

Fertilisation du rutabaga en sol minéral. Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation du Québec (2020-2023). Fascicule 08 : Rutabaga.

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 du rutabaga en sol minéral. Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation du Québec (2020-2023). Fascicule 08. Présenté au ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation. 91 pages. <https://irda.gc.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.
Anne-Mary Le Guennec
Mélissa Paradis, Biol. M. Sc.

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 qui bénéficieront de cette démarche à grande échelle. Dans un troisième volet du MIRVRF, des essais supplémentaires au champ ont été réalisés dans cinq cultures (citrouille et rutabaga en sol minéral; oignon sec, oignon vert et radis en sol organique) afin d'améliorer la représentativité de certaines catégories de sol ciblées lors du premier mandat octroyé à l'IRDA (*Mandat Plan de révision des grilles de référence en fertilisation du Québec*, 2017-2020). Le dernier volet du MIRVRF consistait à déterminer les indicateurs et les intervalles des classes de fertilité de sol, ainsi que les valeurs scientifiques de référence en fertilisation (VSRF) qui leur sont associées, pour les cultures sélectionnées.

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

Les intervenants qui souhaitent consulter les rapports scientifiques (fascicules) sur lesquels s'appuient les grilles MAPAQ sont invités à consulter la fiche de la chercheuse Christine Landry sur le site web de l'IRDA, où se retrouvent l'ensemble des publications, à cette adresse :

<https://irda.qc.ca/fr/publications/?r=1745&t=1411#documents>

NOTE AU LECTEUR

Ce document présente les résultats scientifiques d'essais de fertilisation. La grille officielle publiée par le MAPAQ fait l'objet d'une publication séparée. Celle-ci 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

TABLE DES MATIÈRES	VI
GLOSSAIRE.....	11
1. PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES ESSAIS ET DES ANALYSES.....	12
1.1 PROVENANCE DES DONNÉES.....	12
1.2 LOCALISATION DES SITES.....	13
1.3 PROPRIÉTÉS PHYSICO-CHIMIQUES DES SOLS.....	13
1.4 DISPOSITIFS EXPÉRIMENTAUX ET TRAITEMENTS	15
1.4.1 DISPOSITIFS.....	15
1.4.2 TRAITEMENTS	15
1.5 RENDEMENTS.....	19
1.6 ASPECTS ADDITIONNELS POUR L'INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS.....	21
1.6.1 VARIÉTÉ CULTURALE.....	21
1.6.2 PRÉCÉDENT CULTURAL.....	21
1.6.3 IRRIGATION	21
1.7 ANALYSE EXPLORATOIRE.....	21
1.8 CALCULS ET ANALYSES STATISTIQUES.....	22
1.8.1 DÉTERMINATION DES CLASSES DE FERTILITÉ DES SOLS.....	23
1.8.2 DÉTERMINATION DES DOSES OPTIMALES DE FERTILISANTS.....	24
1.8.3 DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL, QUANTITÉS D'ÉLÉMENTS NUTRITIFS EXPORTÉS.....	25
1.8.4 ANALYSES SUR LA QUALITÉ, LES CALIBRES, LES PERTES À LA RÉCOLTE ET LES PERTES À L'ENTREPOSAGE	26
2. FERTILISATION AZOTÉE	29
2.1 PORTRAIT ET REPRÉSENTATIVITÉ DES DONNÉES	29
2.2 DÉTERMINATION DES DOSES AGRONOMIQUES OPTIMALES.....	29
2.2.1 RECHERCHE D'INDICATEURS DE FERTILITÉ DU SOL	29
2.2.2 EFFET DE LA DOSE D'AZOTE SUR LE RENDEMENT	31
2.2.3 EFFET DE LA DOSE D'AZOTE SUR LES CALIBRES, L'ÉTAT DU FEUILLAGE, LA QUALITÉ, LES PERTES À LA RÉCOLTE ET LES PERTES À L'ENTREPOSAGE	34
2.3 DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL ET EXPORTATIONS EN AZOTE	46
2.4 NITRATE RÉSIDUEL À LA RÉCOLTE.....	47
2.5 FERTILISATION AZOTÉE PROPOSÉE ET COMPARAISON AVEC LES RECOMMANDATIONS AU CANADA ET À L'ÉTRANGER	49
3. FERTILISATION PHOSPHATÉE.....	52
3.1 PORTRAIT ET REPRÉSENTATIVITÉ DES DONNÉES	52
3.2 DÉTERMINATION DES DOSES AGRONOMIQUES OPTIMALES.....	52
3.2.1 RECHERCHE D'INDICATEURS DE FERTILITÉ DU SOL	52
3.2.2 EFFET DE LA DOSE DE PHOSPHORE SUR LE RENDEMENT	53
3.2.3 EFFET DE LA DOSE DE PHOSPHORE SUR LES CALIBRES, L'ÉTAT DU FEUILLAGE, LA QUALITÉ, LES PERTES À LA RÉCOLTE ET LES PERTES À L'ENTREPOSAGE	56
3.3 DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL ET EXPORTATIONS EN PHOSPHORE	62
3.4 FERTILISATION PHOSPHATÉE PROPOSÉE ET COMPARAISON AVEC LES RECOMMANDATIONS AU CANADA ET À L'ÉTRANGER	63
4. FERTILISATION POTASSIQUE	68
4.1 PORTRAIT ET REPRÉSENTATIVITÉ DES DONNÉES	68
4.2 DÉTERMINATION DES DOSES AGRONOMIQUES OPTIMALES.....	69
4.2.1 IMPACT DE LA FERTILISATION BORIQUE SUR LA RÉPONSE DE LA CULTURE À LA FERTILISATION POTASSIQUE	69
4.2.2 RECHERCHE D'INDICATEURS DE FERTILITÉ DU SOL	69

4.2.3	EFFET DE LA DOSE DE POTASSIUM SUR LE RENDEMENT.....	70
4.2.4	EFFET DE LA DOSE DE POTASSIUM SUR LES CALIBRES, L'ÉTAT DU FEUILLAGE, LA QUALITÉ, LES PERTES À LA RÉCOLTE ET LES PERTES À L'ENTREPOSAGE	72
4.3	DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL ET EXPORTATIONS.....	80
4.4	FERTILISATION POTASSIQUE PROPOSÉE ET COMPARAISON AVEC LES RECOMMANDATIONS AU CANADA ET À L'ÉTRANGER.....	81
5.	CONCLUSION	85
6.	FERTILISATION DU RUTABAGA - VALEURS SCIENTIFIQUES DE RÉFÉRENCE EN FERTILISATION	86
	REMERCIEMENTS.....	87
7.	RÉFÉRENCES	88
	ANNEXE I.....	91

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1. DESCRIPTION SOMMAIRE DES SITES DES ESSAIS DE FERTILISATION DU RUTABAGA	12
TABLEAU 2. FERTILISATION EN BORE DES SITES D'ESSAIS DE RUTABAGA EN COMPARAISON AUX RECOMMANDATIONS DU CRAAQ (2010).....	16
TABLEAU 3. DESCRIPTION DES TRAITEMENTS DES ESSAIS DE FERTILISATION AZOTÉE	17
TABLEAU 4. DESCRIPTION DES TRAITEMENTS DES ESSAIS DE FERTILISATION PHOSPHATÉE	18
TABLEAU 5. DESCRIPTION DES TRAITEMENTS DES ESSAIS DE FERTILISATION POTASSIQUE	19
TABLEAU 6. STATISTIQUES DESCRIPTIVES SUR LES DONNÉES NON VALIDÉES (AVANT L'ANALYSE EXPLORATOIRE) DES RENDEMENTS DU RUTABAGA DES ESSAIS N, P ET K.....	21
TABLEAU 7. BILAN DE LA VALIDATION DES DONNÉES À L'ISSUE DE L'ANALYSE EXPLORATOIRE	22
TABLEAU 8. DESCRIPTION DES CALIBRES DU RUTABAGA POUR LE CLASSEMENT À LA RÉCOLTE	27
TABLEAU 9. ÉCHELLES DE CLASSIFICATION DE LA ROBUSTESSE DE L'ATTACHE DES FEUILLES À LA TIGE ET DU DÉVELOPPEMENT FOLIAIRE DU RUTABAGA POUR LE CLASSEMENT À LA RÉCOLTE	28
TABLEAU 10. RÉPARTITION DES BLOCS DES ESSAIS N DU RUTABAGA POUR DIFFÉRENTES CLASSES DE PROPRIÉTÉS DE SOL APRÈS LA VALIDATION DES DONNÉES	29
TABLEAU 11. VALEURS CRITIQUES DES INDICATEURS DE SOL SIGNIFICATIFS SELON LES TESTS DE CATE-NELSON POUR LES ESSAIS N DE RUTABAGA...30	
TABLEAU 12. CONCENTRATIONS ET EXPORTATIONS EN N DU RUTABAGA, SELON LE DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL	47
TABLEAU 13. FERTILISATION AZOTÉE DU RUTABAGA – VALEURS SCIENTIFIQUES DE RÉFÉRENCE EN FERTILISATION	50
TABLEAU 14. COMPARAISON DES RECOMMANDATIONS EN N POUR LA PRODUCTION DU RUTABAGA AU CANADA ET AUX ÉTATS-UNIS	51
TABLEAU 15. RÉPARTITION DES BLOCS DES ESSAIS P DU RUTABAGA SELON DIFFÉRENTES CLASSES DE PROPRIÉTÉS DE SOL APRÈS LA VALIDATION DES DONNÉES	52
TABLEAU 16. VALEURS CRITIQUES DES INDICATEURS POTENTIELS DE SOLS SIGNIFICATIFS SELON LES TESTS DE CATE-NELSON POUR LES ESSAIS P DU RUTABAGA	53
TABLEAU 17. CONCENTRATIONS ET EXPORTATIONS EN P ₂ O ₅ DU RUTABAGA SELON LE DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL.....	63
TABLEAU 18. FERTILISATION PHOSPHATÉE DU RUTABAGA – VALEURS SCIENTIFIQUES DE RÉFÉRENCE EN FERTILISATION	65
TABLEAU 19. COMPARAISON DES RECOMMANDATIONS EN P ₂ O ₅ POUR LA PRODUCTION DU RUTABAGA AU CANADA ET AUX ÉTATS-UNIS.....	67
TABLEAU 20. RÉPARTITION DES BLOCS DES ESSAIS K SELON DIFFÉRENTES CLASSES DE PROPRIÉTÉS DE SOL APRÈS LA VALIDATION DES DONNÉES	68
TABLEAU 21. VALEURS CRITIQUES DES INDICATEURS DE SOLS SIGNIFICATIFS SELON LES TESTS DE CATE-NELSON POUR LES ESSAIS K DU RUTABAGA. 70	
TABLEAU 22. CONCENTRATIONS ET EXPORTATIONS DE POTASSIUM DU RUTABAGA EN FONCTION DU DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL.....	81
TABLEAU 23. FERTILISATION POTASSIQUE DU RUTABAGA BASÉE SUR LES EXPORTATIONS EN K ₂ O DE LA CULTURE VALEURS SCIENTIFIQUES DE RÉFÉRENCE EN FERTILISATION	83
TABLEAU 24. COMPARAISON ENTRE LES RECOMMANDATIONS EN K ₂ O POUR LA PRODUCTION DU RUTABAGA ACTUELLEMENT UTILISÉES AU QUÉBEC ET CELLES DE LA PRÉSENTE ÉTUDE.	83
TABLEAU 25. COMPARAISON DES RECOMMANDATIONS EN K ₂ O POUR LA PRODUCTION DU RUTABAGA AU CANADA ET À L'ÉTRANGER	84

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1. RÉPARTITION GÉOGRAPHIQUE DES SITES.	13
FIGURE 2. DISTRIBUTION DES BLOCS DES ESSAIS DANS LE TRIANGLE DES TEXTURES.	14
FIGURE 3. RENDEMENTS MOYENS PAR SITE EN FONCTION DES TRAITEMENTS DE FERTILISATION.	20
FIGURE 4. DÉFINITIONS DES QUADRANTS D'UN TEST DE PARTITION BINAIRE DE CATE-NELSON (1979).....	24
FIGURE 5. RÉSULTATS DES ANALYSES DE VARIANCE SUR LA RÉPONSE DU RUTABAGA (DIAMÈTRE > 5 CM) AUX DOSES CROISSANTES D'AZOTE.	32
FIGURE 6. RÉSULTATS DES ANALYSES DE VARIANCE SUR LA RÉPONSE DU RUTABAGA (DIAMÈTRE ENTRE 5 ET 14 CM) AUX DOSES CROISSANTES D'AZOTE.	34
FIGURE 7. EFFET DE LA FERTILISATION AZOTÉE SUR LE CALIBRE DES RUTABAGAS À LA RÉCOLTE.	36
FIGURE 8. ÉVALUATION DE LA ROBUSTESSE DE L'ATTACHE DU FEUILLAGE SELON LES DOSES D'AZOTE APPLIQUÉES.	38
FIGURE 9. ÉVALUATION DU DÉVELOPPEMENT DU FEUILLAGE DU SELON LES DOSES D'AZOTE APPLIQUÉES.....	40
FIGURE 10. EFFET DE LA DOSE DE N SUR L'APPARITION DU CŒUR BRUN DU RUTABAGA.	42
FIGURE 11. EFFET DE LA DOSE DE N SUR L'APPARITION DU CŒUR CREUX DU RUTABAGA.	43
FIGURE 12. PERTES DE RENDEMENTS À LA RÉCOLTE EN FONCTION DE LA DOSE D'AZOTE APPLIQUÉE, LA TENEUR EN MATIÈRE EN ORGANIQUE ET LE GROUPE DE TEXTURES DU SOL.....	44
FIGURE 13. RÉPARTITION DES PERTES À LA RÉCOLTE EN FONCTION DES DOSES CROISSANTES D'AZOTE.	44
FIGURE 14. PERTES DE RENDEMENT SUIVANT L'ENTREPOSAGE EN FONCTION DE LA DOSE D'AZOTE APPLIQUÉE, LA TENEUR EN MATIÈRE EN ORGANIQUE ET LE GROUPE DE TEXTURES DU SOL.	46
FIGURE 15. EXPORTATIONS D'AZOTE DU RUTABAGA EN FONCTION DES RENDEMENTS TOTAUX ET SELON LE DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL.	47
FIGURE 16. INDICES NITRATE DES TRAITEMENTS D'AZOTE DU RUTABAGA AUX PROFONDEURS 0-30 ET 30-60 CM DANS LES SOLS G1 VS G2-G3, AU MOMENT DE LA RÉCOLTE.	48
FIGURE 17. RÉSULTATS DES ANALYSES DE VARIANCE SUR LA RÉPONSE DU RUTABAGA AUX DOSES CROISSANTES DE P ₂ O ₅	55
FIGURE 18. CALIBRES À LA RÉCOLTE SELON LES DOSES DE PHOSPHORE.....	56
FIGURE 19. ÉVALUATION DE LA ROBUSTESSE DE L'ATTACHE DU FEUILLAGE À LA TIGE SELON LA DOSE DE PHOSPHORE.	57
FIGURE 20. ÉVALUATION DU DÉVELOPPEMENT DU FEUILLAGE SELON LES DOSES DE PHOSPHORE.	58
FIGURE 21. EFFET DE LA DOSE DE PHOSPHORE SUR L'APPARITION DU CŒUR BRUN DU RUTABAGA.	59
FIGURE 22. EFFET DE LA DOSE DE PHOSPHORE SUR L'APPARITION DU CŒUR CREUX DU RUTABAGA.....	60
FIGURE 23. PERTES DE RENDEMENTS À LA RÉCOLTE EN FONCTION DE LA DOSE DE PHOSPHORE APPLIQUÉE.	61
FIGURE 24. PERTES DE RENDEMENTS À L'ENTREPOSAGE EN FONCTION DE LA DOSE DE PHOSPHORE APPLIQUÉE.	62
FIGURE 25. EXPORTATIONS DE PHOSPHORE DU RUTABAGA EN FONCTION DES RENDEMENTS TOTAUX SELON LE DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL.	63
FIGURE 26. RÉPONSE DU RUTABAGA À LA FERTILISATION POTASSIQUE SELON QUE LES SITES AIENT ÉTÉ NON FERTILISÉS (À GAUCHE) OU FERTILISÉS (À DROITE) EN BORE.	69
FIGURE 27. RÉSULTATS DES ANALYSES DE VARIANCE SUR LA RÉPONSE DU RUTABAGA AUX DOSES CROISSANTES DE POTASSIUM.	72
FIGURE 28. CALIBRES À LA RÉCOLTE SELON LES DOSES DE POTASSIUM.	73
FIGURE 29. ÉVALUATION DE LA ROBUSTESSE DE L'ATTACHE DU FEUILLAGE SELON LA DOSE DE POTASSIUM.	74
FIGURE 30. ÉVALUATION DU DÉVELOPPEMENT DU FEUILLAGE SELON LES DOSES DE POTASSIUM.....	75
FIGURE 31. EFFET DE LA DOSE DE POTASSIUM SUR L'APPARITION DU CŒUR BRUN DU RUTABAGA.	76
FIGURE 32. EFFET DE LA DOSE DE POTASSIUM SUR L'APPARITION DU CŒUR CREUX DU RUTABAGA.	77

