de fertilité phosphatée, regroupant les sols ayant un ISP_1 supérieur à 26,2 %, des gains de rendements étaient encore perceptibles à la suite de l'application de P_2O_5. Toutefois, en raison du haut niveau de saturation en P dans ces sols, un intervalle de doses variant entre 0 et 30 kg P_2O_5/ha est proposé. La proposition d'une l'absence de fertilisation tient compte du fait que ces sols ont la capacité de fournir du P à la plante, et doit être validée selon le jugement de l'agronome et l'historique de fertilité du champ.

Le peu de données valides sur les pertes à la récolte n'a pas permis d'étudier convenablement l'effet de la fertilisation phosphatée. Ainsi, aucun ajustement des VSRF n'a été effectué sur cette base. Cependant, et à titre indicatif seulement, une diminution numérique des pertes a été observée suivant les applications de phosphore (section 3.2.3).

En ce qui a trait au mode d'apport, les VSRF sont proposées en une seule application au moment du semis. D'une part, la plupart des doses proposées sont trop faibles pour nécessiter un fractionnement. D'autre part, bien que certaines aient été testées selon un fractionnement dans le PSEFCM, elles ont été testées en entier sans fractionnement dans le MIRVRF. En effet, en comparaison de l'azote, il n'est pas d'usage de fractionner le P, étant donné sa faible mobilité une fois appliqué sur les sols. Toutefois, dans le cas où une contrainte technique d'application le justifierait, la plus forte dose proposée (90 kg P_2O_5/ha) pourrait être fractionnée en deux apports, tel que testé dans les essais, soit [60 + 30] kg/ha. L'apport de la première fraction de la dose se fera au semis, tandis que le deuxième apport pourrait être synchronisé avec ceux de N et K.

Les VSRF proposées dans le cadre de cette étude, soit de 0 à 90 kg P_2O_5/ha, sont inférieures aux recommandations actuelles du CRAAQ (2010), lesquelles varient de 40 à 180 kg/ha pour les sols contenant à l'hectare, respectivement, plus de 401 kg P_{M3} et moins de 50 kg P_{M3} (Tableau 18). Il convient de rappeler que les sols G3 ont été peu représentés dans les essais, ce qui pourrait expliquer en partie que les VSRF soient inférieures aux recommandations actuelles du CRAAQ (2010), où la plus forte dose recommandée est deux fois supérieure à la plus forte dose recommandée suivant les présents essais (180 vs. 90 kg/ha). Dans les sols G1, cet écart est

davantage important, tandis que l'actuelle recommandation est trois fois supérieure à la plus forte dose agronomique optimale obtenue dans ces essais (180 vs. 60 kg/ha). Toutefois, cela pourrait s'expliquer du fait que la recommandation actuelle du CRAAQ (2010), à l'instar des grilles ontariennes et albertaines, n'est pas spécifique à la Citrouille. En effet, elle s'applique à plusieurs cucurbitacées qui présentent de grandes différences de développement et de production de biomasse. Les doses recommandées en Ontario, au Michigan et en Illinois sont encore plus élevées, avec des doses maximales allant jusqu'à 302 kg P_2O_5/ha. L'intervalle des présentes VSRF est toutefois comparable à celles de l'Alberta, de la Nouvelle-Angleterre et de l'état de New York. De plus, la totalité des grilles autres que celles du CRAAQ (2010) et de l'Alberta intègrent un apport nul dans les sols les mieux pourvus en P, à l'instar de ce qui est suggéré par les présentes VSRF. Enfin, le mode d'application des engrais pourrait aussi expliquer les valeurs plus faibles des VSRF. En effet, les apports ont faits en bande dans les essais analysés, tandis que la pratique courante, tant au Québec qu'ailleurs (grilles externes), repose principalement sur l'application à la volée. Ainsi, l'efficacité accrue des engrais appliqués proche des plantules (CRAAQ, 2010) pourrait expliquer les meilleurs rendements atteints dès l'application des faibles doses, en comparaison d'une application faite à la volée et non incorporée. En considérant que les citrouilles sont semées avec un très grand espacement, l'efficacité du P à la volée est d'autant plus réduite vu son immobilité.

Tableau 18. Fertilisation phosphatée de la citrouille – Valeurs scientifiques de référence en fertilisation

Groupe de textures [1]	Classe de fertilité ISP_1 (%) [2, 3]	Période d'application [4]	VSRF [5] (kg P_2O_5/ha)
G1	(≤ 2,0)	Au semis	(60) [6]
	2,1 – 7,6		60 [7]
	7,7 – 15,2		30 [7]
	> 15,2		0 - 30 [8]
G2, G3	≤ 10,0	Au semis	90 [9]
	10,1 – 13,1		60 [7]
	13,2 – 26,2		30 [7]
	> 26,2		0 - 30 [7]

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

[2] ISP_1 : saturation en P du sol = $[P_{M3}/Al_{M3}] \times 100$, éléments extraits au Mehlich-3 (Mehlich, 1984) et dosés par spectroscopie d'émission au plasma (SEP ou *ICP : Inductively coupled plasma)*.

[3] Les catégories ont été déterminées en tenant compte des seuils environnementaux du REA (*Règlement sur les Exploitations Agricoles*; MDDEP, 2010).

[4] Dans le cadre des essais, la première application des engrais a été effectuée après la levée (1 à 2 semaines visées) pour des raisons techniques.

[5] VSRF : Valeurs scientifiques de référence en fertilisation.

[6] En absence de données dans cette catégorie de sols, la dose agronomique optimale de la classe suivante est reportée dans cette classe. En considérant les faibles exportations en P_2O_5 de la culture (33 kg P_2O_5/ha), cet apport devrait s'avérer suffisant afin de ne pas entraîner un bilan de phosphore qui soit négatif.

[7] Dose agronomique optimale pour cette catégorie de sols sur la base des intervalles de confiance du modèle.

[8] Aucune donnée dans cette catégorie de sols. Un intervalle est proposé sur la base des observations faites en G2-G3 pour des saturations en P équivalentes (le double du seuil critique environnemental de ce groupe de textures).

[9] Dose agronomique optimale.

Absence de données en dessous de 2,0 % d'ISP_1

Aucun essai de fertilisation n'a été établi sur des sols du groupe G1 ayant un ISP_1 inférieur à 2,0 %. Les exportations moyennes de la culture étant de 33 kg/ha, l'apport de 60 kg/ha a été considéré suffisant dans cette classe de fertilité. Considérant la grande variation (22 à 73 kg P_2O_5/ha) observée au niveau des exportations en P_2O_5 de la culture selon les variétés (voir section 3.3), si cette dose était jugée trop faible pour ces sols non-saturés et généralement fixateurs, la dose testée subséquente à celle proposée pourrait également être proposée, soit 90 kg P_2O_5/ha. Ce choix n'a cependant pas été retenu pour les VSRF.

Application du phosphore en une application unique

Dans le PSEFCM, les apports de P_2O_5 étaient fractionnés en deux applications. Cependant, dans le MIRVRF, ils ont été apportés en une seule dose. Ainsi, dans les sols G2-G3 ayant un ISP_1 inférieur à 10,0 %, afin d'uniformiser les recommandations, et en raison de la très faible mobilité du phosphore dans le sol limitant les risques de lessivages, l'apport de la dose de 90 kg/ha est proposé en une seule application. Cependant, si jugé nécessaire, celle-ci pourrait être apportée à raison de 60 + 30 kg/ha, telle que testée dans les essais du PSEFCM.