FIGURE 33. PERTES À LA RÉCOLTE EN FONCTION DES DOSES CROISSANTES DE POTASSIUM.	78
FIGURE 34. RÉPARTITION DES PERTES À LA RÉCOLTE EN FONCTION DES DOSES CROISSANTES DE K_2O	79
FIGURE 35. PERTES SUIVANT UNE PÉRIODE D'ENTREPOSAGE EN FONCTION DES DOSES CROISSANTES DE POTASSIUM.....	80
FIGURE 36. EXPORTATIONS DE K_2O EN FONCTION DES RENDEMENTS DU RUTABAGA SELON LE DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL.....	81

GLOSSAIRE

Calibre 1 : Rendement vendable des rutabagas ayant un diamètre compris entre 5 et 9 cm (**petit** ou **cello**).

Calibre 2 : Rendement vendable des rutabagas ayant un diamètre compris entre 9 et 14 cm (**moyen**).

Calibre 3 : Rendement vendable des rutabagas ayant un diamètre supérieur à 14 cm (**gros** ou **jumbo**).

Rendement vendable : Somme du rendement des rutabagas de calibres 1, 2 et 3.

Rendement non vendable : Somme des rendements non-commercialisables, comme les rutabagas présentant des malformations, des maladies ou des calibres trop petits (diamètre < 5 cm).

Rendement total : Somme du rendement vendable et du rendement non vendable (l'ensemble du rendement mesuré sur une parcelle).

1. PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES ESSAIS ET DES ANALYSES

1.1 Provenance des données

Dans le cadre du MIRVRF, la détermination des classes de fertilité des sols et des valeurs scientifiques de référence en fertilisation (VSRF) du rutabaga cultivé 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 2014 tandis que les essais du MIRVRF ont eu lieu en 2020 et 2021. Une description sommaire des sites des essais de rutabaga est présentée au Tableau 1.

Tableau 1. Description sommaire des sites des essais de fertilisation du rutabaga

# site	Série de sol ¹	Région admin. ²	Année	Semis	Récolte	Durée essai jours	S-L-A ³ %	Essais N		Essais P		Essais K		
								MO ⁴ %	Rdt ⁵ kg/ha	P _{M3} ^{6,7} kg/ha	ISP ₁ ^{7,8} %	Rdt ⁵ kg/ha	K _{M3} ^{7,10} kg/ha	Rdt ⁵ kg/ha
MIRVRF														
1	Mawcook	12	2020	9 juin	22 sept.	105	47-32-20	.	.	127	5,3	46 334	.	.
2	Mawcook	12	2021	12 juin	29 sept.	109	46-34-20	3,3	46 116	134	7,9	50 096	110	43 002
3	Des Pins	12	2021	6 juin	21 sept.	107	56-29-15	3,8	58 803	120	3,2	61 752	226	52 810
4	Sainte-Rosalie	14	2021	1 juin	13 oct.	134	36-26-38	4,0	64 158	218	10,5	63 248	394	64 151
PSEFCM														
5	Courval/ Sainte-Rosalie	14	2010	15 juin	12 oct.	119	18-37-45	3,6	58 269	229	11,2	64 697	415	65 320
6	Courval/ Sainte-Rosalie	14	2009	12 juin	15 oct.	125	36-26-37	2,7	45 240	77	3,0	52 773	259	54 582
7	Aston/Terre noire	14	2013	4 juil.	15 oct.	103	.	19,8	62 120	466	85,7	57 417	229	60 725
8	Sorel/Sainte-Rosalie	14	2014	2 juin	29 août	88	37-33-31	3,1	39 560	600	21,9	31 108	604	33 577
9	Soulanges	14	2013	5 juin	2 oct.	119	31-51-18	3,1	63 244	217	12,8	70 254	294	72 891
10	Aston	14	2012	27 juin	18 oct.	113	29-35-37	2,6	39 983	107	4,0	35 703	270	39 390
11	.	14	2010	10 juin	6 oct.	118	26-39-36	4,8	57 946	163	7,6	59 086	244 [§]	64 626
12	Saint-Bernard/ Chicot	14	2009	17 juin	13 oct.	118	15-44-41	5,1	42 297	81	3,4	33 099	247	32 318
13	Dorval/ Châteauguay	14	2012	21 mai	25 sept.	127	26-29-45	6,2	57 733	582	24,5	60 885	794	58 669
14	Dorval/ Châteauguay	14	2013	6 juin	30 sept.	116	35-33-32	5,4	73 959	516	29,5	68 059	611	73 578
15	Beaurivage	12	2009	15 juin	14 oct.	121	51-33-17	4,8	41 495	194	6,0	45 187	287	44 315
16	Fourchette/ Beaurivage	12	2013	6 juin	3 oct.	119	45-32-22	4,3	80 178	345	21,7	82 852	349	80 393
17	Rivière-du-Loup/ Du Creux	12	2012	11 juin	5 oct.	116	51-29-20	5,4	51 007	56	1,7	50 360	130	47 646
18	Neubois/ Le Bras	12	2010	10 juin	7 oct.	119	22-44-34	4,4	67 506	144	5,9	71 356	224	73 076
19	Neubois/ Le Bras	12	2009	8 juin	15 oct.	129	65-18-17	4,6	39 140	212	10,2	42 353	246	45 223
20	Rivière-Du-Loup/ Dessaint	12	2010	8 juin	7 oct.	121	71-16-14	5,5	62 647	182 [§]	5,9	67 929	237	63 962
Moyenne						116	39-33-28	5,1	55 337	238	14,1	55 727	325	56 329

¹ Sites 1 à 4 : Les séries de sols ont été déterminées par l'équipe des pédologues de l'IRDA. Sites 5 à 20 : 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; 12 : Chaudière-Appalaches; 14 : Lanaudière.

³ S-L-A : Sable-limon-argile.

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

⁵ Rdt : Rendement vendable sur base fraîche.

⁶ P_{M3} : Teneur du sol en P 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 de 200 kg/ha de P_{M3} (essais P, sites 5 à 20), 7,6 ou 13,1 % d'ISP₁ selon la teneur en argile (essais P, sites 1 à 4) et une teneur de 400 kg K_{M3}/ha (essais K).

⁸ ISP₁ : Indice de saturation du sol en phosphore (P/Al)_{Mehlich-3}.

¹⁰ 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.

[§] Site pour lequel la richesse supposée a été mal évaluée pour les essais P (colonne P_{M3} pour les sites PSEFCM; colonne ISP₁ pour les sites MIRVRF) ou pour les essais K (colonne K_{M3}).

1.2 Localisation des sites

Les essais de rutabaga ont été réalisés exclusivement dans les régions de Lanaudière (55 %; Figure 1A) et de Chaudière-Appalaches (45 %; Figure 1B). La localisation des sites d'essais dans deux secteurs restreints peut donc présenter un problème de représentativité du jeu de données, bien qu'une majorité des producteurs de rutabagas se situent dans ces deux régions (APMQ, 2022).

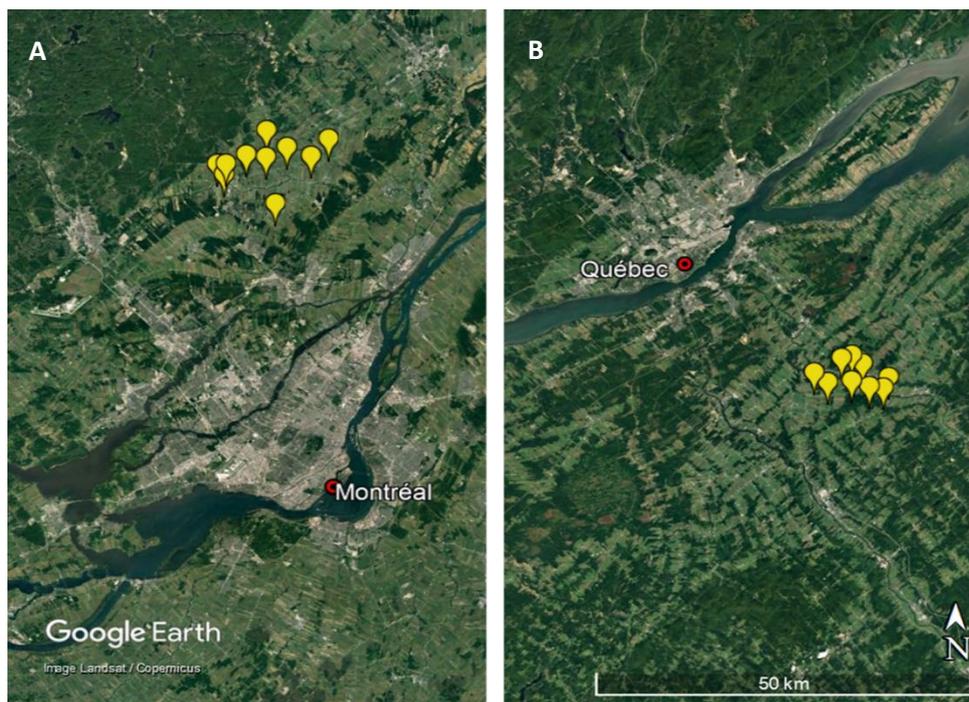


Figure 1. Répartition géographique des sites. L'emplacement des repères est approximatif et vise seulement à représenter la répartition géographique des sites sur le territoire du Québec.

1.3 Propriétés physico-chimiques des sols

Les analyses physico-chimiques du sol (0-20 cm) ont été effectuées par tiroir (PSEFCM, dispositif en tiroirs subdivisés « split-plot ») ou par bloc (MIRVRF, dispositif en blocs complets aléatoires) selon le programme qui chapeautait les essais (voir section 1.4) afin de déterminer des indicateurs de fertilité du sol. Plusieurs paramètres ont été mesurés. Dans le cadre du PSEFCM, la teneur en matière organique a été dosée par perte au feu [PAF] dans les tiroirs d'essais P et K et par la méthode Walkley-Black [WB] dans les blocs (tiroirs N, P et K d'un même bloc confondus). Dans le MIRVRF, la matière organique a été dosée par la méthode WB, par bloc. Les teneurs en éléments nutritifs du sol (méthode Mehlich-3), la masse volumique apparente, la granulométrie et la teneur du sol en $N-NO_3$ (0-30 cm; méthode KCl 2M) au semis ont été mesurées par tiroir dans le PSEFCM et par bloc dans le MIRVRF. De plus, pour les sites du MIRVRF (4 sites sur 20), une analyse des profils de sol a été réalisée par l'équipe des pédologues de l'IRDA, laquelle a servi à identifier les séries de sols et leurs particularités pédologiques, à valider le groupe de textures et à prendre en considération l'état de santé du sol lors de l'analyse exploratoire.

Les essais de rutabaga ont été menés majoritairement sur des sols à textures fines (G1; 43 %), suivis de ceux à textures moyennes (G2; 36 %) et en moindre importance sur des sols à textures grossières (G3; 22 %) (Figure 2). Les sols des sites contenaient entre 11 et 42 % d'argile, tandis que 50 % des sites avaient une teneur se situant sous le seuil de 30 %. Les essais réalisés en sols G1 ont été localisés exclusivement dans la région de Lanaudière. À l'inverse, hormis le site 9 (G2), les essais réalisés sur des sols G2 et G3 ont tous été localisés dans la région de Chaudière-Appalaches. L'un des 20 sites (site 7; 5 % des données) a été effectué sur un sol très riche (entre 13,7 et 19,1 % MO_{PAF}) en matières organiques et, par conséquent, a été écarté des analyses statistiques.

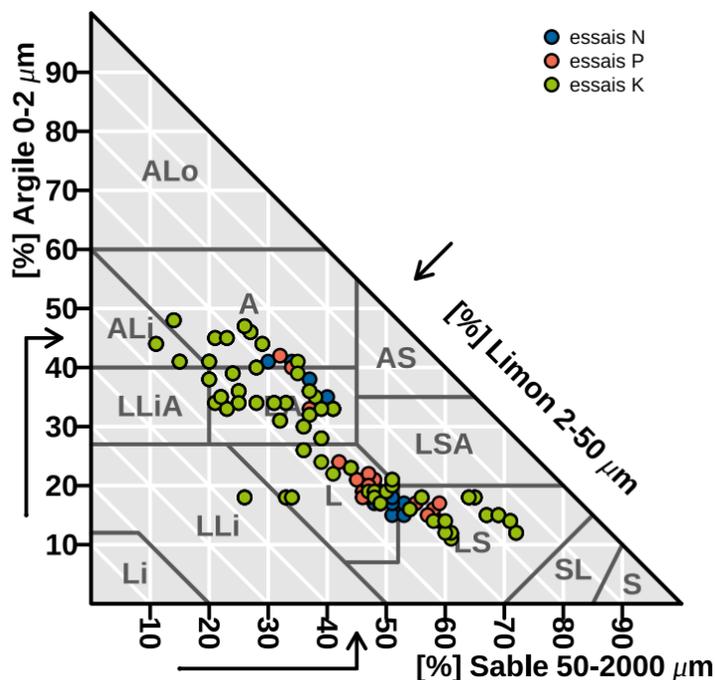


Figure 2. Distribution des blocs des essais dans le triangle des textures. ALo : Argile lourde ; ALi : Argile limoneuse ; A : Argile ; LLiA : Loam limono-argileux ; LA : Loam argileux ; AS : Argile sableuse ; L : Loam ; Li : Limon ; LLi : Loam limoneux ; LSA : Loam sablo-argileux ; LS : Loam sableux ; SL : Sable loameux ; S : Sable. Le site 7 ayant une teneur en MO relativement élevée (13,7 à 19,1 %) n'est pas présenté sur cette carte et a été exclu de la base de données.

Pour la totalité des essais, le pH_{eau} des sols variait de 5,7 à 7,6 avec une moyenne de 6,7, laquelle est assez proche du pH optimal pour cette culture définie à 6,5 par le CRAAQ (2010). Hormis le site réalisé sur un sol riche en MO (exclus du jeu de données), la teneur en MO_{PAF} des sols variait de 2,2 % à 6,3 %. L'ISP₁ des sols variait largement entre 1,3 et 31,6 %. En général, dans les sols de textures moyennes à grossières (G2-G3), les essais de rutabaga ont été réalisés sur des sols non saturés en P avec 89 % des sites qui avaient un ISP₁ inférieur à 13,1 %. À l'opposé, dans les sols de textures fines (G1), 40 % des sols avaient un ISP₁ inférieur au seuil de saturation de 7,6 %. Finalement, les teneurs en K_{M3} des sols variaient entre 48 et 400 ppm K_{M3} , pour une moyenne de 137 ppm. La teneur en B des sols, un élément important dans la prévention de l'apparition du symptôme de cœur brun chez le rutabaga, variait entre 0,3 et 2,2 ppm.

1.4 Dispositifs expérimentaux et traitements

1.4.1 Dispositifs

La réponse du rutabaga aux apports d'engrais N, P et K a été testée en plein champ chez des producteurs agricoles. Les essais de fertilisation ont été réalisés dans le cadre des deux programmes de fertilisation : le PSEFCM et le MIRVRF. La structure du dispositif expérimental des essais a varié selon que les données étaient issues de l'un ou l'autre des programmes. De plus, les doses testées et les modes d'application ont été différents, selon l'élément à l'essai.

Dans le cas des sites du PSEFCM (2009 à 2014), les traitements (doses d'engrais) étaient disposés selon un plan en tiroirs (split-plot) comportant trois blocs complètement aléatoires. Chaque bloc du dispositif était constitué de trois parcelles principales représentant chacune un élément nutritif (N, P et K) à l'essai, à l'intérieur desquelles se trouvaient quatre sous-parcelles où les doses de N, de P ou de K étaient testées. Quant aux sites MIRVRF (2020 et 2021), les essais 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 cinq blocs complètement aléatoires, chacun incluant cinq traitements correspondant aux doses de l'élément testé. Pour l'ensemble des essais effectués, les semis ont eu lieu du 21 mai au 4 juillet avec la majorité des sites implantés dans la première quinzaine du mois de juin. Les essais ont duré entre 88 et 134 jours, pour une moyenne de 116 jours. La densité de plantation lors des essais était très variable, soit en moyenne entre de 6 à 8 plants/ mètre linéaire pour une distance entre les rangs variant entre 0,71 et 0,76 mètre.

1.4.2 Traitements

Dans les essais N du PSEFCM, les traitements ont été choisis selon l'historique de réponse du site à la fertilisation azotée, ce qui n'a pas été le cas dans le MIRVRF. Quant aux essais P et K des deux programmes, les traitements ont été choisis en fonction de la classe de fertilité du sol pour l'élément testé (essais P, section 1.4.2.2 et essais K, section 1.4.2.3). Ainsi, des doses plus élevées de P_2O_5 et de K_2O ont été testées dans les sols dits « à faibles teneurs » en P ou K, tandis que de plus faibles apports étaient prévus dans les sols dits à « fortes teneurs » en P ou K. Dans le PSEFCM, la séparation de ces deux classes a été effectuée sur la base des teneurs en P_{M3} et en K_{M3} (200 kg P_{M3} /ha, 400 kg K_{M3} /ha). Dans le MIRVRF, le seuil de K_{M3} a été conservé, mais celui du P_{M3} a été remplacé par l'usage combiné des seuils d'ISP₁ du REA (MDDEP, 2010) et de la teneur en argile, puisqu'il a été démontré que l'ISP₁ est un meilleur indicateur de la biodisponibilité du P que le P_{M3} seul (Khiari et al., 2000). En tout, un site d'essai P et un site d'essai K du PSEFCM ont été mal classés de part et d'autre des seuils de richesse du sol et n'ont pas reçu les doses prévues (ex.: doses élevées pour un site à forte teneur en K_{M3}). Ceci pourrait faire en sorte que la réponse de la culture à la fertilisation n'a pu être adéquatement étudiée. En effet, dans les sols à faibles teneurs, les niveaux de traitement les plus élevés pourraient être insuffisants pour l'atteinte d'un plateau de production. Inversement, dans les sols à fortes teneurs, le plateau de production pourrait être atteint dès l'application du plus faible niveau de traitement.

Dans les essais du PSEFCM et dans l'essai MIRVRF de 2020, les engrais ont été appliqués en deux apports : (i) en bande, c.-à-d. dans un sillon creusé et refermé à la binette, au semis et (ii) en bande au stade 4-6 feuilles, soit environ 42 jours après le semis (Tableaux 3, 4 et 5). Dans les essais du MIRVRF de 2021, (i) une partie de l'engrais

a été apporté avant le semis en ruban, c.-à-d. en une bande d'environ 10 cm de large et incorporée sur la largeur de la butte tandis que (ii) le reste était apporté en ruban sur l'épaule de la butte et incorporé au sarclé, au stade 4-6 feuilles (Tableaux 3, 4 et 5). Cette modification a été apportée afin de mieux refléter les pratiques des producteurs au Québec.

Pour tous les essais, seul l'élément testé variait, les autres éléments nutritifs majeurs étant fixés au troisième niveau de traitement de chaque élément afin qu'ils ne soient pas limitants. Afin d'éviter l'apparition de carences qui causent la présence de cœurs bruns, les sites ont également reçu des apports en bore, selon la pratique du producteur. Ainsi, une fertilisation en B (4 ou 5 kg de B /ha) a été apportée pour 5 des 20 sites (Tableau 2). Ces sites fertilisés en B sont situés en grande partie dans la région de Chaudière-Appalaches et correspondent généralement aux plus récents essais. Dans la région de Lanaudière, seulement un essai, réalisé en 2021 a été fertilisé en B.

Tableau 2. Fertilisation en bore des sites d'essais de rutabaga en comparaison aux recommandations du CRAAQ (2010)

Site	Région	pH	B eau chaude ¹ (ppm)	Recommandation en B ² (kg/ha)	Dose de B appliquée (kg/ha)
1	Chaudière-Appalaches (Essai P uniquement)	6,7	-	-	0,0
2	Chaudière-Appalaches	6,4	0,3	1,0	5,0
3	Chaudière-Appalaches	6,6	0,7	1,0	5,0
4	Lanaudière	6,1	0,4	1,0	5,0
5	Lanaudière	7,5	0,7	1,5	0,0
6	Lanaudière	6,7	0,6	1,0	0
7	Lanaudière	6,9	2,9	1,0	0
8	Lanaudière	5,8	0,5	1,0	0
9	Lanaudière	6,8	0,6	1,5	0
10	Lanaudière	6,9	0,7	1,5	0
11	Lanaudière	7,0	0,7	1,5	0
12	Lanaudière	6,6	0,6	1,0	0
13	Lanaudière	6,2	0,8	1,0	0
14	Lanaudière	7,2	1,2	1,0 ³	0
15	Chaudière-Appalaches	7,2	0,6	1,5	0
16	Chaudière-Appalaches	6,8	1,2	1,0 ³	4
17	Chaudière-Appalaches	6,8	1,0	1,0	4
18	Chaudière-Appalaches	7,3	1,0	1,0	0
19	Chaudière-Appalaches	6,9	0,7	1,5	0
20	Chaudière-Appalaches	7,1	0,3	1,5	0

¹ Le B_{eau chaude} du sol a été calculé à partir du B_{Mehlich 3} en utilisant l'équation du CRAAQ (2010) p. 200 : $BM3 = 1,31 \times B \text{ eau chaude (ppm)}$.

² Source : CRAAQ 2010, Tableau 7.3, page 201.

³ Pour les sites ayant une recommandation en B nulle dans le tableau 7.3 (P.201), la recommandation de 1,0 kg B/ha est considérée (CRAAQ, 2010. p 449).

1.4.2.1 Doses d'azote

Les traitements des essais azotés correspondaient à quatre (2009-2014, PSEFCM) ou cinq (2020-2021, MIRVRF) doses de N variant de 0 à 120 kg/ha, apportées sous forme de nitrate d'ammonium calcique (27-0-0). Tous les traitements de N comportaient des apports complémentaires de P₂O₅ et de K₂O dont la dose, le mode et la période d'application correspondaient au T8 et au T11 des essais P et K dans le PSEFCM et aux T7 et T12 dans le MIRVRF (Tableaux 4 et 5).

Tableau 3. Description des traitements des essais de fertilisation azotée

Essais N				Dose de N (kg/ha)				
Programme	Historique du champ	Nombre de sites	Mode et période d'application	T1	T2	T3	T4	
PSEFCM (2009-2014)	Faible réponse à la fertilisation azotée	8	En bande au semis	0	30	30	30	
			En bande, stade 4-6 feuilles (42 JAS)	0	0	30	60	
			Apport total	0	30	60	90	
	Bonne réponse à la fertilisation azotée	8	En bande au semis	0	30	30	30	
			En bande, stade 4-6 feuilles (42 JAS)	0	30	60	90	
			Apport total	0	60	90	120	
				T0	T1	T2	T3	T4
MIRVRF (2021)	NA	3	En ruban incorporé sur la largeur de la butte, en pré-semis	0	30	30	30	30
			En ruban incorporé sur l'épaule de la butte, stade 4-6 feuilles (42 JAS)	0	0	30	60	90
			Apport total	0	30	60	90	120

PSEFCM : Programme de soutien aux essais de fertilisation des cultures maraîchères; MIRVRF : Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation; JAS : Jours après le semis; NA : non applicable.

1.4.2.2 Doses de phosphore

Dans le PSEFCM, les traitements correspondaient à quatre doses de P_2O_5 variant de 0 à 150 kg/ha ou de 0 à 90 kg/ha selon la teneur en P_{M3} du sol, tandis que dans le MIRVRF, cinq doses variant de 0 à 120 kg P_2O_5 /ha ou de 0 à 200 kg P_2O_5 /ha ont été testées, selon la saturation en P (ISP_1) (Tableau 4). L'engrais phosphaté a été apporté sous forme de superphosphate triple (0-46-0). Tous les traitements de P comportaient des apports complémentaires de N et de K_2O dont la dose, le mode et la période d'application correspondaient au T3 et au T11 des essais N et K dans le PSEFCM et aux T3 et T12 dans le MIRVRF (Tableaux 3 et 5). Dans tous les cas, l'engrais a été incorporé.

Tableau 4. Description des traitements des essais de fertilisation phosphatée

Essais P				Dose de P ₂ O ₅ (kg/ha)					
Programme	Nombre de sites ¹	ISP ₁ ²	Mode et période d'application	T5	T6	T7	T8		
PSEFCM (2009-2014)	8	≤ 200 kg P _{M3} /ha	En bande au semis	0	50	60	90		
			En bande au stade 4-6 feuilles (42 JAS)	0	0	40	60		
				Apport total	0	50	100	150	
	8	> 200 kg P _{M3} /ha	En bande au semis	0	30	60	60		
			En bande au stade 4-6 feuilles (42 JAS)	0	0	0	30		
				Apport total	0	30	60	90	
				T5	T6	T7	T8	T9	
MIRVRF (2020)	1	≤ 7,6 ou 13,1 %	En bande au semis	0	50	100	150	200	
			Apport total	0	50	100	150	200	
MIRVRF (2021)	2	≤ 7,6 ou 13,1 %	En ruban incorporé sur la largeur de la butte, en pré-semis	0	50	100	150	200	
				Apport total	0	50	100	150	200
	1	> 7,6 ou 13,1 %	En ruban incorporé sur la largeur de la butte, en pré-semis	0	30	60	90	120	
			Apport total	0	30	60	90	120	

PSEFCM : Programme de soutien aux essais de fertilisation des cultures maraîchères; MIRVRF : Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation; JAS : Jours après le semis.

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

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

1.4.2.3 Doses de potassium

Dans le PSEFCM, les traitements correspondaient à quatre doses de K₂O variant de 0 à 165 kg/ha ou de 0 à 90 kg/ha, tandis que dans le MIRVRF, ce sont cinq doses qui ont varié entre 0 et 220 ou 0 et 120 kg K₂O/ha (Tableau 5). La teneur en K_{M3} du sol déterminait lequel de ces deux intervalles était sélectionné à chaque essai. Les sources d'engrais préconisées étaient le muriate de potassium (0-0-60) ou le sulfate de potassium et de magnésium (0-0-22-11) lorsque du Mg était nécessaire. Tous les traitements de K₂O comportaient des apports complémentaires de N et de P₂O₅ dont la dose, le mode et la période d'application correspondaient au T3 et au T8 des essais P et N dans le PSEFCM et aux T3 et T7 dans le MIRVRF (Tableau 3 et 4).

Tableau 5. Description des traitements des essais de fertilisation potassique

Essais K				Doses de K ₂ O (kg/ha)				
Programme	Nombre de sites ¹	K _{M3} (kg/ha)	Mode et période d'application	T9	T10	T11	T12	
PSEFCM (2009-2014)	12	≤ 400	En bande au semis	0	55	70	90	
			En bande au stade 4-6 feuilles (42 JAS)	0	0	40	75	
	Apport total			0	55	110	165	
	4	> 400	En bande au semis	0	30	60	60	
			En bande au stade 4-6 feuilles (42 JAS)	0	0	0	30	
	Apport total			0	30	60	90	
				T10	T11	T12	T13	T14
MIRVRF (2021)	2	≤ 400	En ruban incorporé sur la largeur de la butte, en pré-semis	0	55	70	90	100
			En ruban incorporé sur l'épaule de la butte, stade 4-6 feuilles (42 JAS)	0	0	40	75	120
	Apport total			0	55	110	165	220
	1	> 400	En ruban incorporé sur la largeur de la butte, en pré-semis	0	30	30	50	70
			En ruban incorporé sur l'épaule de la butte, stade 4-6 feuilles (42 JAS)	0	0	30	40	50
	Apport total			0	30	60	90	120

PSEFCM : Programme de soutien aux essais de fertilisation des cultures maraîchères; MIRVRF : Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation; JAS : Jours après le semis

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.

1.5 Rendements

Les rendements vendables (diamètre > 5 cm) et totaux du rutabaga sont présentés à la Figure 3. Les rendements de référence (32 330 kg/ha; présentés par la ligne jaune) de la culture pour la province pour la période de réalisation des essais, ont été atteints dans presque tous les traitements. Les statistiques descriptives des rendements totaux, des rendements vendables et des pourcentages de pertes à la récolte sont présentées au Tableau 6. Les rendements totaux étaient en moyenne de 57 899, 59 109 et 58 683 kg/ha pour les essais N, P et K, respectivement, bien qu'une grande variabilité ait été observée avec des valeurs allant de 13 207 à plus de 102 493 kg/ha. Les rendements moyens et les variations de rendements ont été similaires entre les trois essais. Les rendements vendables moyens étaient, quant à eux, de 54 407, 55 806 et de 55 373 kg/ha dans les essais N, P et K, respectivement. Tel qu'illustré à la Figure 3, la variation des rendements observée au Tableau 6 s'explique principalement par des effets de sites, considérant que les sites 8, 10, 12, 15, 17 et 19 ont eu des rendements environ deux fois plus faibles que ceux des autres sites.

Les pertes de récolte, c.-à-d. la différence entre les rendements totaux et les rendements vendables, ont été en moyenne de 6 %, indépendamment de l'essai (Tableau 6). Des variations considérables ont été observées au

niveau des pourcentages de pertes selon les sites avec des valeurs allant de 0 à 65 %, bien que les pertes élevées aient été observées dans peu d'unités expérimentales. Les données de la Figure 3 montrent également que les pertes varient selon les sites, avec des valeurs relativement plus élevées aux sites 7, 8.