Tableau 19. Comparaison des recommandations en P_2O_5 pour la production de citrouille au Canada et à l'étranger

Province/ État	Cultures ciblées par la grille	Mode et période d'application	Fraction-nement	Indicateurs			Dose P_2O_5 (kg/ha)	Source
				Fertilité du sol	Objectif de rendement	Autres		
Québec (CAN)	Concombre, cornichon, citrouille, melon, courge			0-50 kg P_{M3}/ha 51-100 101-150 151-200 201-300 301-400 401 et +			180 155 140 120 85 55 40	CRAAQ (2010)
Ontario (CAN)	Concombre, cantaloups, melons, citrouille, courge		Non	P Olsen			0 – 230	MAAARO (2011)
Alberta (CAN)	Cucurbitacées	À la volée avant semis, incorporé En bande au semis	Non	P du sol	-	-	121 – 143 97 – 114	Alberta Agriculture and Rural Developement (2014)
Michigan (É-U)	Citrouille	À la volée et incorporé avant le semis ou en bande au semis	Non	P du sol (Bray-Kurtz ou Olsen)	15-25 lbs/acre		0 – 208	Warncke et al. (2004)
Mid-Atlantic (É-U)	Citrouille et courge d'hiver	À la volée et incorporé	Non	P du sol (Mehlich-3)			0 – 168	Virginia Cooperative Extension (2020)
Nouvelle Angleterre (É-U)	Citrouille et courge d'hiver	À la volée ou en bande, incorporé	Non	P du sol		Transplants Semis	0 – 123 0 – 45	University of Massachusetts Amherst (2022)
Illinois (É-U)	Citrouille et cultures similaires			P du sol	90 – 100% du maximum		0 – 302	Swiader (2006)
New York (É-U)	Citrouille	À la volée ou en bande, incorporé	Non	P du sol, faible à élevé		Transplants Semis	0 – 90 45	Reiners (2012)

4. FERTILISATION POTASSIQUE

4.1 Portrait et représentativité des données

La répartition des blocs des essais K de la citrouille selon différentes classes de propriétés de sol (0-20 cm) est présentée au Tableau 20. Le pH optimal pour la culture des cucurbitacées est établi à 6,3 au Québec (CRAAQ, 2010) et entre 6,1 et 6,5 en Ontario. Une faible proportion des données validées était située dans cet intervalle de pH idéal, tandis que 30 % et 29 % des blocs avaient respectivement un pH inférieur à 6,0 et supérieur à 7,0. Les trois groupes de textures (G1, G2 et G3) ont été représentés de façon inégale dans le jeu de données, avec une prédominance des sols à textures moyennes (G2), tandis que ceux à textures fines (G1) et grossières (G3) ont constitué respectivement 18 et 9 % de la base de données validée. Cette situation représente probablement la réalité terrain puisque la culture des cucurbitacées n'est pas recommandée en sol lourds, plus susceptibles à la compaction (MAAARO, 2011). Par ailleurs, seulement 16 % des sols G1 avaient une teneur en K_{M3} inférieure à 100 ppm, contre 53 % dans les sols G2 et G3. Cependant, une proportion adéquate des essais était située dans l'intervalle de 100 à 200 ppm de K_{M3}, autant pour les sols G1 que les G2-G3. La plus faible présence de sols sous les 100 ppm de K_{M3} s'explique probablement du fait que les sols de textures fines (G1), riches en argiles, ont généralement une plus forte teneur en K que les sols de textures moyennes à grossières. Ainsi, le déséquilibre du jeu de donnée rend moins propice l'étude de la réponse à la fertilisation potassique dans les G1. Toutefois, tel que mentionné précédemment, la citrouille est surtout cultivée en sol G2-G3, ce qui conserve la pertinence de l'analyse de la réponse à la fertilisation potassique sur le groupe de données G2-G3, ou sur toutes les textures combinées.

Tableau 20. 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 (%)
			G1	G2-G3		
> 5,5 - 6,0	30	≤ 100	16	53	G1	18
> 6,0 - 6,5	16	100 – 200	84	44	G2	72
> 6,5 - 7,0	25	200 – 300	0	3	G3	9
> 7,0	29	> 300	0	0	-	-

[1] Le pH du sol optimal pour les cucurbitacées est de 6,3 au Québec (CRAAQ, 2010) et de 6,1 à 6,5 en Ontario (MAAARO, 2011).
[2] 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 citrouille 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 sol (G1, G2 et G3). Toutefois, en raison des problèmes de représentativité des teneurs en K_{M3} dans les trois groupes

de textures des sols, il n'a pas été possible d'identifier un ou des seuils propres à chaque groupe de textures. Dans les sols des groupes G2 et G3, un seuil de 102,2 ppm de K_{M3} s'est révélé significatif. De même, toutes les textures de sol confondues, le même seuil de 102,2 ppm de K_{M3} a été obtenu. D'une part, l'obtention du même seuil pourrait probablement s'expliquer par la prédominance des sols G2-G3 dans le jeu de données (31/38 données), par rapport aux G1. D'autre part, il faut également considérer la relation entre la teneur en argile des sols, définissant leur texture, et la teneur en K. Pour alléger la présentation des résultats, seuls les résultats des tests de l'indicateur retenu (K_{M3}) sont présentés au Tableau 21.

Tableau 21. Valeurs critiques des indicateurs de sols significatifs selon les tests de Cate-Nelson pour les essais K dans la citrouille

Indicateur de sol	Groupe de textures [1]	N_{obs} [2]	Valeur critique	RRel [3] (%)	Sensitivité	Spécificité	Précision	*P*
K Mehlich-3 (ppm)	G1, G2, G3	38	102,2	83	0,71	0,65	0,68	0,048
	G2, G3	31	102,2	83	0,69	0,73	0,71	0,032

[1] G1 : sols à texture fine ; G2 : sols à texture moyenne ; G3 : sols à texture grossière.
[2] N_{obs} : Nombre d'observations.
[3] RRel : Rendement relatif (100 × rendement du témoin/rendement maximum par bloc).

4.2.2 Effet de la dose de potassium sur le rendement total

Les résultats des ANOVA des essais K sur le rendement total sont présentés à la Figure 14 (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.

D'abord, une analyse de variance (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 14A). Ce modèle (A) a démontré que l'augmentation des doses de K_2O a entrainé des gains significatifs de rendements par rapport à un témoin sans apport potassique (P = 0,023, n = 191). Le groupe de doses de 165-189 kg/ha a été agronomiquement optimal, pour un gain variant entre 12 et 26 %.

Ensuite, l'ANOVA effectuée selon les groupes de textures (G1 vs. G2-G3, Figure 14B), indépendamment de la richesse du sol en K, a permis de constater que la réponse à l'engrais était principalement concentrée dans les sols G2 et G3 (P < 0,001), plutôt que dans les sols G1 où aucun effet n'a été détecté. Ce résultat était attendu puisque dans les G1, seulement 18 % des essais avaient une teneur en K_{M3} inférieure à 100 ppm, tandis que 53 % des sols G2 et G3 se situaient dans cet intervalle, ce qui concorde avec le fait que les sols de textures fines, riches en argile, ont généralement une plus forte teneur en K que les sols de textures moyennes à grossières.