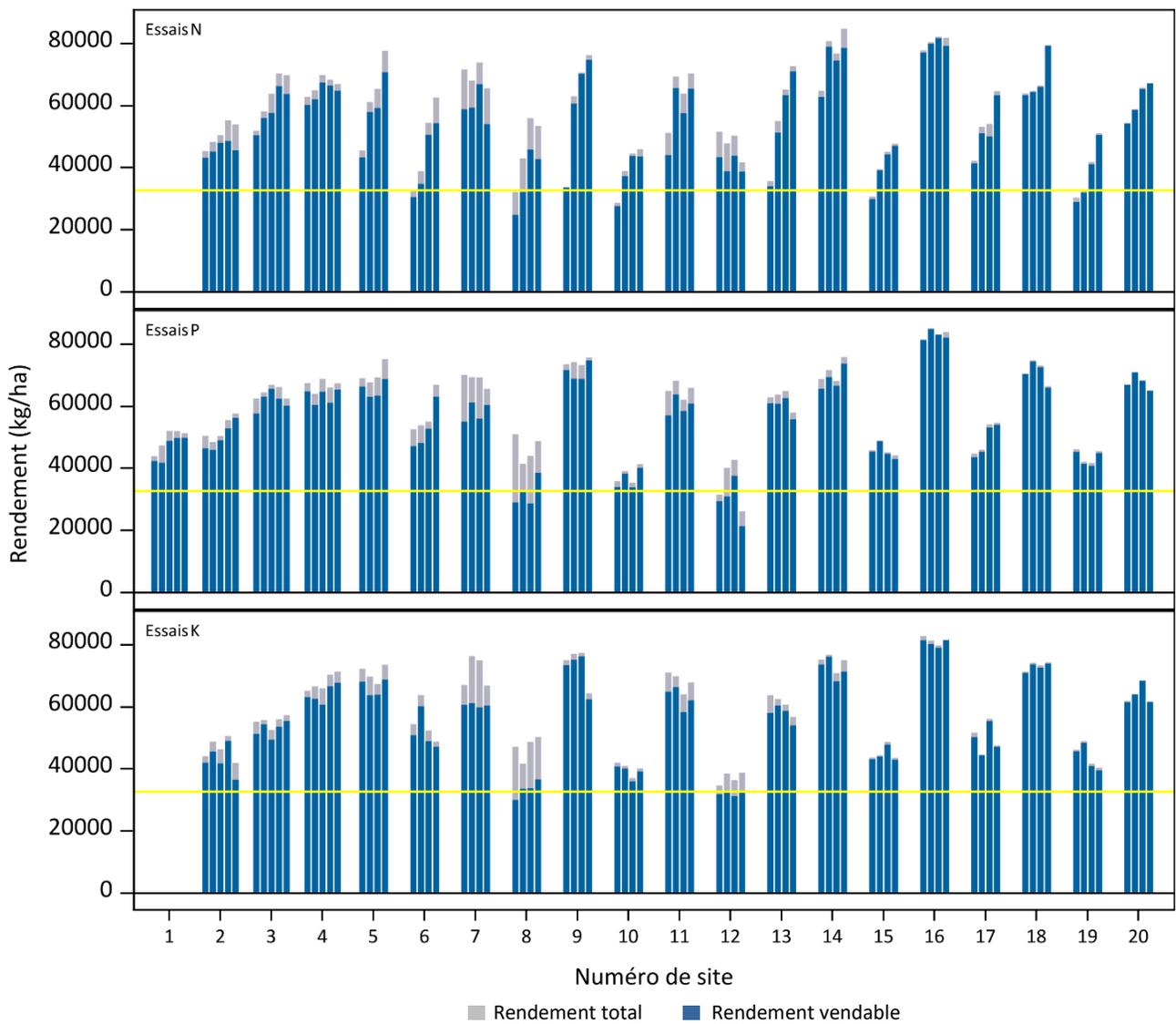


Figure 3. Rendements moyens par site en fonction des traitements de fertilisation. Les traitements de fertilisation sont les doses croissantes d’engrais de l’élément à l’essai et sont détaillés à la section 1.4. Les rendements de référence de la culture (ligne jaune; 32 330 kg/ha) sont une moyenne des rendements à l’hectare du Québec pour les années 2008 à 2013 (min.: 28 800, max.: 37 600 kg/ha; Statistique Canada, 2021).

Tableau 6. Statistiques descriptives sur les données non validées (avant l'analyse exploratoire) des rendements du rutabaga des essais N, P et K

	n	Moyenne	Écart-type	Minimum	Maximum
Rendement total (kg/ha)					
N	261	57 899	15 904	16 497	100 394
P	282	59 109	14 353	13 207	100 722
K	262	58 683	15 597	20 827	102 493
Rendement vendable (kg/ha)					
N	261	54 407	15 969	11 024	98 425
P	282	55 806	14 906	10 954	99 639
K	262	55 373	16 089	13 052	102 395
Pertes (%)					
N	261	6	7	0	45
P	282	6	8	0	65
K	262	6	8	0	57

n : nombre d'observations.

1.6 Aspects additionnels pour l'interprétation des résultats

1.6.1 Variété culturale

Dans le cadre des essais de rutabaga, seule la variété Thomson Laurentian a été utilisée. L'utilisation d'une variété unique de rutabaga est conforme à la pratique du marché québécois. En effet, bien que plusieurs variétés de rutabaga soient en circulation au Canada, une seule est utilisée sur la presque totalité des superficies ensemencées pour la production commerciale du rutabaga (AAC, 2018).

1.6.2 Précédent cultural

Les essais de rutabaga suivaient majoritairement une culture d'orge (30 %) ou de maïs-grain (25 %) et dans une moindre mesure, une culture d'avoine (15 %), de blé (10 %), de seigle d'automne (10 %) ou de betterave (5 %). L'information concernant le précédent cultural a été manquante à un site (5 %).

1.6.3 Irrigation

Les essais de rutabaga ont été réalisés majoritairement sur des sites non irrigués. Parmi les 20 sites, seulement deux ont eu une mention de la présence d'un système d'irrigation. Cependant, aucune information n'a été disponible concernant les quantités d'eau appliquées ou la nature du dispositif. Ainsi, cet aspect n'a pas été considéré pour la suite des analyses.

1.7 Analyse exploratoire

Lorsque réalisés en plein champ, les essais de fertilisation peuvent faire l'objet de multiples problématiques pouvant entraîner leur exclusion du jeu de données. En cours de réalisation, certains essais peuvent être interrompus, lorsque jugés non valides par l'équipe de terrain pour des raisons diverses, dont le mauvais établissement de la culture, la présence de maladies foliaires, la perte de la biomasse récoltée, etc. Dans le cadre du traitement des données, une analyse exploratoire a été également réalisée minutieusement. Celle-ci a permis,

entre autres, de détecter la présence de données aberrantes ou influentes, et de vérifier la représentativité des rendements en comparaison à ce qui est obtenu en contexte de production commerciale sur la même période, lorsque possible. Dans le cadre de cette démarche, 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 supérieure à 30 %. Pour terminer, 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). Cette démarche a mené au retrait de certaines parcelles, certains blocs ou certains essais jugés problématiques.

Le bilan de la validation des données est présenté au Tableau 7. À l'issue de l'analyse exploratoire, 79 % (81 %, 79 % et 76 % des essais N, P et K respectivement) du jeu de données initial a été validé et conservé pour la suite des analyses. Les principales causes d'exclusion de données dans les essais de rutabaga ont été : 1) la présence de problématiques de terrain non contrôlées par le dispositif expérimental, 2) la présence de ravageurs et 3) des pertes de rendement élevées mesurées à la récolte pour des causes diverses. La liste des données exclues lors de la validation est présentée à l'Annexe I.

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

Essai	Jeu de données initial		Jeu de données final		Validation
	Nb sites	Nb obs.	Nb sites	Nb obs.	%
N	19	358	16	290	81
P	20	383	16	304	79
K	19	358	16	272	76

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 du rutabaga, ces échanges avec les spécialistes ont permis la validation du mode d'application des engrais, la prise en compte de sensibilités nutritionnelles connues et des caractéristiques édaphiques favorisant spécifiquement le bon établissement de la culture, la considération des méthodes de récolte et des critères liés aux calibres et à la mise en marché.

1.8.1 Détermination des classes de fertilité des sols

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

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

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

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

Le nuage de points 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 sensibilité 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) : $(VN+VP)/(VN+FN+VP+FP)$.

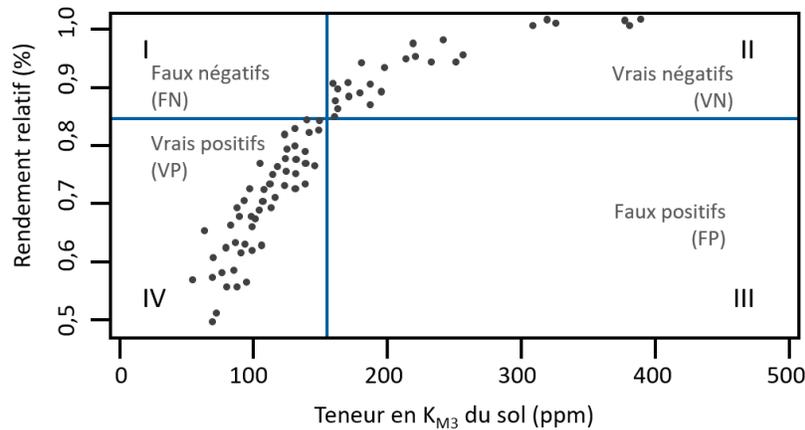


Figure 4. Définitions des quadrants d'un test de partition binaire de Cate-Nelson (1979).

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 de variances (ANOVA). Ainsi, les ANOVA sont effectuées séparément pour les sols se trouvant de part et d’autre des seuils agronomiques de réponse déterminés avec la procédure expliquée précédemment à la section 1.8.1.

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

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

L’ANOVA est effectuée en utilisant la procédure *mixed* de SAS® (SAS Institute Inc., 2013) et en considérant les blocs et les sites comme des effets aléatoires. Lorsque l’ANOVA indique un effet significatif ($P < 0,05$) ou une tendance ($P < 0,12$) à un effet de la dose sur le ROM, des tests de Student (test *t*) sont réalisés afin de faire les comparaisons multiples des moyennes des traitements permettant de déterminer les doses agronomiques

optimales menant aux meilleurs rendements. Il est important de souligner qu'en raison de la considération des rendements sur une base relative (ROM), le test de Student permet de faire une comparaison multiple des moyennes des traitements entre elles sans tenir compte de l'effet de la fertilisation par rapport au témoin. Ainsi, l'absence de différence significative entre les traitements ne traduit pas nécessairement une absence de différence par rapport au témoin. Le calcul des intervalles de confiance à 90 % permet de déterminer si l'augmentation de rendement obtenue pour un traitement donné est numériquement différente en comparaison au témoin.

Puisque les doses testées dans les divers essais varient (voir section 1.4), les doses similaires ont dû être regroupées afin d'équilibrer les jeux de données et d'augmenter la puissance de l'ANOVA. Ainsi, les groupes de doses ont été considérés comme des variables catégoriques plutôt que numériques continues dans le modèle statistique. Les groupes de doses sont exprimés sous cette forme dans le présent document : 1-50-60. Dans ce cas, par exemple, il s'agit du 1^{er} groupe de doses testées (1-50-60) et les doses qui le composent vont de 50 à 60 kg/ha de l'élément testé (1-50-60). La VSRF proposée pour une catégorie de sol donnée est basée sur la répartition des doses testées à l'intérieur du groupe correspondant.

1.8.3 Diagnostic nutritionnel, quantités d'éléments nutritifs exportés

Le taux d'humidité, la concentration en éléments nutritifs (majeurs et mineurs) dans les tissus ont été mesurés sur des rutabagas sains et représentatifs de la parcelle, lesquels ont été prélevés à la récolte. Le diagnostic nutritionnel a été effectué sur la base des concentrations en éléments nutritifs de la biomasse et des rendements totaux (rendement vendable et non-vendable). Enfin, les exportations en N, P₂O₅ et K₂O ont été calculées en considérant les racines uniquement, sans tenir compte de l'analyse du feuillage. Cette considération tient compte du fait qu'en contexte de production commerciale au Québec, les feuillages des rutabagas sont coupés et laissés au champ lors de la récolte mécanique.

Les calculs ont été effectués à partir d'un sous-ensemble d'individus appelé population de tête, regroupant les individus ayant présenté les rendements les plus élevés et des concentrations équilibrées entre les éléments nutritifs qui composent leurs tissus. Les individus présentant de mauvais rendements, de même que ceux carencés ou en excès (prélèvement de luxe) pour certains éléments, ont donc été écartés du calcul.

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

La méthode utilisée dans le cadre du calcul des VSRF se base sur celle de Parent et al. (2009). Toutefois, afin d'améliorer la robustesse du calcul, ces éléments ont été modifiés par l'équipe IRDA (cndMethodRobustIrd ; IRDA, 2021, mise en ligne à venir sur GitHub IRDA) :

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

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

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

Le rutabaga est une culture qui répond grandement à la fertilisation azotée, principalement par une croissance excessive des tubercules et du feuillage. Or, une croissance excessive peut favoriser, entre autres, l'apparition de crevasses sur la racine et de cœur creux, et par conséquent, entraîner le déclassement des rutabagas. Dans ce contexte, des analyses complémentaires ont été effectuées afin d'évaluer l'effet des traitements de fertilisation sur les calibres des rutabagas à la récolte, sur les pertes à la récolte et sur les pertes suivant l'entreposage. L'effet de la fertilisation sur les calibres a été mesuré par des analyses de fréquences et des analyses de variance. À cette fin, les rutabagas ont été classés selon les critères présentés au Tableau 8.

Basé sur les standards du marché québécois, les rutabagas de type cello ou petit (diamètre de 5 à 9 cm) ont été classés de calibre 1, ceux de type moyen (diamètre de 9 à 14 cm) ont été classés de calibre 2 et ceux de type jumbo ou gros (diamètre de plus de 14 cm) ont été classés de calibre 3. Comme les calibres de rutabagas

préconisés sont les calibres 1 et 2, l'effet de la fertilisation N, P et K sur leur proportion par rapport au rendement vendable (calibres 1, 2 et 3) a été vérifié dans le cadre de ce travail.

Tableau 8. Description des calibres du rutabaga pour le classement à la récolte

Calibre		Diamètre	
#	Nom	Pouces (po)	Centimètres (cm)
1	Petit ou cello	2 – 3,5	5 – 9
2	Moyen	3,6 – 5,5	9 – 14
3	Jumbo ou gros	> 5,5	> 14

Les pertes à la récolte, i.e. le rendement non-vendable, pouvaient être causées par une immaturité du rutabaga (diamètre inférieur à 5 cm ou 2 po), la pourriture au collet, l'absence d'un collet violet, l'hernie des crucifères, la nervation noire, le blanc, la mosaïque du navet, des dommages d'insectes irrécupérables ou de la malformation. De plus, un échantillon constitué de cinq (PSEFCM) ou dix (MIRVRF) rutabagas sains et représentatifs de la parcelle a été prélevés aléatoirement dans chaque unité expérimentale puis tranchés du collet à la racine afin de procéder à l'évaluation interne où la présence de cœurs bruns ou de cœurs creux a été notée.

Une évaluation de la qualité des rutabagas a également été effectuée à la suite d'une période de conservation en entrepôt. En moyenne, celle-ci a duré 160 jours (148 à 179 jours). La température et le taux d'humidité à l'entreposage ont varié respectivement entre 1 et 4 °C (moyenne de 1,9 °C) et entre 70 et 95 % (moyenne de 86 %). À la fin de la période d'entreposage, les paramètres de qualité mesurés étaient la présence de maladies (pourriture du collet, pourriture de la racine, etc.), une forte présence de taches, un manque de fermeté de même qu'une évaluation interne identique à celle réalisée à la récolte. Des analyses de variance (modèles linéaires mixtes) ont servi à déterminer si la fertilisation affectait ces paramètres. Des tests de comparaison des moyennes ont permis de préciser les conclusions au besoin.