Enfin, un troisième modèle (Figure 14C) faisant abstraction de la texture des sols a été considéré. En dessous de 44 ppm K_{M3}, l'absence de données a rendue impossible l'étude de l'effet de la fertilisation potassique sur le rendement de la culture pour cette catégorie de sol. Pour une teneur en K_{M3} du sol entre 44 et 102 ppm, seuil déterminé par le test de Cate-Nelson (voir la section 4.2.1), l'apport de 165-189 kg K_2O/ha a mené au rendement optimal (P = 0,023; n = 88), avec des gains moyens de 25,0 % par rapport au témoin sans engrais potassique. Une procédure de Cope-Rouse (1973) a permis de valider la réponse dans les sols entre 102 et 204 ppm. Dans ceux-ci, les traitements n'ont pas différé statistiquement entre eux (P = 0,171; n = 97). Cependant, les intervalles de

confiance suggèrent que l'application des doses de 110-140 kg K_2O/ha a permis de diminuer grandement les risques de pertes de rendement. En effet, ce groupe de doses est le plus petit dont la borne inférieure de l'intervalle de confiance est supérieure ou égale à 1, avec un gain de rendement moyen de 16,4 %. Finalement, très peu de données (5 observations) ont été collectées sur des sols ayant une teneur en K_{M3} supérieure à 204 ppm, ce qui est insuffisant pour étudier adéquatement la réponse de la culture à la fertilisation. Dans ces sols, la plus petite dose testée a été de 60 kg K_2O/ha.

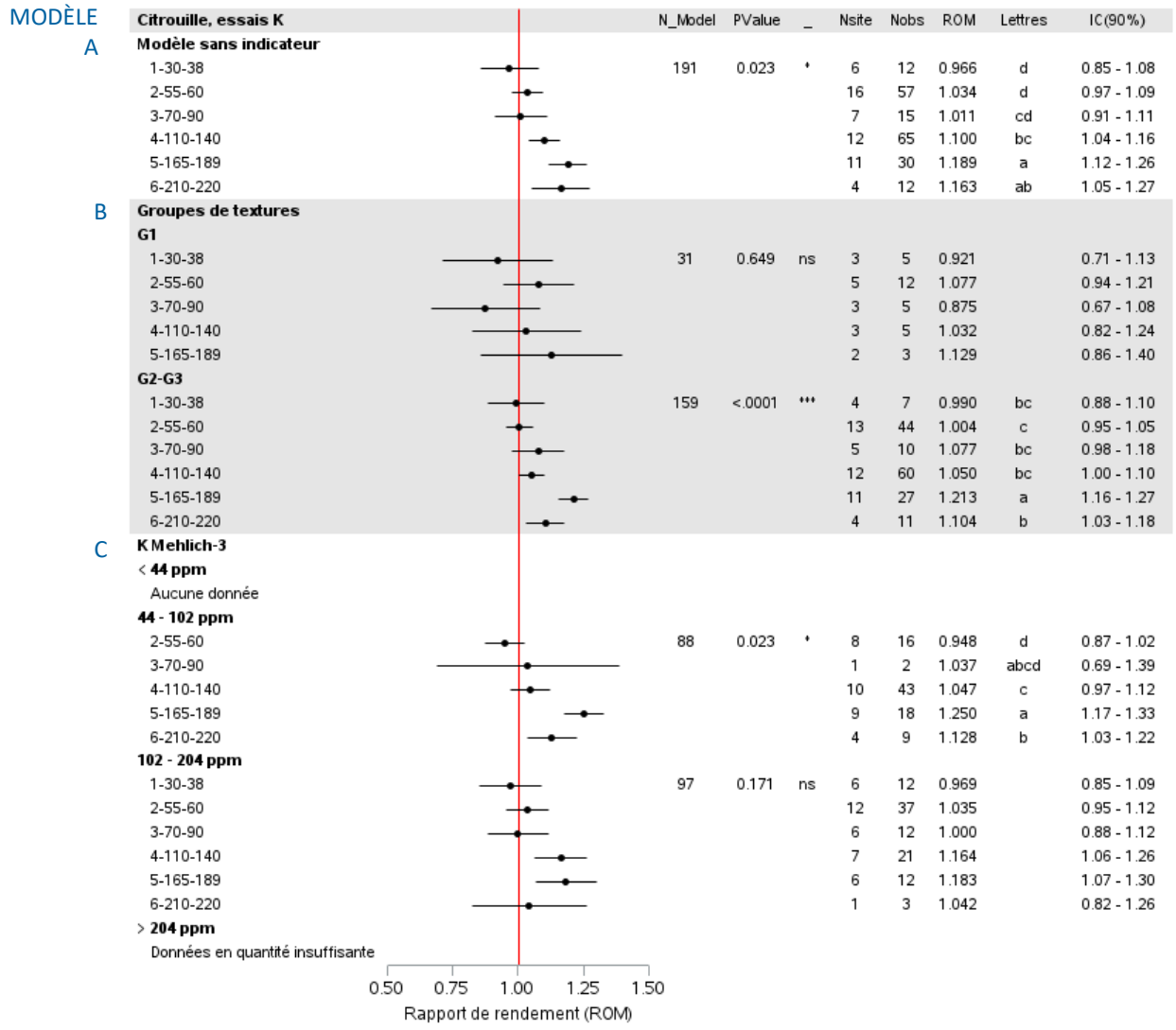

Figure 14. Résultats des analyses de variance sur la réponse aux doses croissantes de potassium. G1 : sols à texture fine ; G2 : sols à texture moyenne ; G3 : sols à texture grossière ; N_model : nombre d'observations du modèle ; Nsite : nombre de sites ; Nobs : nombre d'observations ; ROM : rapport de rendement (rendement parcelle fertilisée/rendement parcelle témoin) ; IC : Intervalle de confiance ; Les moyennes d'une même catégorie qui ne partagent pas la même lettre sont significativement différentes au seuil $P < 0,12$.

4.2.3 Effet de la dose de potassium les pertes à la récolte

Pour les raisons expliquées à la section 2.2.3, les analyses des pertes à la récolte ont été effectuées sur les sites du MIRVRF uniquement. De plus, les résultats de ces analyses sont présentés à titre indicatif seulement, les analyses en vue de déterminer la dose agronomique optimale ayant été effectuées sur le rendement total plutôt que le vendable. Les résultats, présentés à la Figure 15, ont démontré un effet significatif de la dose de K_2O sur les pertes à la récolte (P = 0,051; n = 75). Toutefois, cet effet semble être causé par les pertes élevées obtenues suivant l'apport de 30 à 38 kg K_2O/ha, alors que cette valeur a été estimée sur la base de trois observations uniquement. Ainsi, en ne considérant pas ce groupe de doses, l'effet de la fertilisation potassique sur les pertes devient non statistiquement significatif (P = 0,477; n = 72; données non présentées). Les plus faibles pertes ont été mesurées dans le traitement témoin, mais la différence avec les groupes de doses suivants (à l'exception du 30-38) est faible, même si elle tendait à augmenter avec l'augmentation des doses de K_2O appliquées. En effet, l'écart maximum mesuré entre le témoin et le groupe de dose de 210-220 kg/ha a été de 12 %. De plus, à l'instar de ce qui a été observé dans les essais N et P, la majorité des pertes de rendements à la récolte dans les essais du MIRVRF étaient causées par la combinaison des citrouilles trop petites (moins de 25 cm de diamètre) qui demeurent d'intérêt dans le cadre de la mise en marché de cette culture, souvent destinée à l'autocueillette ou aux marchés publics, en général à des fins décoratives. Dans l'État de l'Illinois, les travaux de Swiader et al. (1994), menés sur un sol sableux et peu pourvus en nutriments, ont montré une augmentation des citrouilles ayant un calibre trop petit (moins de 15 cm) avec l'application de doses croissantes K_2O. Selon ces derniers auteurs, cette augmentation du nombre de fruits immatures serait liée au fait que les fortes doses pourraient retarder la production de fruits primaires chez cette culture.