En raison de l'importance de la qualité du feuillage lors de la récolte mécanique des rutabagas, le développement foliaire de même que la robustesse de l'attache du feuillage à la tige ont été étudiés. Pour chacun de ces deux paramètres, une échelle de classification allant de 1 à 5 a été utilisée selon les descriptions présentées au Tableau 9.

Tableau 9. Échelles de classification de la robustesse de l'attache des feuilles à la tige et du développement foliaire du rutabaga pour le classement à la récolte

Cote	Robustesse de l'attache des feuilles à la tige	Développement foliaire
1	Très bonne attache	Feuillage très dense ou excessif.
2	Attache très bonne à moyenne	Feuillage dense ou supérieur au besoin pour la récolte mécanique.
3	Attache moyenne	Feuillage moyennement dense ou normal pour la récolte mécanique.
4	Attache moyenne à insuffisante	Feuillage moyennement à insuffisamment dense (10 à 25 % des racines non récoltées mécaniquement).
5	Attache insuffisante (25 % et plus des racines ne seraient pas récoltées lors de l'arrachage mécanique)	Feuillage insuffisamment dense (25 % et plus des racines non récoltées mécaniquement)

2. FERTILISATION AZOTÉE

2.1 Portrait et représentativité des données

Les propriétés de la couche de sol de surface (0-20 cm) pour les essais N du rutabaga sont résumées au Tableau 10. Les essais N ont été réalisés majoritairement sur des sols de textures fines (G1; 47 %), suivis de ceux de textures moyennes (G2; 34 %) et de ceux de textures grossières (G3; 19 %). Il importe de souligner que, dans le cadre des essais, la répartition des groupes de textures des sols a différé selon les régions. En effet, les essais réalisés en sols G1 ont été localisés exclusivement dans la région de Lanaudière. À l'inverse, hormis le site 9 (G2), les essais réalisés sur des sols G2 et G3 ont tous été localisés dans la région de Chaudière-Appalaches. En conséquence, les résultats obtenus pourraient refléter un effet confondant de régions et de groupes de textures de sol. Toutes textures de sols confondues, 21 % des blocs avaient un pH compris entre 6,0 et 6,5, tandis que 6 et 73 % des blocs avaient respectivement un pH inférieur à 6,0 et supérieur à 6,5. Un pH de 6,5 (CRAAQ, 2010) ou compris entre 6,1 et 6,5 (OMAFRA, 2011) serait optimal pour le bon développement des rutabagas. La littérature scientifique indique que le pH du sol est un facteur important afin d'assurer la disponibilité du bore et ainsi éviter l'apparition des cœurs bruns à la récolte. En effet, lorsque le pH du sol est supérieur à 6,5, des problèmes carences en B peuvent survenir (Alberta Agriculture and Rural Développement, 2014; Warncke et al., 2004). Dans les sols G2 et G3, la MO a varié de 2,3 à 6,0 %, bien près de la moitié des blocs se situait dans l'intervalle de 3 à 5 %. Dans les sols G1, la plage couverte a été similaire (2,3 à 6,3 %), mais les blocs ont été répartis plus largement dans les différentes classes. Toutes textures confondues, aucun sol n'a eu moins de 2,3 % de MO. Finalement, 71 % des blocs contenaient moins de 15 ppm de N-NO₃, alors que 39 % étaient sous la barre des 10 ppm.

Tableau 10. Répartition des blocs des essais N du rutabaga pour différentes classes de propriétés de sol après la validation des données

pH _{eau} ¹	Blocs (%)	MO _{PAF} (%) ²	Blocs (%)		N-NO ₃ (ppm) ³	Blocs (%)	Groupe de textures ⁴	Blocs (%)
			G1	G2-G3				
≤ 6,0	6	≤ 2	0	0	≤ 5	11	G1	47
6,0 – 6,5	21	2 – 3	26	12	5 – 10	28	G2	34
6,5 – 7,0	48	3 – 5	57	48	10 – 15	32	G3	19
> 7,0	25	5 – 6	4	40	> 15	6	-	-
-	-	> 6	13	0	nd	23	-	-

¹ Le pH du sol optimal pour la culture du rutabaga est de 6,5 au Québec (CRAAQ, 2010).

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

³ Nitrate mesuré au semis dans la couche de sol 0-30 cm. nd : non disponible.

⁴ G1 : sols à texture fine; G2 : sols à texture moyenne; G3 : sols à texture grossière.

2.2 Détermination des doses agronomiques optimales

2.2.1 Recherche d'indicateurs de fertilité du sol

Plusieurs variables reconnues dans la littérature scientifique peuvent influencer la réponse des cultures à la fertilisation azotée et ainsi devenir des indicateurs de prédiction de la fertilité des sols. Le potentiel de plusieurs indicateurs à expliquer la réponse du rutabaga à la fertilisation azotée a donc été testé avec le test de Cate-

Nelson (Cate et Nelson, 1971) : la teneur en nitrate du sol (N-NO₃; 0-30 cm) 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 de sols G1, G2 et G3. Pour alléger la présentation des résultats, seuls les tests dont la valeur de *P* est inférieure à 0,12 sont présentés (Tableau 11). Les partitions ont été sélectionnés afin de maximiser leur sensibilité, leur spécificité et leur précision. Les valeurs critiques obtenues sont ensuite utilisées pour les analyses de variance en tant que seuils de réponse agronomique.

En raison de l'effet de la fertilisation en N sur les calibres des rutabagas obtenus à la récolte (voir section 2.2.3.1) et l'importance des calibres dans la détermination du marché d'écoulement du produit, la détermination des seuils de réponse a été réalisée en deux temps, soit en (i) considérant l'ensemble du rendement vendable (diamètre > 5 cm) ou (ii) en considérant uniquement le rendement des calibres 1 et 2, soit les rutabagas de diamètre entre 5 et 14 cm.

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 11. Une bonne précision (64 à 84 %) a été obtenue en général pour les indicateurs considérés. Les teneurs en MO_{PAF} et en N-NO₃ du sol se sont avérées être de bons indicateurs potentiels de prédiction de la fertilité. La culture, ayant présenté une forte réponse à la fertilisation dans la grande majorité des essais, les seuils de rendement relatif correspondant aux seuils de MO sont généralement inférieur à 70 % (49 - 70 %). Ainsi, ces seuils consistent davantage à différencier des groupes de réponse à la fertilisation d'ampleur différente plutôt que des sols qui répondent de ceux qui ne répondent pas à la fertilisation. De très bonnes précisions ont été obtenu pour ces partitions (Tableau 11), traduisant que celles-ci reflètent bien le patron d'évolution de la réponse à la fertilisation azotée de la culture. Pour la teneur en N-NO₃ du sol, des seuils de rendement relatif plus élevés (71 % - 89 %) ont été obtenus.

Tableau 11. Valeurs critiques des indicateurs de sol significatifs selon les tests de Cate-Nelson pour les essais N de rutabaga

Variable de réponse	Indicateur de sol	Groupes de textures ⁶	n ⁷	Valeur critique	RRel ¹ (%)	Sensitivité	Spécificité	Précision n	<i>P</i>
RRel _{vendable} ^{1,2}	N-NO ₃ au semis (ppm ; 0-30 cm) ⁴	G1, G2, G3	50	11,3	71	0,62	0,72	68	0,021
		G1	23	10,8	89	1,00	0,70	74	0,047
		G2	17	13,0	74	0,57	1,00	82	0,015
		G2, G3	27	13,0	74	0,45	1,00	78	0,006
	Matière organique (%) ⁵	G1, G2, G3	50	3,3	49	0,85	0,78	84	< 0,001
		G1	23	3,2	49	0,82	0,67	78	0,045
G2, G3		27	3,2	60	0,95	0,43	81	0,042	
RRel _{5-14 cm} ^{1,3}	Matière organique (%) ⁵	G1, G2, G3	50	3,3	70	0,85	0,39	64	0,062
		G1	23	3,2	49	0,78	0,60	74	0,142
		G2, G3	27	3,2	63	0,95	0,38	78	0,065

¹ RRel : Rendement relatif (100 × rendement du témoin/rendement maximum par bloc).

² Rendement vendable: rendement en rutabagas dont le diamètre est supérieur à 5 cm.

³ Rendement 5-14 cm : rendement en rutabagas ayant eu un diamètre entre 5 et 14 cm.

⁴ Le nitrate au semis a été déterminée par la méthode au KCl 2M.

⁵ La matière organique a été déterminée par la méthode par perte au feu.

⁶ G1 : sols à texture fine ; G2 : sols à texture moyenne ; G3 : sols à texture grossière.

⁷ n : nombre d'observations.

2.2.2 Effet de la dose d'azote sur le rendement

Les analyses de variance (ANOVA) de l'effet de la fertilisation sur la productivité ont été effectuées en utilisant les rapports de rendements (ROM) plutôt que les rendements absolus (section 1.8.2). 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. Des comparaisons multiples des moyennes permettent de sélectionner la dose agronomique optimale d'azote. De plus, en absence de différences significatives entre les traitements, les intervalles de confiance à 90 % permettent de déterminer si le rendement obtenu pour un traitement donné est numériquement différent de celui du témoin.

Pour les deux variables de réponse, en premier lieu, une ANOVA a été effectuée sans indicateur de classe de fertilité en considérant l'ensemble des observations. En second lieu, les ANOVA ont été effectuées à l'intérieur des groupes de textures (données non présentées). Enfin, lorsque nécessaire, pour les sols de groupe de textures G1 et G2-G3 respectivement, des ANOVA ont été effectuées de part et d'autre d'un seuil de matières organiques significatif déterminé par le test de Cate-Nelson. Seuls les résultats des ANOVA permettant l'interprétation agronomique de la réponse de la culture à l'engrais sont présentés dans ce rapport.

2.2.2.1 Rendement vendable

Les résultats des ANOVA sur le rendement vendable sont présentés à la Figure 5. Les analyses sur cette variable visent spécifiquement les entreprises qui, en plus d'avoir un marché pour les rutabagas de calibres 1 (petits) et 2 (moyens), ont également un marché d'écoulement pour les rutabagas de calibre 3 (gros; diamètre > 14 cm).

Les résultats du modèle sans indicateur (A) ont montré un effet très significatif ($P = 0,002$; $N = 236$) de la fertilisation azotée sur les ROM. La comparaison multiple des moyennes des traitements indique que la dose optimale a été de 90 kg N/ha, menant à des gains de rendement moyens très élevés de 47 % (34 à 61 %).

Les analyses combinant les seuils de MO avec les groupes de textures (G1 vs. G2-G3) ont permis de préciser la réponse observée à la fertilisation azotée (modèles B et C), bien que dans les deux groupes de textures, le seuil était de 3,2 %. Ainsi, dans le groupe de textures G1, la différence entre les traitements n'est pas ressortie significative, de part et d'autre du seuil de MO, suggérant que les plus petites doses testées, soient de 60 et 30 kg N/ha respectivement en dessous et au-dessus du seuil, ont été suffisantes pour l'atteinte des meilleurs gains de rendements dans ces catégories de sols. Cependant, des gains de rendement substantiels ont été mesurés dans les traitements fertilisés en comparaison au traitement témoin et cela davantage en dessous (jusqu'à 90 % en moyenne) qu'au-dessus (jusqu'à 48 % en moyenne; Figure 5, Modèle B) du seuil. En dessous du seuil de réponse, malgré l'absence de différence significative entre les traitements, un effet de pente (non-plafonnement des gains) est encore perceptible. Les doses de 60 et 30 kg N/ha sont retenues comme ayant été optimales en dessous et au-dessus du seuil, respectivement puisque dans les sols de moins de 3,2 % de MO, la dose minimale de N testée a été de 60 kg/ha (Tableau 1) en raison de la plus forte capacité de réponse attendue (section 1.4.2.1).

Dans les groupes de textures G2-G3 (modèle C), un effet significatif de la fertilisation azotée a été mesurée tant en deçà ($P = 0,088$) qu'au-dessus du seuil de 3,2 % de MO ($P = 0,003$). Sous le seuil agronomique, la dose optimale de 90 kg N/ha a été identifiée, pour des gains moyens de rendement de 89 %. Au-delà du seuil, la dose optimale est diminuée à 60 kg N/ha et les gains de rendements moyens, encore consistants, s'abaissent à 26 %. Dans une étude sur des sols loameux et sableux riches en MO (respectivement 5 et 8 %), Thomsen et al. (2017) ont aussi observé des gains de rendement importants, de l'ordre de 70 à 100 % par rapport au témoin. La dose optimale a été similaire, soit de 80 kg N/ha. De même, Reith et Inkson (1963) ont trouvé des doses optimales de 83 à 85 kg N/ha (74 à 76 lb/ac). Cela dit, les doses optimales de N obtenues dans cette étude sont généralement plus faibles que celles rapportées dans la littérature scientifique, soit entre 90 et 120 kg N/ha (Cutcliffe et Munro, 1973; Cutcliffe et Sanderson, 1989), voire de 224 à 336 kg/ha (MacLeod et al., 1971).

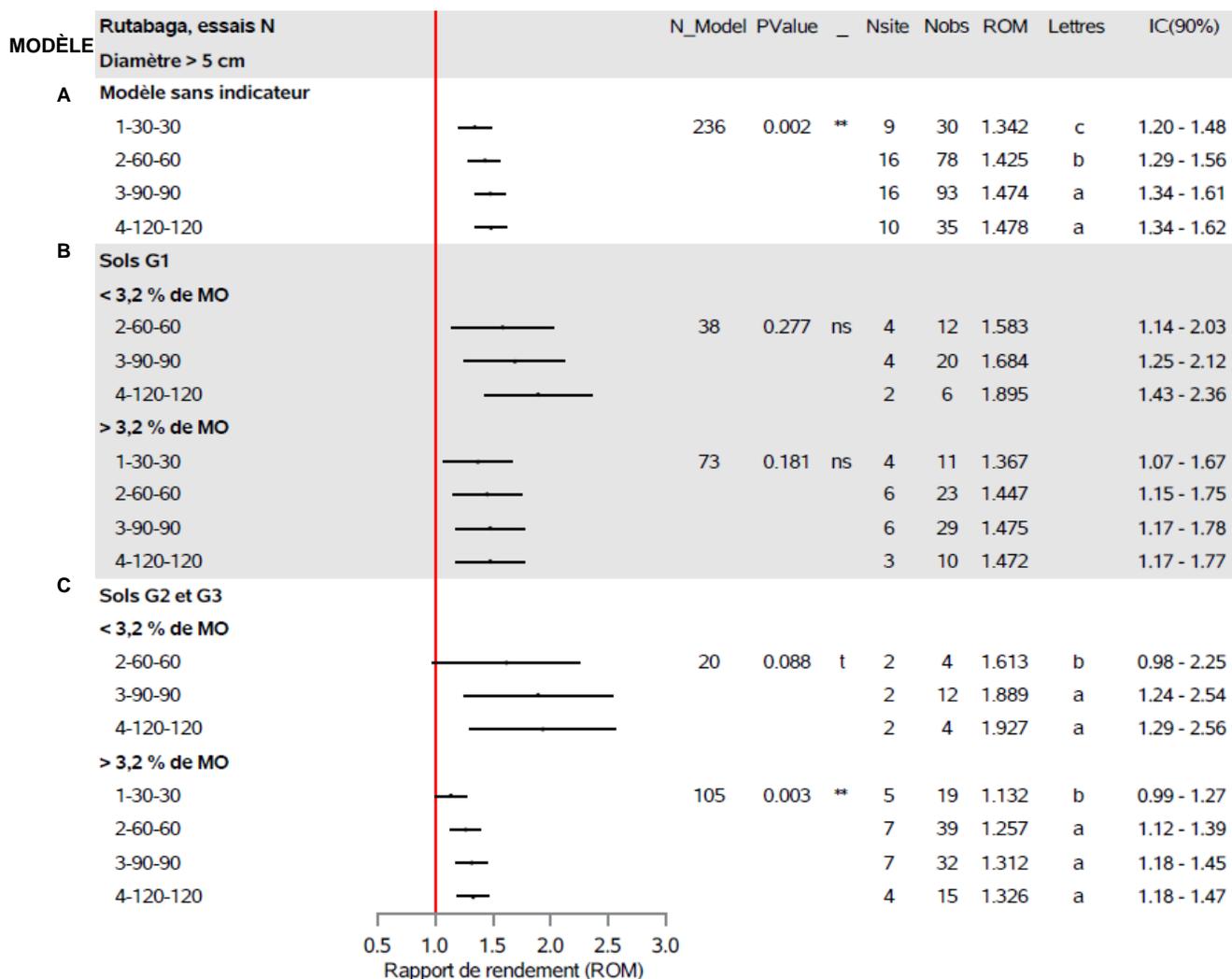


Figure 5. Résultats des analyses de variance sur la réponse du rutabaga (diamètre > 5 cm) aux doses croissantes d'azote. G1 : sols à texture fine. G2, sols à texture moyenne. G3 : sols à texture grossière. MO : Matière organique déterminée par la méthode par perte au feu. N_model : nombre d'observations 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 de $P < 0,12$.