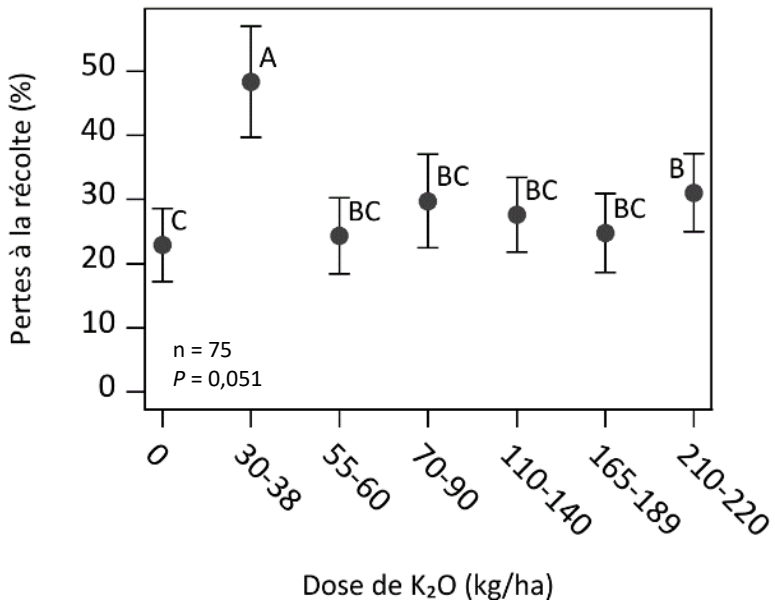

Figure 15. Effet des doses de K_2O sur les pertes à la récolte. Essais du MIRVRF seulement. n : nombre d'observations.

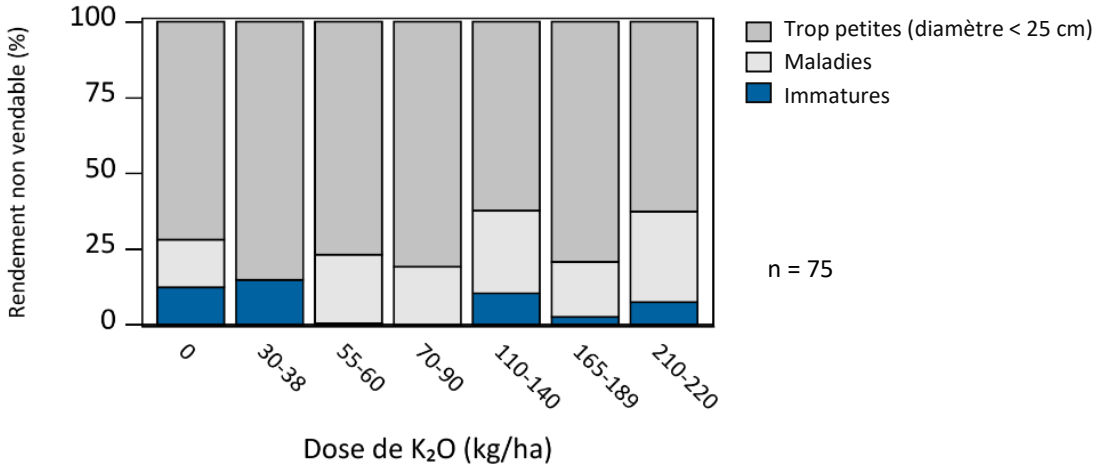

Figure 16. Répartition des pertes à la récolte en fonction des doses croissantes de K_2O. Essais du MIRVRF seulement.

4.3 Diagnostic nutritionnel et exportations en potassium

De même que pour les essais de N et de P, les moyennes des concentrations en K_2O dans les tissus de la citrouille ont été calculées pour chacune des variétés prises séparément. Les résultats sont présentés au Tableau 22. De toutes les variétés testées dans cette étude, Sorcerer a eu la plus grande concentration en K_2O, soit de 3,20 ± 0,33 kg/tonne humide. En revanche, Aladin a été la moins concentrée en K_2O, avec 1,98 ± 0,23 kg/tonne humide (Tableau 22). En fonction de la productivité de chaque variété, les rendements ont affecté les exportations en K_2O. La plus grande exportation en K_2O a donc été enregistrée pour la variété Sorcerer, tandis que la plus faible a été enregistrée pour Cronus, laquelle présentait le rendement moyen le plus faible. Chacun de ces deux extrêmes a été calculé sur la base d'un seul site, ce qui pourrait refléter un effet de site également.

Tableau 22. Concentrations et exportations en K_2O selon les variétés de citrouille

	Nombre de sites	Humidité	Exportations			Rendement total
			(kg K_2O/t humide)		(kg K_2O/ha)	(kg/ha)
		(%)	Moy	Éc.-T	Moy	Moy
Sorcerer	1	90	3,20	0,33	181	56 589
Magic Lantern	4	93	2,59	0,70	154	58 413
Zeus	2	94	2,48	0,32	136	54 658
Cronus	1	96	2,40	0,23	75	31 253
Orange Sunrise	2	95	2,26	0,22	146	64 317
Aladin	3	95	1,98	0,23	79	40 175

Les valeurs calculées d'humidité, de concentrations et d'exportations en K_2O de la citrouille selon le diagnostic nutritionnel, réalisé sans tenir compte de la variété cultivée, sont présentées au Tableau 23. La population de tête (groupe d'individus à haut rendement et à l'équilibre nutritionnel) a eu une concentration en K_2O de 2,59 ± 0,43 kg/tonne humide, à un taux d'humidité de 94 %. Lorsque rapportée à l'hectare et considérant un rendement

moyen de 67 569 kg/ha, les exportations médianes de la population de tête ont été de 176 kg K_2O et ont varié de 126 à 248 kg K_2O.

Dans l'actuel guide de référence en fertilisation du Québec (CRAAQ, 2010), aucune valeur de concentration n'est présentée pour la culture de la citrouille. Les résultats de la présente étude s'avèrent donc d'une grande importance, car ils permettront de calculer avec précision les exportations en K_2O de cette culture au Québec. La concentration en K_2O obtenue dans le cadre de cette étude est très similaire à celle présentée au Michigan, soit 3,09 kg de K_2O par tonne de biomasse fraîche récoltée (Warncke et al., 2004). L'USDA Plant Database (USDA, 2021) présente une valeur équivalente à 2,01 kg P_2O_5 par tonne humide, si la tonne humide est rapportée à 94 % d'humidité comme dans la présente étude. Étant donné les concentrations qui sont variables selon les variétés, la valeur obtenue dans la présente étude correspond à une valeur intermédiaire.

Les exportations en K_2O de la citrouille ont augmenté proportionnellement avec le rendement (Figure 17). Contrairement à ce qui a été observée pour l'azote (section 2.3) et le phosphore (section 3.3), les exportations en potassium ont varié linéairement avec le rendement et aucun plafond n'a été atteint. De même, pour le potassium, le coefficient de variation pour les concentrations inter-variétés a été faible bien plus faible soit de 16 % comparativement à l'azote (CV de 36 %) et au phosphore (CV de 55 %). Ainsi, bien que la composition chimique de la citrouille soit connue pour varier selon les variétés (Biesiada et al., 2011; Gajewski et al., 2008), le rendement semble avoir été un facteur plus décisif quant à la quantité de potassium exportée par la culture en comparaison aux deux autres éléments majeures.

Tableau 23. Concentrations et exportations de potassium en fonction du diagnostic nutritionnel

	Humidité	Exportations [1, 2]					
	(%)	(kg K_2O/t humide)		(kg K_2O/ha)			
		Moy	Éc-T	Moy	Med	Min	Max
Haut rendement et équilibre nutritionnel (« population de tête »)	94	2,59	0,43	176	181	126	248
Faible rendement et équilibre nutritionnel	94	2,39	0,56	127	128	93	193
Faible rendement et déséquilibre nutritionnel	94	2,39	0,53	114	104	30	223
Haut rendement et déséquilibre nutritionnel	93	2,63	0,69	168	169	95	230

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

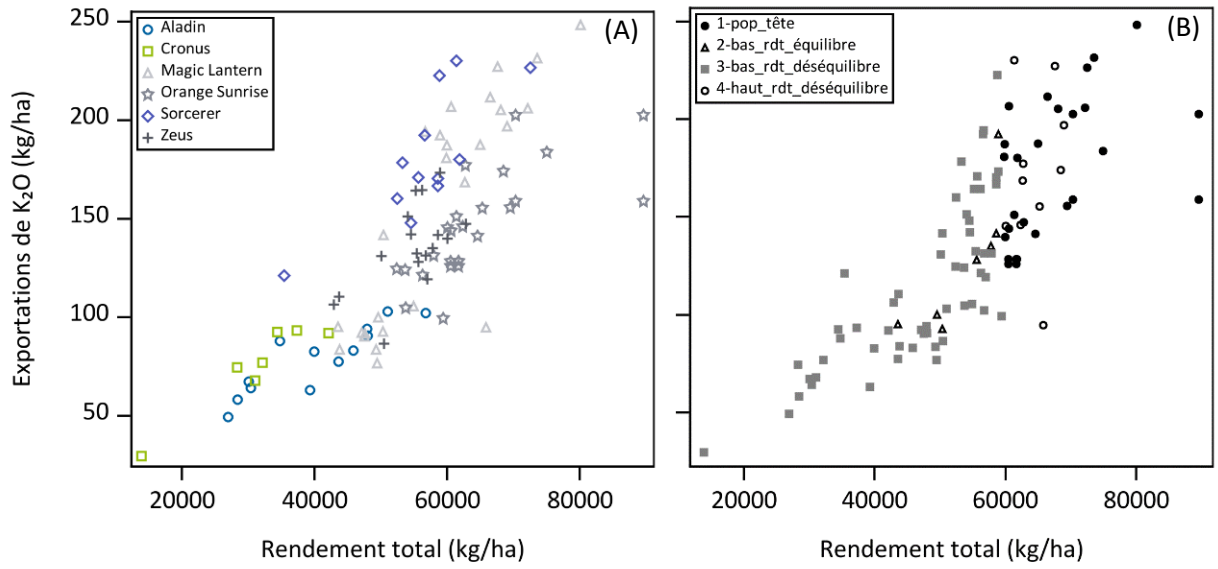

Figure 17. Exportations de K_2O en fonction des rendements de la citrouille exprimés selon les variétés (A) et selon le diagnostic nutritionnel (B).

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

La fertilisation potassique proposée pour la culture de la citrouille au Québec est présentée au Tableau 24. Seule la concentration en K_{M3} des sols a servi d'indicateur permettant de distinguer les différentes classes de fertilité des sols.

Puisqu'il n'y avait aucune donnée pour les sols de teneur en K_{M3} inférieure à 44 ppm, une classe de fertilité a été créée sous cette borne afin de diminuer les risques de pertes, considérant les fortes exportations de K dont les valeurs atteignent jusqu'à 248 kg/ha. La dose de 210 kg K_2O/ha a été retenue, ce qui correspond à la dose testée subséquente à la dose de 180 kg K_2O/ha, dose optimale retenue pour la classe de sol suivante. En effet, pour les sols contenant entre 44 et 102 ppm K_{M3}, la dose optimale a été de 180 kg K_2O/ha. Celle-ci a permis des gains de rendement importants (25 % de gains de rendement; $P = 0{,}023$) en plus de couvrir les exportations moyennes de 176 kg K_2O/ha. Au-delà du seuil de 102 ppm K_{M3} et jusqu'au double de celui-ci, soit 204 ppm, la VSRF proposée est de 120 kg K_2O/ha, établie sur la base des intervalles de confiance du modèle statistique. Au-delà de 204 ppm, tel que mentionné dans la section 4.2.2, très peu de données (5 observations) étaient disponibles, rendant impossible la détermination d'une dose agronomique optimale sur la base des analyses statistiques. De ce fait, la plus petite dose testée dans cette catégorie de sols, soit 60 kg K_2O/ha, est proposée comme VSRF. Cependant, en raison du fait que ces sols sont bien pourvus en K_{M3}, un intervalle a été créé afin de proposer un apport nul également comme VSRF. Ceci permettra au conseiller agricole, selon l'historique du champ et la variété cultivée, d'émettre un conseil agronomique.

Les VSRF sont proposées en trois fractionnements, telles que testées en 2021 dans le MIRVRF. En effet, les modes et périodes d'application ont été modifiés dans le MIRVRF afin de mieux représenter les pratiques culturales actuelles, suivant diverses consultations avec des agronomes et des experts terrains. Ainsi, bien que seule la dose de 120 kg/ha ait été testée en 3 fractionnements à l'été 2021, les autres VSRF ont été réparties selon ce modèle, pour des proportions d'environ 33, 24 et 43 % à chacun des fractionnements. La dose 60 kg/ha a été apportée, en 2021, tel que présentée au Tableau 24. Outre la représentativité améliorée de ces fractionnements, ceux-ci contribuent aussi à diminuer la somme des apports combinés de N et de K au semis, qui peuvent poser des problèmes de salinité si appliqués en trop grande quantité dans un sillon. Pour les cucurbitacées, le MAAARO (2011) recommande en effet de ne pas dépasser 100 kg [N+K_2O]/ha de pour les applications en bande. Or, dans le cas d'un sol de moins de 44 ppm de K_{M3} et de moins de 2,1 % de MO, l'apport total sera de 345 kg [N+K2O]/ha pour la saison et donc de 115 kg/ha [N+K2O] au semis. Par conséquent, dans le cas où l'engrais serait appliqué en bande (i.e. dans un sillon creusé et refermé), il est recommandé de reporter une partie de l'application en saison, en 1 ou 2 fractionnements, à moins de mettre une partie de l'engrais au semis à la volée, d'autant plus que dans les essais de fertilisation, les fortes doses de N et de K n'ont pas été testées en combinaison.

De manière générale, l'intervalle des recommandations en K_2O de cette étude (0 à 210 kg/ha) est supérieur aux recommandations actuelles au Québec (20 à 180 kg/ha; CRAAQ, 2010; Tableau 25). Toutefois, cette comparaison doit être faite avec prudence car ces nouvelles VSRF sont spécifiques à la culture de la citrouille, alors que la recommandation actuelle du CRAAQ (2010), à l'instar de l'Ontario et de l'Alberta, regroupe plusieurs cucurbitacées qui présentent de grandes différences de développement et de production de biomasse. Les recommandations de la présente étude sont similaires à celles de l'Ontario et du Mid-Atlantic. À l'instar des présentes VSRF, la totalité des grilles de recommandations consultées intègrent la teneur en K du sol comme principal indicateur de fertilité. Toutefois, une majorité ne proposent pas d'emblée de fractionner les doses, bien que celles-ci soient élevées, probablement en raison du fait que les engrais sont recommandés à la volée. Dans les présents essais de fertilisation, les engrais ont été testés en bande (i.e. dans un sillon creusé et refermé) ou en ruban (i.e. en surface, en une bande étroite et parallèle à la ligne de plants, incorporé au sarcleur).