2.2.2.2 Rendement vendable de calibres 1 et 2

Les résultats des ANOVA des essais de fertilisation azotée sur le rendement vendable en rutabagas de diamètre entre 5 à 14 cm sont présentés à la Figure 6. Tel qu'observé pour le rendement vendable total, les résultats des ANOVA ont indiqué que toutes textures confondues, la fertilisation azotée a eu un effet très significatif ($P = 0,002$; $N = 236$) sur les ROM (Modèle A). La dose agronomique optimale a toutefois été plus faible que lorsque l'ensemble du rendement vendable est considéré, soit 60 kg N/ha. Les gains de rendement moyens sont également inférieurs mais quand même importants, variant entre 22 à 46 % pour une moyenne de 34 %. Ces résultats indiquent qu'au-delà de 60 kg/ha, l'apport supplémentaire de N n'a pas augmenté le rendement en rutabagas de calibres petits et moyens et donc aura un impact principalement sur le rendement en rutabagas de diamètres supérieurs à 14 cm.

Les analyses combinant les seuils de MO avec les groupes de textures (G1 vs. G2-G3) ont permis de préciser la réponse observée à la fertilisation azotée (modèles B et C). À noter que le seuil de MO est demeuré le même (3,2 %) pour les G1, mais qu'aucun seuil n'a été détecté pour ceux G2-G3 qui présentaient une réponse similaire sur toute la plage de valeur de MO testée. Ainsi, dans les sols du groupe de textures G1, un patron de réponse similaire à celui du rendement vendable a été obtenu, c'est-à-dire qu'aucune différence statistiquement significative n'a été observée entre les traitements de part et d'autre du seuil de 3,2 % de MO, malgré des gains de rendement élevés et un certain effet de pente (non-plafonnement des gains) sous le seuil agronomique. De plus, les doses optimales de N sont les mêmes que pour le rendement vendable totale, soit de 60 et 30 kg N/ha, respectivement, en deçà et au-delà du seuil. Dans les sols de textures moyennes à grossières (G2-G3), de même que pour le rendement vendable total, la fertilisation azotée a eu un effet significatif sur les ROM sur toute la plage de valeurs de sol, mais tel que mentionné précédemment, puisque cet effet était similaire quel que soit le taux de MO du sol, une dose optimale unique de 60 kg N/ha a été obtenue. L'application de cette dose a permis l'obtention d'un gain de rendement moyen de 26 % par rapport au témoin sans engrais, avec une variation de 11 à 42 %. Ces observations confirment les résultats du modèle A selon lesquels un apport de N supérieur à 60 kg/ha pourrait favoriser l'obtention de rutabagas de diamètre supérieur à 14 cm, au détriment de ceux de diamètre entre 5 et 14 cm.

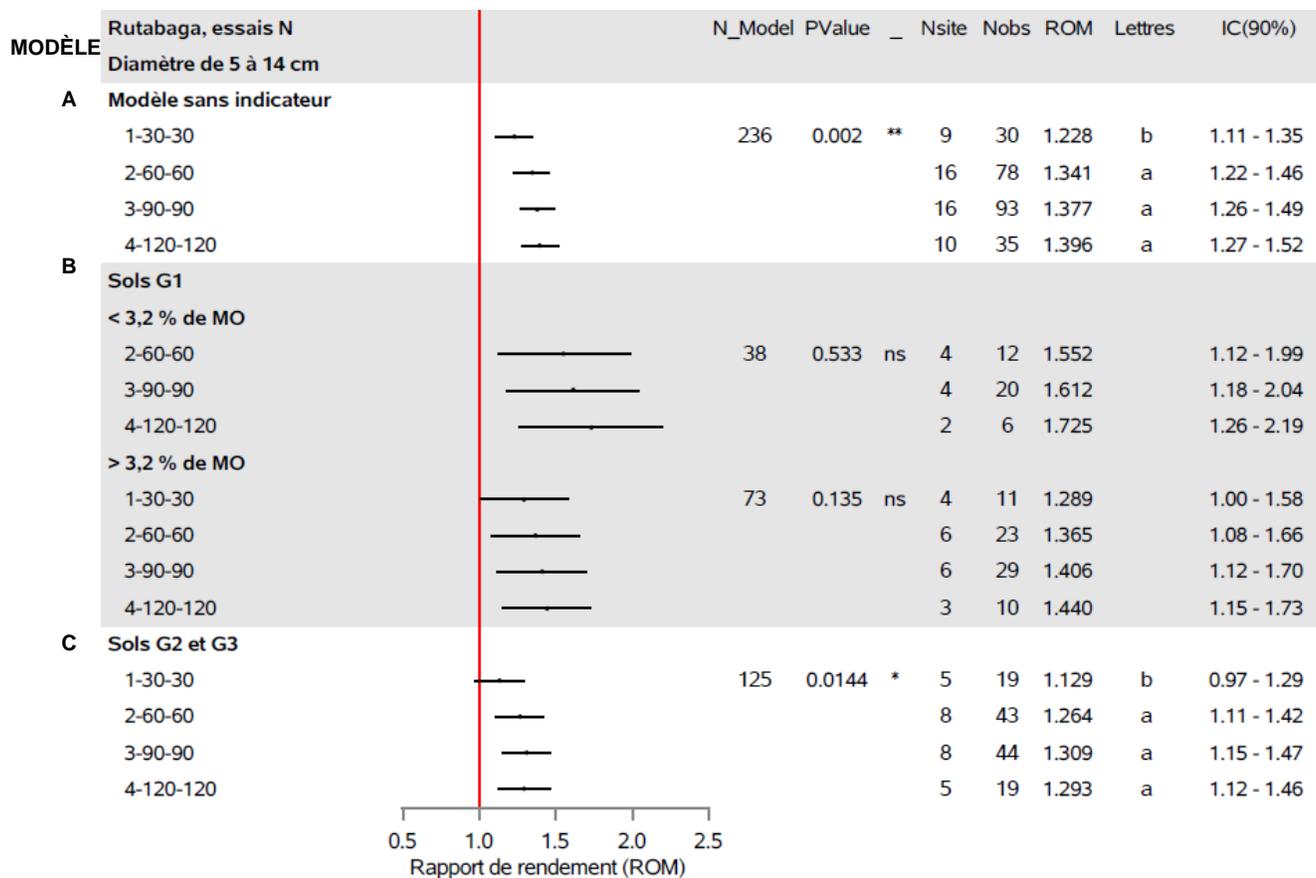


Figure 6. Résultats des analyses de variance sur la réponse du rutabaga (diamètre entre 5 et 14 cm) aux doses croissantes d'azote. G1 : sols à texture fine. G2 : sols à texture moyenne. G3 : sols à texture grossière. MO : Matière organique déterminée par la méthode par perte au feu. N_model : nombre 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 de $P < 0,12$.

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

2.2.3.1 Calibres à la récolte

Comme la taille des rutabagas fait partie des exigences liées au marché et pouvant influencer les prix de vente, il est primordial d'évaluer l'effet de la fertilisation azotée sur les calibres obtenus, soit sur les calibres 1 et 2 qui sont actuellement préconisés en contexte de production québécoise (Tableau 8). Les ANOVA ont été effectuées en considérant la proportion du rendement qu'ont représentés les rutabagas de calibres 1 et 2 (diamètre compris entre 5 et 14 cm), par rapport à l'ensemble du rendement vendable (> 5 cm).

Dans les essais N, une majorité de la récolte était de calibre 2 (48 à 78 %), suivie du calibre 1 (13 à 48 %). La proportion du rendement vendable qu'a représenté les rutabagas de calibre 3 a été assez faible, soit de 2 à 15 %. Cependant, la proportion de rutabagas de ce calibre (> 14 cm) a augmenté significativement avec la hausse des doses de N testées, indépendamment des groupes de textures de sol (G1, $P = 0,010$; G2-G3, $P < 0,001$). Les résultats des analyses sur la prépondérance des calibres (5 à 14 cm vs. plus de 14 cm) en fonction des groupes de textures et des seuils de MO sont présentés à la Figure 7.

Dans les sols du groupe G1 de moins de 3,2 % de MO, seule l'application de 120 kg N/ha a diminué statistiquement la proportion des rutabagas entre 5 et 14 cm sur l'ensemble du rendement vendable ($P = 0,033$) par rapport aux autres doses. Bien que non-statistiquement significative, une légère diminution (-1,9 %) de la proportion de ces derniers est observable avec l'application de 60 kg N/ha par rapport au témoin sans engrais. Toutefois, cette diminution est négligeable en comparaison au gain de rendement de 55 % obtenu suivant l'apport de 60 kg N/ha (section 1.8.2). Ces observations confirment donc que la dose de 60 kg/ha recommandée ne fera pas augmenter le rendement des rutabagas de calibre 3 au détriment de ceux de calibres 1 et 2. Ces résultats traduisent également que lorsque jugé nécessaire par l'agronome, l'apport de 90 N pourrait être envisagé sans constituer un risque accru d'augmentation de la proportion des rutabagas ayant un calibre plus grand que 14 cm, bien que ces 30 N supplémentaires pourraient ne pas permettre l'obtention d'un rendement statistiquement supérieur à celui qu'on aurait obtenu avec une dose de 60 kg N/ha (section 1.8.2). Au-dessus du seuil de 3,2 %, la fertilisation azotée n'a pas eu d'incidence statistiquement significatif sur les proportions des calibres de rutabagas récoltés.

Dans les sols des groupes de textures G2 et G3 de moins de 3,2 % de MO, la proportion des rutabagas entre 5 et 14 cm sur l'ensemble du rendement vendable a diminué statistiquement à partir de l'apport de 90 kg N/ha ($P = 0,001$). Ces résultats sont cohérents avec les observations de la section 1.8.2, selon lesquelles la dose de N menant au meilleur rendement des rutabagas entre 5 et 14 cm était celle de 60 kg/ha. Avec celle-ci, 95 % du rendement vendable a été en moyenne constitué de rutabagas de diamètres de 5 à 14 cm. En revanche, avec l'application de 90 kg N/ha, cette proportion a diminué à 78 %. Au-delà de 3,2 % de MO, la fertilisation azotée tendait également à influencer la proportion des rendements occupés par les calibres 1 et 2 ($P = 0,061$). Le test de comparaison des moyennes a démontré une diminution légère et graduelle de cette proportion, dans laquelle l'apport de la dose de 60 kg N/ha n'a pas affecté la prépondérance des rutabagas de calibres 1 et 2.

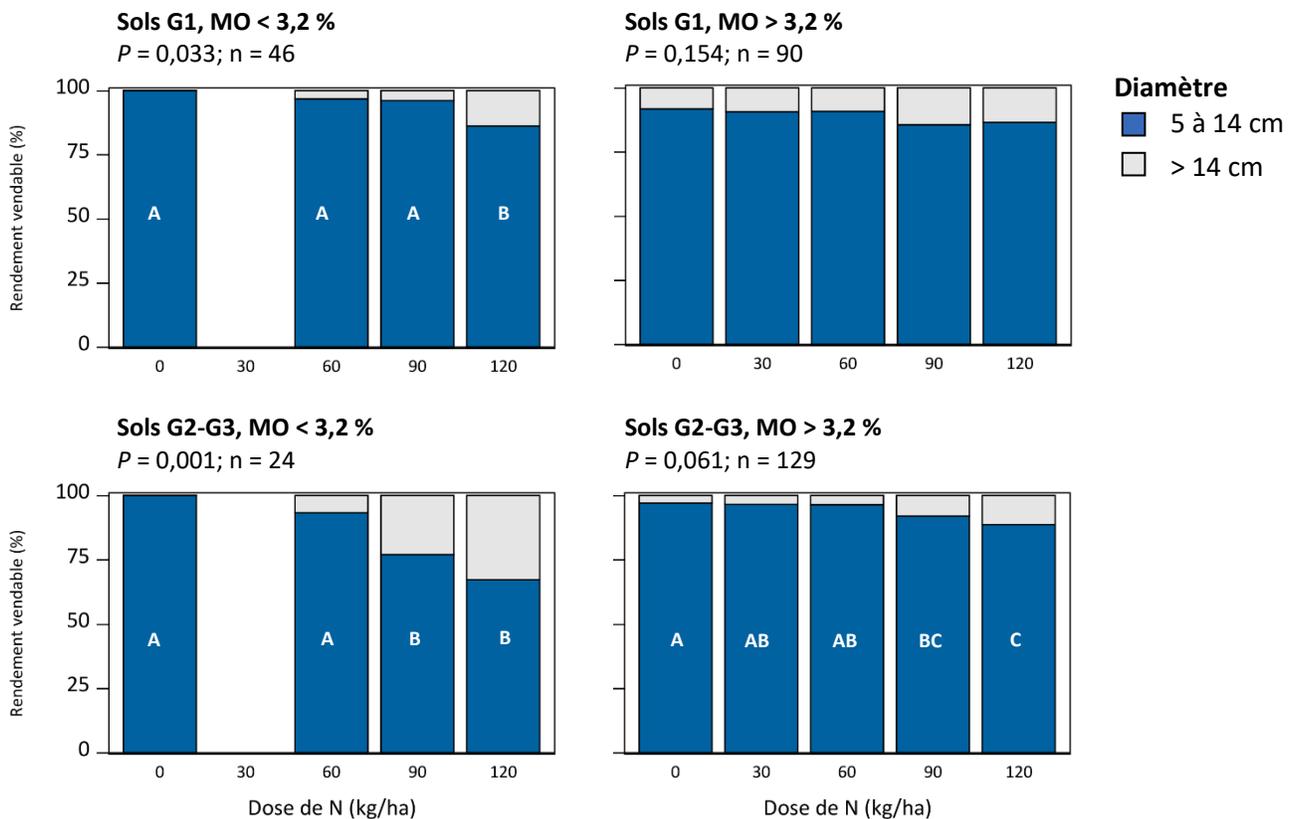


Figure 7. Effet de la fertilisation azotée sur le calibre des rutabagas à la récolte. Les lettres indiquent les différences significatives (LSD, $P < 0,12$) entre les proportions de rendement en rutabagas de calibres 1 et 2 (diamètre compris entre 5 et 14 cm) selon les différents traitements. Calibre 1 : diamètre de 5 à 9 cm. Calibre 2 : diamètre de 9 à 14 cm. Calibre 3 : diamètre > 14 cm. G1 : sols à texture fine. G2 : sols à texture moyenne. G3 : sols à texture grossière. MO : Matière organique déterminée par la méthode par perte au feu. n : nombre d'observations.

2.2.3.2 État du feuillage du rutabaga à la récolte

Robustesse de l'attache du feuillage

L'état du feuillage est d'importance afin d'assurer le bon déroulement de la récolte mécanique dans le cas où celle-ci s'effectue en tirant sur le plant. Comme l'azote contribue en grande partie à la croissance et au développement de la plante, l'étude des différents niveaux de fertilisation sur la robustesse de l'attache des feuilles est d'intérêt en vue d'assurer un bon déroulement de la récolte. Cet aspect a donc été évalué au moment de la récolte par la vérification systématique d'un nombre donné de plants choisis aléatoirement dans chaque unité expérimentale. Cinq niveaux de robustesse ont été attribués, pour des cotes allant de 1 (très bonne attache) à 5 (attache insuffisante) (Tableau 9). Une robustesse de l'attache entre 1 et 3 étant suffisant pour la récolte mécanique. Les résultats de cette évaluation sont illustrés à la Figure 8.

Globalement, indépendamment de la dose de N appliquée et de la texture des sols, l'attache du feuillage a été très bonne (cote 1) dans 45 % des parcelles, bonne (cote 2) dans 38 % des parcelles et moyenne (cote 3) dans 15 % des parcelles. En d'autres termes, seulement 2 % des parcelles ont montré une attache insuffisante (cote

4) pour la récolte mécanique et celles-ci étaient toutes en sols G2-G3. Ainsi, l'attache du feuillage a été généralement meilleure dans les sols G1 en comparaison des sols G2-G3, de même que dans les sols contenant davantage de MO (au-delà du seuil de 3,2 %) (Figure 8). Cette meilleure robustesse de l'attache du feuillage observée dans les sols G1, généralement plus riches en K que ceux G2-G3, coïncide également avec le fait qu'elle a été meilleure au-dessus du seuil de 155,5 ppm de K_{M3} dans les essais de fertilisation en K (voir section 4.2.4.2).

Plus spécifiquement, dans les sols G1, l'effet de la fertilisation azotée sur la robustesse de l'attache du feuillage est significatif en dessous ($P = 0,086$, t) et au-dessus ($P = 0,027$) du seuil de 3,2 % de MO. Les doses de 120 kg N/ha et de 60 kg N/ha ont permis d'obtenir la meilleure attache du feuillage, respectivement, en dessous et au-dessus du seuil. Cela dit, il ressort que toutes les parcelles ont eu une robustesse de l'attache du feuillage allant de moyenne (cote 3) à très bonne (cote 1). Les rutabagas ayant eu une « très bonne » attache ont largement prédominé dans les sols ayant plus de 3,2 % de MO, tandis que la « bonne attache » a été la plus retrouvée en dessous du seuil. En effet, dans les sols G1 ayant plus de 3,2 % de MO, en moyenne 76 % des parcelles ont eu une très bonne attache du feuillage (cote 1), contre seulement 20 % dans en dessous du seuil.

Dans les sols G2 et G3 ayant moins de 3,2 % de MO, aucun effet significatif de la fertilisation en N n'a été observé sur la robustesse de l'attache du feuillage du rutabaga ($P = 0,64$). L'attache du feuillage a été jugée suffisante pour la récolte mécanique (cotes de 1 à 3). Au-delà du seuil de 3,2 % de MO, les cotes ont varié entre 1 et 4, la cote 4 étant insuffisante pour la récolte mécanique ($P = 0,010$). Pour ces sols, la dose de 120 kg N/ha a permis d'avoir une meilleure attache du feuillage à la tige. Une faible occurrence des cas d'insuffisance de la robustesse d'attache du feuillage est toutefois observée et toutes les parcelles ayant obtenues la cote 4 provenaient d'un même site du groupe de textures G2, pour les doses allant de 0 à 60 kg N/ha, ce qui pourrait également traduire un effet de site.

Finalement, en raison de la très faible occurrence ou de l'absence de parcelle présentant des signes d'insuffisance quant à la robustesse de l'attache du feuillage, aucun ajustement des VSRF n'a été effectué sur la base de ce critère dans les deux grands groupes de texture de sols. De plus, dans les sols G2-G3, les doses optimales de N ont varié de 60 à 90 kg/ha, ce qui est sécuritaire considérant le très faible pourcentage de cas d'insuffisance relevé dans ce groupe de sols suivant l'application la dose de 60 kg/ha.

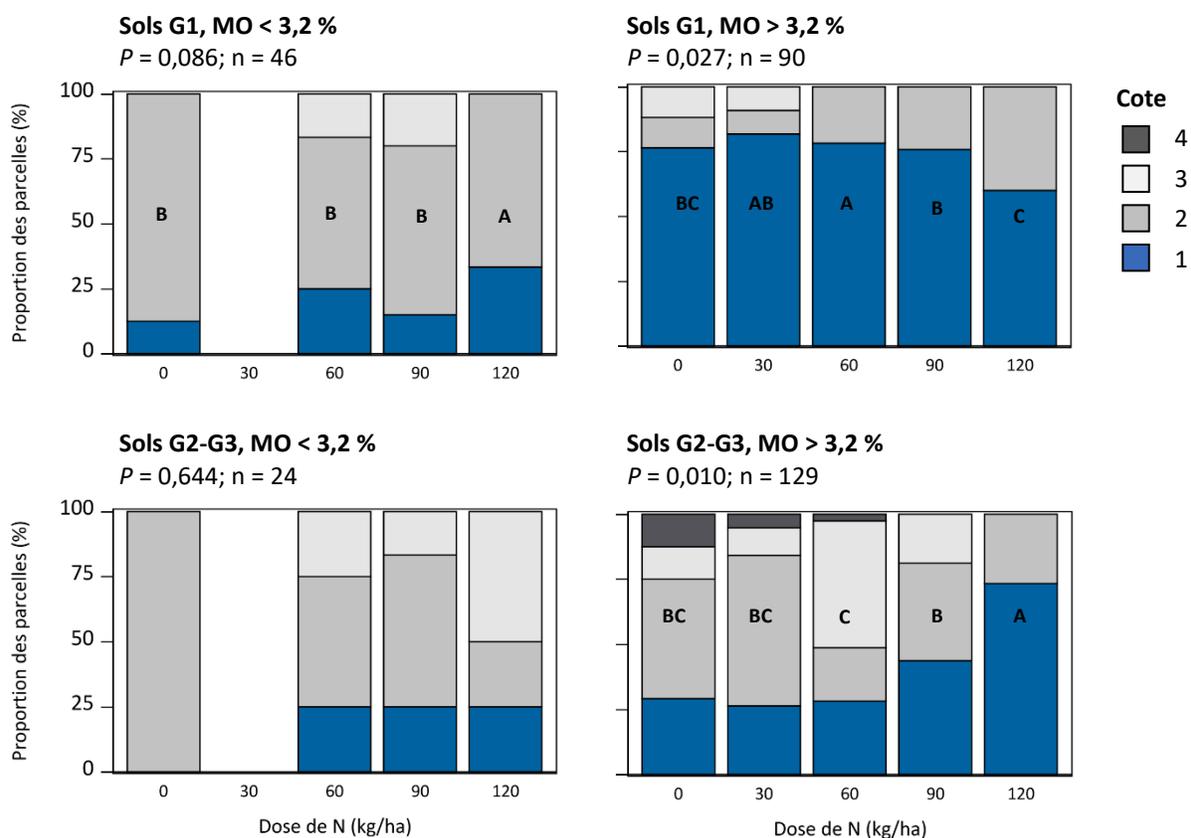


Figure 8. Évaluation de la robustesse de l'attache du feuillage selon les doses d'azote appliquées. Les lettres indiquent les différences significatives (LSD, $P < 0,12$) entre les proportions de rendement en rutabagas de calibres 1 et 2 (diamètre compris entre 5 et 14 cm) selon les différents traitements. n = nombre d'observations. 1 : très bonne attache. 2 : attache très bonne à moyenne. 3 : attache moyenne. 4 : attache moyenne à insuffisante. 5 : attache insuffisante. G1 : sols à texture fine. G2 : sols à texture moyenne. G3 : sols à texture grossière. MO : Matière organique déterminée par la méthode par perte au feu.

Développement du feuillage

L'effet de la fertilisation azotée sur le développement du feuillage du rutabaga a été évalué au moment de la récolte par la vérification systématique d'un échantillon de plants choisis aléatoirement dans chaque unité expérimentale. Cinq niveaux de développement du feuillage ont été attribués, pour des cotes allant de 1 (feuillage très dense ou excessif) à 5 (feuillage insuffisamment dense) (Tableau 9). Il est important de noter que l'évaluation du développement du feuillage a été effectué en se basant exclusivement sur les besoins pour l'arrachage mécanique des rutabagas et excluent les besoins physiologiques de la plante telle que la photosynthèse. Par exemple, les impacts négatifs d'un feuillage excessif n'ont pas été tenus en compte dans le cadre de cette étude. Or, un développement excessif du feuillage n'est pas souhaitable dans la culture du rutabaga en vue de prévenir les maladies foliaires, l'obtention de trop gros calibre (diamètre > 14 cm) et les risques de fissures des collets. De même, un développement insuffisant du feuillage (cotes 4 et 5) va causer, entre autres, des problèmes de récupération des rutabagas lors de la récolte, causant des pertes de rendement. Les résultats de cette évaluation sont présentés à la Figure 9.

De manière générale, le feuillage a été moyennement dense ou normal à dense dans la grande majorité des parcelles (87 %). Tel qu'observé pour la robustesse de l'attache du feuillage à la tige (section précédente), le développement du feuillage est généralement meilleur dans les sols G1 en comparaison des sols G2-G3, de même que dans les sols mieux pourvus en MO (Figure 9). Les cas d'insuffisance au niveau du développement du feuillage sont survenus uniquement dans les sols G2-G3, mais dans très peu de parcelles. L'obtention d'un feuillage très dense a été faible dans les deux catégories de sol. Contrairement à ce qui a été attendu, aucune incidence significative de la fertilisation azotée sur le développement du feuillage n'a été observée sous le seuil de 3,2 % de MO tant dans les sols G1 ($P = 0,211$; $n = 46$) que dans ceux G2-G3 ($P = 0,405$; $n = 24$). À l'inverse, dans les deux groupes de textures, la fertilisation azotée a significativement favorisé le développement du feuillage du rutabaga dans les sols ayant plus de 3,2 % de MO (Figure 9).

Dans les sols G1, la totalité des parcelles ont eu un développement du feuillage allant de normal (cote 3) à dense (cote 2), ce qui est jugé adéquat pour éviter l'apparition de problèmes liés à un feuillage trop dense (cote 1). La cote 2 a prédominé (54 % des parcelles) dans les sols ayant plus de 3,2 % de MO, tandis que la cote 3 a prédominé (50 % des parcelles) en dessous du seuil. Dans les sols G2-G3 ayant plus de 3,2 % de MO, les cotes ont varié entre 1 à 5. Toutes doses confondues, 12 % et 0,8 % des parcelles ont eu une cote de 4 et de 5, respectivement, avec une occurrence et une intensité décroissante à mesure que les doses de N augmentaient (Figure 9). La dose optimale est de 120 kg N/ha dans les deux groupes de textures, laquelle est plus élevée que les recommandations en N de la présente étude, allant de 30 à 60 kg N/ha dans les sols G1 et de 60 à 90 kg N/ha dans ceux G2-G3 (section 2.2.2). Toutefois, la dose optimale semble avoir été influencée par l'obtention d'un plus grand pourcentage de plants ayant un feuillage trop dense (cote 1), ce qui est non idéal en contexte de production. En raison de la faible occurrence de l'insuffisance du feuillage et les problèmes potentiels que pourraient entraîner un développement excessif du feuillage chez le rutabaga, aucun ajustement à la hausse des doses optimales déterminées en fonction de la productivité des sites n'a été effectué sur la base de ce critère dans les deux grands groupes de texture de sols.

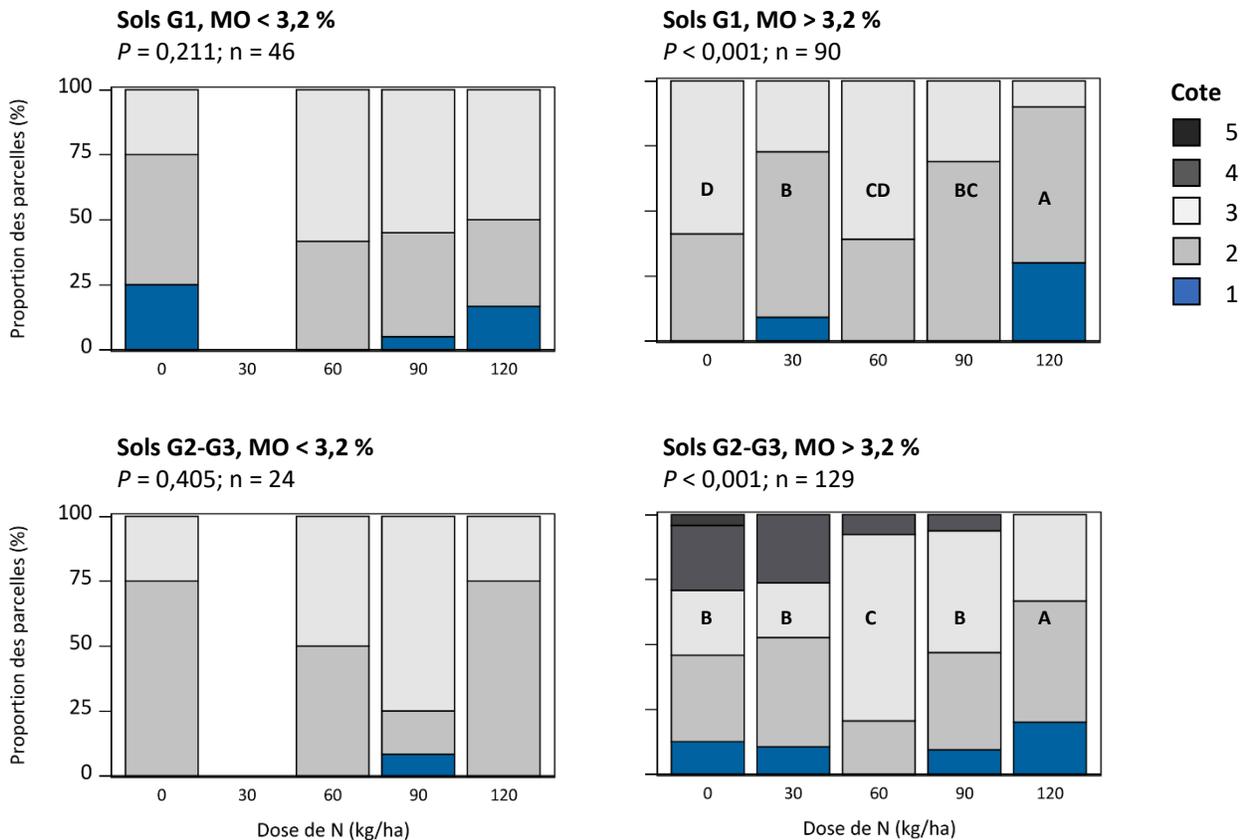


Figure 9. Évaluation du développement du feuillage du selon les doses d'azote appliquées. Les lettres indiquent les différences significatives (LSD, $P < 0,12$) entre les proportions de rendement en rutabagas de calibres 1 et 2 (diamètre compris entre 5 et 14 cm) selon les différents traitements. n: nombre d'observations. 1 : feuillage très dense ou excessif. 2 : feuillage dense ou supérieur au besoin pour l'arrachage mécanique. 3 : feuillage moyen ou suffisant. 4 : feuillage moyen à insuffisamment dense. 5 : feuillage insuffisamment dense. G1 : sols à texture fine. G2 : sols à texture moyenne. G3 : sols à texture grossière. MO : Matière organique déterminée par la méthode par perte au feu.