Tableau 24. Fertilisation potassique de la citrouille – Valeurs scientifiques de référence en fertilisation

Groupe de textures [1]	Classe de fertilité K_{M3} (ppm) [2,3]	Période d'application [4]	Fractionnement [5] (kg K_2O/ha)	VSRF [6] (kg K_2O/ha)
G1, G2, G3	(≤ 44)	Semis	70	(210) [7,8]
		Stade 2-3 feuilles	50	
		Stade boutons floraux	90	
	44 – 102	Semis	60	180 [8,9]
		Stade 2-3 feuilles	40	
		Stade boutons floraux	80	
	103 – 204	Semis	40	120 [8,9]
		Stade 2-3 feuilles	30	
		Stade boutons floraux	50	
	> 204	Au semis	0 - 30	0 - 60 [10]
		Stade 2-3 feuilles	-	
		Stade boutons floraux	0 - 30	

[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 (1984).
[3] Le seuil de 44 ppm de K_{M3} représente la borne inférieure du jeu de données.
[4] Dans le cadre des essais, la première application des engrais a été effectuée après la levée (1 à 2 semaines après le semis) pour des raisons techniques.
[5] Les fractionnements sont présentés en tant qu'environ 33, 24 et 43 % de la dose totale, tel que testé en 2021. Dans le cas où la VSRF n'est pas une dose testée, les fractionnements sont grisés et sont présentés dans les mêmes proportions que pour les doses testées similaires.
[6] VSRF : Valeur scientifique de référence en fertilisation.
[7] En absence de données dans cette catégorie de sols, une dose d'entretien est proposée (niveau subséquent de doses testées). Celle-ci permet de couvrir les exportations de la culture dans la majorité des cas.
[8] Dans l'éventualité où de fortes doses de [N+K_2O] seraient apportées en bande et non à la volée, dans le but d'amoindrir les risques de salinité au semis, une part des engrais peut être appliquée à la volée ou reportée en partie à la deuxième application.
[9] Dose agronomique optimale dans cette catégorie de sols.
[10] En absence de données en quantité suffisante dans cette catégorie de sols bien pourvus en K, un intervalle allant de la dose nulle à la plus petite dose testée est proposé.

Absence de données en dessous de 44 ppm de K_{M3}

Dans le cadre des essais de fertilisation potassique, aucune donnée n'était disponible pour les sols ayant moins de 44 ppm K_{M3}. Ainsi, en absence de données pour cette catégorie de sol, la dose de 210 kg/ha est proposée. Celle-ci correspond au niveau subséquent de doses testées à la VSRF de la classe de fertilité 44 – 102 ppm K_{M3}. Le choix de cette dose est basé sur la grande variabilité observée au niveau des exportations en K_2O selon les variétés cultivées, dont les valeurs maximales peuvent atteindre 210 kg K_2O/ha.

Application de fortes doses de N + K_2O

Dans le cadre des essais, la combinaison des plus hautes doses de N+K_2O n'a pas été testée. Le MAAARO (2011) recommande de ne pas dépasser 100 kg [N+K_2O]/ha pour les cucurbitacées. Or, dans le cas d'un sol de moins de 44 ppm de K_{M3} et de moins de 2,1 % de MO, l'apport total sera de 345 kg [N+K_2O]/ha pour la saison et de 115 kg [N+K_2O]/ha au semis. Par conséquent, dans le cas où l'engrais serait appliqué en bande (i.e. dans un sillon creusé et refermé), il est recommandé de reporter une partie de l'application en saison, en 1 ou 2 fractionnements, à moins de mettre une partie de l'engrais au semis à la volée.

Tableau 25. Comparaison des recommandations en K_2O pour la production de citrouilles au Canada et à l'étranger

Provinces/ États	Cultures ciblées par la grille	Mode et période d'application	Fractionnement	Indicateurs			Dose K_2O (kg/ha)	Source
				Fertilité du sol	Objectif de rendement	Autres		
Québec (CAN)	Concombre, cornichon, citrouille, melon, courge		-	0-100 kg K_{M3}/ha 101-200 201-300 301-400 401-500 501-600 601 et +	-	-	180 150 120 90 65 40 20	CRAAQ (2010)
Ontario (CAN)	Concombre, cantaloups, melons, citrouille, courge		-	K du sol (Acétate d'ammonium)	-	-	0 – 230	MAARO (2011)
Alberta (CAN)	Cucurbitacées	À la volée avant le semis et incorporé En bande	**Non**	K du sol	-	-	127 – 165 64 – 83	Alberta Agriculture and Rural Development (2014)
Michigan (É-U)	Citrouille	À la volée incorporé avant le semis ou en bande au semis	Non	K du sol (Acétate d'ammonium)	15-20 lbs/acre	CEC du sol	0 – 336	Warncke et al. (2004)
Mid-Atlantic (É-U)	Citrouille et courge d'hiver	À la volée et incorporé	Non	K du sol (Mehlich-3)	-	-	0 – 224	Virginia Cooperative Extension (2020)
Nouvelle Angleterre (É-U)	Citrouille et courge d'hiver	À la volée ou en bande, incorporé	Non	K du sol		Transplants Semis	0 – 179 0 – 45	University of Massachusetts Amherst (2022)
Illinois (É-U)	Citrouille et cultures similaires			K du sol	90 – 100 % du maximum		0 – 403	Swiader (2006)
New York (É-U)	Citrouille	À la volée ou en bande, incorporé	Non	K du sol		Transplants Semis	0 – 90 45	Reiners (2012)

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 la citrouille en sol minéral. D'une part, non seulement ce sont les premières recommandations de doses optimales en éléments majeurs spécifiques à la citrouille, mais ces recommandations ont également été entièrement calculées sur des données validées d'essais au champ, réalisées au Québec et encadrées par la démarche scientifique. Ces recommandations ont également pu être précisées par classes de fertilité de sol, selon le groupe de textures et divers indicateurs de la fertilité des sols. Elles sont également appuyées par l'expertise de conseillers terrain du Québec et les principes scientifiques reconnus dans le domaine de la nutrition des cultures. D'autre part, les résultats de la présente étude ont permis de générer de nouvelles valeurs de concentrations et d'exportations en N, en P_2O_5 et en K_2O pour la citrouille, lesquelles se trouvent désormais à la disposition des producteurs et conseillers agricoles.

De manière générale, les doses proposées sont similaires ou inférieures aux recommandations actuelles du CRAAQ (2010) pour l'azote et le phosphore, mais elles sont comparables, voire supérieures, dans le cas du potassium. Bien que les résultats des analyses statistiques des pertes reposent sur moins d'observations (voir section 1.8.4) et doivent donc être considérés avec une certaine prudence, ceux-ci indiquent que les VSRF adoptées ne nécessitent pas d'ajustement pour cet aspect du rendement. L'ensemble des modes et des périodes d'apport, ainsi que les doses optimales proposées ne compromettent pas la qualité ni les rendements en plus de s'inscrire dans les bonnes pratiques agricoles.

Les apports azotés ont été établis sur la base de la teneur en matière organique (MO) du sol, toutes textures de sol confondues. Dans le cas où les analyses de la concentration en $N\text{-}NO_3$ du sol mesurés au semis sont disponibles, un ajustement de la dose a également été ajoutée au tableau des recommandations. Pour des sols ayant moins de 5 % de MO, les recommandations de la présente étude sont assez similaires à la recommandation du CRAAQ (2010) pour les cucurbitacées. En revanche, dans les sols mieux pourvus (> 5 % MO), les VSRF recommandées ont été révisées à la baisse. De même, la fertilisation phosphatée est précisée selon 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. Les VSRF proposées, appuyées par les résultats des analyses, constituent des diminutions par rapport aux recommandations actuelles du CRAAQ (2010). Finalement, les apports potassiques sont modulés par la teneur en potassium (K) du sol comme indicateur de fertilité. À ce propos, un biais important a été corrigé 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 et d'informations reliées à la nutrition spécifique pour la citrouille, qui sont propres aux sols et au climat québécois, lesquelles permettront de mieux concilier la productivité et la conservation des ressources.

6. FERTILISATION DE LA CITROUILLE

Valeurs scientifiques de référence en fertilisation

AZOTE				
Groupe de textures	Classe de fertilité MO_{PAF} (%) [1]	Période d'application [2, &]	Fractionnement [3] (kg N/ha)	VSRF * (kg N/ha)
G1, G2, G3	(≤ 2,1)	Semis	45	(135) [4,5]
		En saison (en 1 ou 2 apports)	90	
	(2,2) – 5,0	Semis	45	105
		En saison (en 1 ou 2 apports)	70	
	> 5,0	Semis	35	35

PHOSPHORE			
Groupe de textures	Classe de fertilité ISP_1 (%) [6]	Période d'application [2]	VSRF (kg P_2O_5/ha)
G1	(≤ 2,0)	Semis	(60) [7]
	2,1 – 7,6		60
	7,7 – 15,2		30
	> 15,2		0 - 30 [8]
G2, G3	≤ 10,0	Semis	90
	10,1 – 13,1		60
	13,2 – 26,2		30
	> 26,2		0 - 30

POTASSIUM				
Groupe de textures	Classe de fertilité K_{M3} (ppm)	Période d'application [2]	Fractionnement [3] (kg K_2O/ha)	VSRF (kg K_2O/ha)
G1, G2, G3	(≤ 44) [9]	Semis	70	(210) [5,10]
		Stade 2-3 feuilles	50	
		Stade boutons floraux	90	
	44 – 102	Semis	60	180 [5]
		Stade 2-3 feuilles	40	
		Stade boutons floraux	80	
	103 – 204	Semis	40	120 [5]
		Stade 2-3 feuilles	30	
		Stade boutons floraux	50	
	> 204	Semis	30	0-60 [11]
		Stade 2-3 feuilles	-	
		Stade boutons floraux	30	

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 par la méthode Mehlich-3 (1984).

* Dans les sols des groupes de textures G2 et G3 ayant moins de 19,5 ppm de $N\text{-}NO_3$, un apport 135 kg N/ha est suggéré indépendamment de la teneur en MO. Le $N\text{-}NO_3$ a été dosé au KCl 2M en laboratoire sur la profondeur 0-30 cm.

[&] En fonction du mode et de la quantité de $[N+K_2O]$ recommandée, la dose totale d'engrais peut être fractionnée en deux ou trois applications (semis, stades 2-3 feuilles et/ou stade boutons floraux) afin d'éviter les problèmes de salinité que peut engendrer les engrais azotés et potassiques.

[1] Le seuil de 2,2 % de MO_{PAF} représente la borne inférieure du jeu de données.

[2] Dans le cadre des essais, la première application des engrais a été effectuée après la levée (1 à 2 semaines après le semis) pour des raisons techniques.

[3] Les fractionnements sont proposés tels que testés lors des plus récents essais réalisés en 2021. Dans le cas où la VSRF n'est pas une dose testée, les fractionnements sont grisés et sont présentés dans les mêmes proportions que pour les doses testées similaires.

[4] En absence de données en quantité suffisante pour cette catégorie de sols, le niveau de dose subséquent à la dose de la catégorie suivante est proposé.

[5] Dans l'éventualité où de fortes doses de $N+K_2O$ seraient apportées en bande et non à la volée au semis, dans le but d'amoindrir les risques de salinité, une part des engrais peut être appliquée à la volée ou reportée à la deuxième application.
[6] Les catégories ont été déterminées en tenant compte des seuils environnementaux du REA (*Règlement sur les Exploitations Agricoles*; MDDEP, 2010).
[7] En absence de données dans cette catégorie de sols, la dose agronomique optimale de la classe suivante est reportée dans cette classe. En considérant les faibles exportations en P_2O_5 de la culture, cet apport sera suffisant afin de ne pas entraîner un bilan de phosphore qui soit négatif.
[8] Aucune donnée dans cette catégorie de sols.
[9] Le seuil de 44 ppm de K_{M3} représente la borne inférieure du jeu de données.
[10] En absence de données dans cette catégorie de sols, une dose d'entretien est proposée (niveau de dose testé subséquent). Celle-ci permet de couvrir les exportations de la culture dans la majorité des cas.
[11] En absence de données en quantité suffisante pour cette catégorie de sols bien pourvus en K, un intervalle allant de la dose nulle à la plus petite dose testée est proposé.

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 culturales.

7. RÉFÉRENCES

Alberta Agriculture and Rural Developpement. (2014). *Vegetable Production on the Prairies Commercial Vegetable Production*. Alberta Agriculture and Rural Developpement.

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.

Bélanger, G., Ziadi, N., Walsh, J. R., Richards, J. E. et Milburn, P. H. (2003). Residual Soil Nitrate after Potato Harvest. *Journal of Environmental Quality*, *32*(2), 607-612. https://doi.org/10.2134/jeq2003.6070

Biesiada, A., Kucharska, A., Sokół-Łętowska, A. et Nawirska, A. (2011). Chemical Composition of Pumpkin Fruit Depending on Cultivar and Storage. *Ecological Chemistry and Engineering. A*, *Vol. 18*(nr 1), 9-18.

Black, C. A. (1993). Soil Fertility Control and Evaluation. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.

Brown, D. (1945). The growth and composition of the tops of peach trees in sand culture in relation to nutrient-element balance. *West Va. Agr. Exp. Sta. Bui*, *322*, 1-72.

Busman, L., Lamb, J., Randall, G., Rehm, G. et Schmitt, M. (2002). Phosphorus in the agricultural environment: the nature of phosphorus in soils. *University of Minnesota, Minneapolis*.

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.

Chen, Y., Zhou, X., Lin, Y. et Ma, L. (2019). Pumpkin yield affected by soil nutrients and the interactions of nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizers. *HortScience*, *54*(10), 1831-1835.

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 Quebec, Canada.

Culman, S., Fulford, A., Camberato, J. et Steinke, K. (2020). *Tri-State Fertilizer Recommendations for Corn, Soybean, Wheat, and Alfalfa*.

De Bauw, P., Van Asten, P., Jassogne, L. et Merckx, R. (2016). Soil fertility gradients and production constraints for coffee and banana on volcanic mountain slopes in the East African Rift: A case study of Mt. Elgon. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *231*, 166-175.

Defra, A. (2010). Fertiliser manual (RB209). *Department of the Environment, Food and Rural Affairs, TSO (The Stationary Office), London*.

Gajewski, M., Radzanowska, J., Danilcenko, H., Jariene, E. et Cerniauskiene, J. (2008). Quality of Pumpkin Cultivars in Relation to Sensory Characteristics. *Not. Bot. Hort. Agrobot. Cluj*, *36*(1), 73-79.

Hubert, M. et Debruyne, M. (2010). Minimum covariance determinant. *Wiley Interdisciplinary Reviews Computational Statistics*, *2*(1), 36-43.

IRDA. (2020a). Package « catenelson ». Institut de recherche et développement en agroenvironnement. https://github.com/irda-rd/catenelson.git

IRDA. (2020b). Package « cnd ». Institut de recherche et développement en agroenvironnement. https://github.com/irda-rd/cnd.git

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.

Landry, C., Forest-Drolet, J., Joseph, C.-A. et Houde, S. (2022). Fascicule 09 : Fertilisation du concombre de transformation. Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation du Québec (2020-2023). Présenté au ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation. https://irda.qc.ca/fr/publications/?r=1745&t=1411#documents

MAAARO. (2011). *Recommandations pour les cultures légumières 2010-2011, Publication 363F*. Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario.

MAAARO. (2017). *Guide agronomique des grandes cultures - Publication 811F* (édité par C. Brown, J. Follings, M. Moran et B. Rosser). http://www.omafra.gov.on.ca/french/crops/pub811/pub811.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.

Metz, F. et Nass, D. (2015). Fertilisation des grandes cultures, Guide technique. Chambre d'agriculture région Alsace. https://grandest.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/Grand-Est/Alsace_fertilisation_grandes_cultures_guide_Alsace.pdf

Munroe, J., Brown, C., Kessel, C., Verhallen, A., Lauzon, J., O'Halloran, I., Bruulsema, T. et Cowan, D. (2017). Manuel sur la fertilité du sol. *Publication 611F*, 239.

N'Dayegamiye, A., Giroux, M. et Gasser, M. O. (2007). La contribution en azote du sol reliée à la minéralisation de la MO : facteur climatique et régies agricoles influençant les taux de minéralisation d'azote.

Naderi, M., Bannayan, M., Goldani, M. et Alizadeh, A. (2017). Effect of Nitrogen Application on Growth and Yield of Pumpkin. *Journal of Plant Nutrition*, *40*(6), 890-907.

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. (2011). *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 jashs*, *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.

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

Reid, J. B., Searle, B. P., Hunt, A., Johnstone, P. R., Bay, H., Morton, J. et Nelson, W. (2019). *Nutrient management for vegetable crops in NZ – recommendations and supporting information*.

Reiners, S. et Riggs, D. I. M. (1997). Plant spacing and variety affect pumpkin yield and fruit size, but supplemental nitrogen does not. *HortScience*.

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

Statistique Canada. (2021). *Tableau 32-10-0365-01 Superficie, production et valeur à la ferme des légumes commercialisés*. https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/tv.action?pid=3210036501

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

Swiader, J. M. (2006). Soil Fertility Guidelines for Pumpkins. Illinois Agronomy Technical Note. University of Illinois.

Swiader, J. M., Sullivan, J. G., Grunau, J. A. et Freiji, F. (1988). Nitrate monitoring for pumpkin production on dryland and irrigated soils. *Journal of the American Society for Horticultural Science*.

USDA. (2021). *Crop Nutrient Tool*. Natural Resources Conservation Service. http://plants.usda.gov

Walters, S. A. (2020). Impact of nitrogen fertilizer on yield and associated revenues in no-tillage pumpkin. *HortScience*, *55*(4), 522-527.

Warncke, D. (2007). Nutrient management for cucurbits: melons, pumpkin, cucumber, and squash. *2007 Indiana CCA Conference Proceedings*, 1-4.

Warncke, D., Dahl, J. et Zandstra, B. (2004). Nutrient Recommendations for Vegetable Crops in Michigan (E2904). *Michigan State University Extension Bulletin*, (E2934), 1-32.

Wetselaar, R., Smith, G. D. et Angus, J. F. (1998). Field measurement of soil nitrate concentrations. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, *29*(5-6), 729-739.

Annexe I

Sommaire des données exclues de l'analyse et justifications

# site	Donnée exclue	Raison justifiant l'exclusion
1	204 (K), 208 (N)	Rendements parmi les plus faibles des essais entraînant des coefficients de variation élevés à l'intérieur d'un même traitement.
	Bloc 1 (N)	Bloc affecté en partie par une zone de faibles rendements non contrôlée par le dispositif expérimental.
4	Bloc 3 (N)	Bloc affecté en partie par une zone de faibles rendements non contrôlée par le dispositif expérimental.
5	209 (P)	Erreur dans l'application des engrais de la parcelle.
7	Bloc 2 (P)	Bloc affecté en partie par une zone de faibles rendements non contrôlée par le dispositif expérimental.
	Bloc 1, 2 (K)	Blocs affectés en partie par des zones de faibles rendements non contrôlées par le dispositif expérimental.
	Essai N	Essai affecté par une zone de faibles rendements non contrôlée par le dispositif expérimental.
8	Site	Présence d'un remblai de surface sur le site entraînant de la variabilité dans les propriétés chimiques et granulométriques.
10	Bloc 1 (N, P, K)	Bloc affecté par un gradient de sol non contrôlé par le dispositif expérimental.
11	223 (P)	Unité expérimentale située au milieu d'une baissière.
	Biomasse de récolte	Les teneurs en éléments majeurs et mineurs sont anormalement élevées et représentent plus du double des valeurs usuelles attendues. Il est suspecté que le conditionnement des échantillons avant analyse a été inadéquat.
12	Site	Deux variétés différentes ont été cultivées aléatoirement à ce site.
13	110, 222, 330 (K) 102, 218, 334 (P)	Unités expérimentales endommagées par le passage de la machinerie.
	Essai N	Essai affecté par un gradient de faibles rendements non contrôlé par le dispositif expérimental. Les rendements de l'essai sont particulièrement faibles en comparaison de ceux du reste du site, particulièrement en comparaison des répétitions additionnelles.
15	Biomasse de récolte	Les citrouilles de tout le site ont été affectées par des maladies.
16	106, 110, 330, 102, 218	Unités expérimentales contenant des plants affectées par un flétrissement causé par la machinerie.
17	Site	Site affecté par un gradient dans le sens contraire des blocs et non contrôlé par le dispositif expérimental. Pression de mauvaises herbes élevée. Commentaires de la Coordination mentionnant que les essais se sont mal déroulés.
18	Site	Site affecté par les mauvaises conditions climatiques au semis (pluie ayant retardé les travaux d'implantation) et en saison (sécheresse et chaleur nuisant à la pollinisation et à la formation des fruits, forts vents causant des dommages au feuillage). Les maladies ont finalement entraîné l'abandon de la récolte par le producteur.
19	Site	La récolte a été effectuée sur une unité de surface plutôt qu'en retraçant les courants des plants ayant reçu le traitement. Il est hautement probable que les traitements aient été mélangés à la récolte, considérant que les vignes s'étendent sur plusieurs mètres.
20	Bloc 1 (N, P, K)	Bloc affecté par un gradient de faibles rendements non contrôlées par le dispositif expérimental.
	328 (P)	Rendement élevé (> 100 000 kg/ha) considéré aberrant et entraînant un coefficient de variation élevé à l'intérieur du traitement.
21	101, 222	Rendement très faible (222) ou nuls (101). Les photos démontrent des plants très chétifs
22	215, 219, 223, 331, 335, 327	Unités expérimentales spatialement rapprochées et affectées par une zone de faibles rendements non contrôlée par le dispositif expérimental.

# site	Donnée exclue	Raison justifiant l'exclusion
23	106, 332, 329	Unités expérimentales ayant des rendements parmi les plus faibles des essais entraînant des coefficients de variation élevés à l'intérieur d'un même traitements. Rendements éloignés confirmés la comparaison avec les répétitions additionnelles des autres tiroirs de l'essai.
24	Site	De la chaux a été appliquée sur le site à l'automne précédent, ce qui peut affecter la réponse dans l'essai P. La levée a été inégale sur tout le site, probablement en raison du fait que l'engrais a été mis proche de la semence. De plus, l'ouverture du sillon à un stade critique de la germination a pu perturber le développement. Une sécheresse a suivi l'implantation du site, ce qui a contribué au mauvais développement des plants en saison.