2.2.3.3 Qualité des rutabagas

Cœur brun

Le cœur brun est une affection touchant plusieurs légumes racines. Également appelé cœur aqueux, ce problème touche la racine du rutabaga sous forme de zones allant du brun clair au brun foncé (AAC, 2018). Selon les données de la littérature scientifique, l'apparition du cœur brun chez le rutabaga est généralement associée à une carence en bore (B) (AAC, 2018; Sanderson et al., 2002; Shelp et Shattuck, 1987). Selon Beauchamp et Hussain (1974), ce problème serait attendu lorsque la teneur en B dans les racines du rutabaga est inférieure à 18 ppm. Shelp et Shattuck (1987) n'ont pas observé de symptômes de carence en bore au-delà d'un seuil de 27 et 57 ppm, respectivement, dans les racines et les jeunes feuilles de rutabaga. Selon ces auteurs, des concentrations en B de 14 à 20 ppm dans les racines seraient associées à l'apparition du cœur brun de niveau modéré à léger. La variété cultivée, ainsi que d'autres facteurs influençant la disponibilité et l'absorption du B comme le pH, la pluviométrie, la teneur en K et en Ca auraient également un impact indirect sur l'apparition du

cœur brun chez le rutabaga (Beauchamp et Hussain, 1974; Sanderson et al., 2002). Dans le cadre des essais de fertilisation, pour les données validées, le B du sol extrait au Mehlich-3 a varié entre 0,31 et 2,18 ppm (soit entre 0,24 et 1,67 ppm de B extrait à l'eau chaude). Du bore a été apporté à certains sites selon la régie de culture du producteur (voir Tableau 2). Dans le cadre de cette étude, pour la biomasse récoltée (racines seulement), la concentration en B a été en quasi-totalité supérieure au seuil de 18 ppm rapporté par Beauchamp et Hussain (1974). En effet, seuls deux traitements à deux sites différents ont obtenu des valeurs de 15,5 et 17,4 ppm. Du reste, 90 % des observations ont été au-delà du seuil de 20 ppm et 56 % au-delà de 27 ppm. Des problèmes importants de cœurs bruns n'étaient donc pas attendus dans les essais.

Lors de la réalisation des essais, l'occurrence de cœur brun a été évaluée à la récolte et à l'entreposage afin de s'assurer que les VSRF proposées ne nuisent pas à la qualité des récoltes. À l'instar des analyses précédentes, l'effet de la fertilisation en N sur l'occurrence du cœur brun a été analysé selon le groupe de textures et selon la teneur en MO du sol. En raison de l'obtention de conclusions similaires, les données d'évaluation de l'occurrence du cœur brun à la récolte et suivant une période d'entreposage ont été combinées et analysées simultanément (Figure 10).

Dans les sols du groupe de textures G1, les résultats des analyses statistiques n'ont montré aucun effet de la fertilisation azotée sur l'apparition du cœur brun de part et d'autre du seuil de 3,2 % de MO (Figure 10). Indépendamment de la dose de N appliquée, l'occurrence du cœur brun a été plus fréquente dans les sols ayant plus de 3,2 % de MO, soit une moyenne de 34 vs. 10 % de rutabagas atteints. De plus, bien que non statistiquement significative, il semble y avoir une plus grande proportion de cœurs bruns dans les rutabagas des parcelles témoin (0N), en comparaison des parcelles fertilisées.

Dans les sols G2-G3, un effet significatif de la fertilisation azotée a été observé, tant dans les sols ayant une MO inférieure à 3,2 % ($P = 0,029$) que supérieure à 3,2 % ($P = 0,016$) (Figure 10). La dose de 90 kg N/ha a été la plus petite dose permettant de minimiser l'occurrence des cœurs bruns dans les deux classes de fertilité.

Finalement, dans les sols G1, aucun ajustement des VSRF n'est requis en fonction des résultats de ces analyses, en raison de l'absence d'effet significatif. Dans les sols G2-G3 ayant moins de 3,2 % de MO, les résultats concordent avec ceux des ANOVA selon lesquelles une dose de 90 kg N/ha est optimale. En revanche, au-dessus du seuil, la dose de 90 kg N/ha est supérieure à celle optimale de 60 kg N/ha requise pour optimiser les rendements. Toutefois, dans le cadre du présent document, les VSRF ne seront pas ajustées en fonction de l'occurrence du cœur brun. Se basant sur les résultats de cette étude, la réalisation d'essais expérimentaux supplémentaires combinant les effets de la fertilisation en N et en B s'avère nécessaire afin de préciser cet effet.

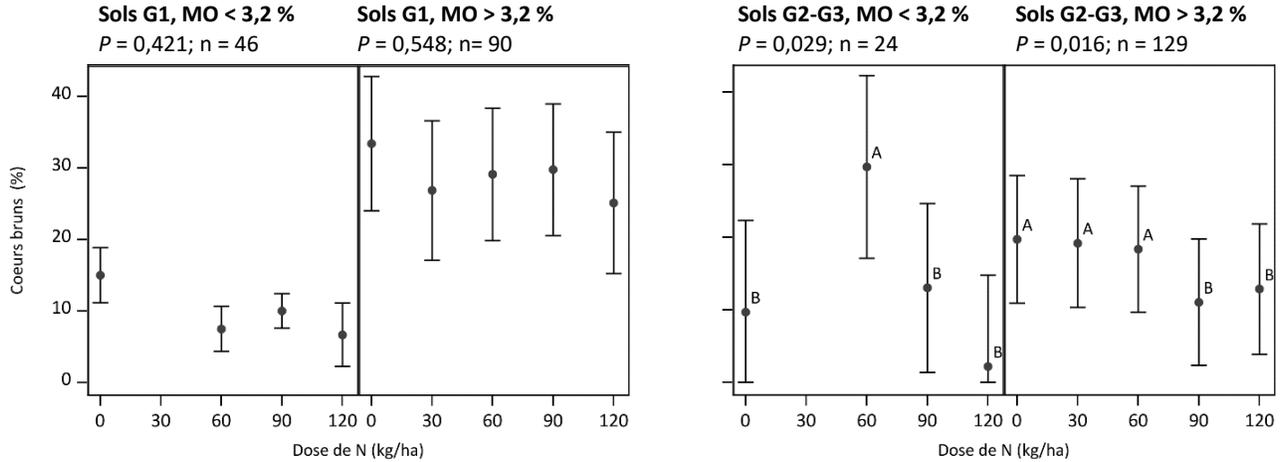


Figure 10. Effet de la dose de N sur l'apparition du cœur brun du rutabaga. L'évaluation de la qualité a été réalisée sur un échantillon de 5 ou 10 rutabagas à la récolte et à l'entreposage. Les moyennes présentées sont les valeurs estimées du modèle statistique. Les moyennes suivies d'une même lettre ne diffèrent pas statistiquement (LSD, $P < 0,12$). Les barres représentent les erreurs-types. MO : Matière organique déterminée par la méthode par perte au feu. G1 : sols à texture fine. G2 : sols à texture moyenne. G3 : sols à texture grossière. n : nombre d'observations.

Cœur creux

Le cœur creux est un défaut dû à une croissance trop rapide et irrégulière des légumes racines. En raison de l'effet marqué de la fertilisation azotée sur la croissance des rutabagas, l'occurrence de ce problème a été investiguée lors des essais à la récolte et après l'entreposage, sur les mêmes unités d'échantillonnage que pour l'analyse des cœurs bruns (voir section précédente). Les analyses ont été effectuées selon le groupe de textures et la teneur en MO du sol de façon à interpréter les résultats en relation avec ceux des ANOVA sur le rendement. Les données d'évaluation de l'occurrence du cœur creux à la récolte et à l'entreposage ont été analysées simultanément, en raison du fait que ce problème survient durant la croissance de la culture. De plus, des conclusions similaires ont été obtenues lors d'analyses séparées. Les résultats de cette évaluation sont présentés à la Figure 11.

De part et d'autre du seuil de MO de 3,2 %, les résultats des analyses n'ont montré aucun effet statistiquement significatif de la fertilisation azotée sur l'apparition du cœur creux chez le rutabaga tant dans les sols G1 que dans ceux G2-G3 (données non présentées). Par conséquent, les proportions de rutabagas atteints sont présentées toutes teneurs en MO et textures de sol confondues. De manière générale, l'apparition de cœurs creux est restée faible dans tous les sites d'essais N, avec des proportions qui ont varié de 2,0 à 3,4 % en moyenne, selon la dose. Étant donné l'absence d'effet de la dose de N sur l'occurrence des cœurs creux, aucun ajustement des doses de VSRF n'a été fait selon ce critère.

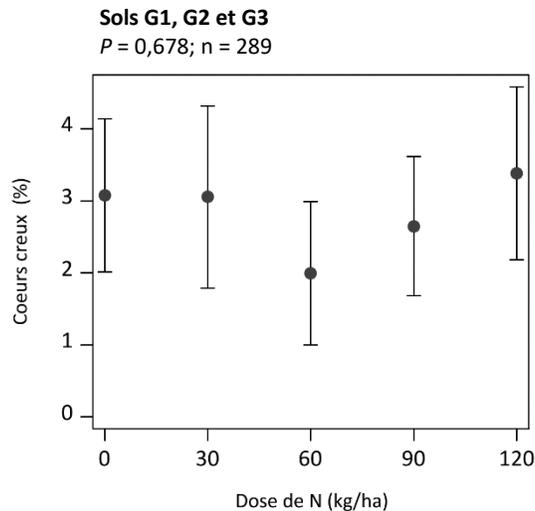


Figure 11. Effet de la dose de N sur l'apparition du cœur creux du rutabaga. L'évaluation de la qualité a été réalisée sur un échantillon de 5 ou 10 rutabagas. Les barres représentent les erreurs-types. G1 : sols à texture fine. G2 : sols à texture moyenne. G3 : sols à texture grossière. n : nombre d'observations.

2.2.3.4 Pertes à la récolte

Une fertilisation inadéquate peut mener à un déclassement excessif des légumes à la récolte, occasionnant des pertes économiques considérables. Ainsi, dans le cadre des essais, les rendements totaux et vendables ont été mesurés afin d'évaluer ces pertes. Les pourcentages de pertes à la récolte et les causes de celles-ci sont présentés respectivement aux Figures 12 et 13. À noter, les données de la Figure 13 sont présentées à des fins descriptives uniquement et n'ont pas fait l'objet d'analyses statistiques.

Dans les sols du groupe de textures G1, le taux de fertilisation azotée n'a eu aucun effet significatif sur les pertes de rendements mesurées à la récolte de part et d'autre du seuil de MO (Figure 12). Les causes principales de pertes étaient davantage reliées à des dommages non-récupérables d'insectes, lesquels ont représenté de 25 à 75 % des pertes de rendement en moyenne (Figure 13). Toutefois, le taux de MO semble avoir joué un rôle puisque les pertes ont été environ deux fois supérieures dans les sols de moins de 3,2 % de MO que dans les sols au-delà de cette teneur (11 à 12 % vs. 5 à 7 % de pertes). Dans les sols du groupe de textures G2-G3, l'impact de la fertilisation sur les pertes à la récolte a été différent qu'en sols G1. Sous le seuil de MO, les traitements d'azote n'ont pas affecté les pertes qui étaient faibles (0,6 à 2,6 %, $P = 0,386$) et dues à la présence de maladies. Dans les sols plus pourvus en MO (> 3,2 %), la plus forte dose testée (120 N) a entraîné une augmentation des rutabagas rejetés ($P < 0,001$), en comparaison aux autres doses, soit des pertes s'élevant à 8 %, en comparaison de 2 % en moyenne pour les autres traitements (Figure 12). Les causes des pertes de rendement ont été variées et des pertes de rendements dues à de l'éclatement racinaire ont été observées, particulièrement avec l'apport de 120 N (Figure 13). L'éclatement racinaire pourrait être attribuable à une surcroissance des racines due à un excès d'azote dans le sol. En contrepartie, tel qu'attendu, l'augmentation de la dose de N a entraîné une diminution des rutabagas rejetés en raison de leur trop petite taille.

Dans l'ensemble, l'apport d'une quantité de N allant de 30 à 90 kg/ha, tel que suggéré par les ANOVA sur le rendement (section 2.2.2), ne représente donc pas de risques de pertes de récolte. Par conséquent, aucun ajustement des doses de VSRF n'a été fait selon ce critère.

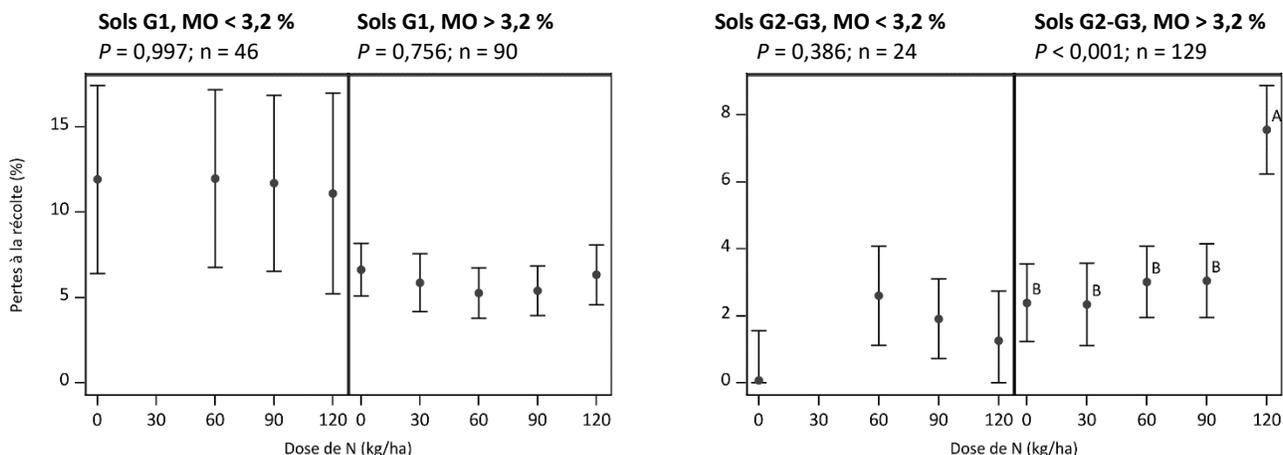


Figure 12. Pertes de rendements à la récolte en fonction de la dose d'azote appliquée, la teneur en matière organique et le groupe de textures du sol. Les moyennes présentées sont les valeurs estimées du modèle statistique. Les moyennes suivies d'une même lettre ne diffèrent pas statistiquement (LSD, $P < 0,12$). Les barres représentent les erreurs-types. MO : Matière organique déterminée par la méthode par perte au feu. G1 : sols à texture fine. G2 : sols à texture moyenne. G3 : sols à texture grossière. n : nombre d'observations.

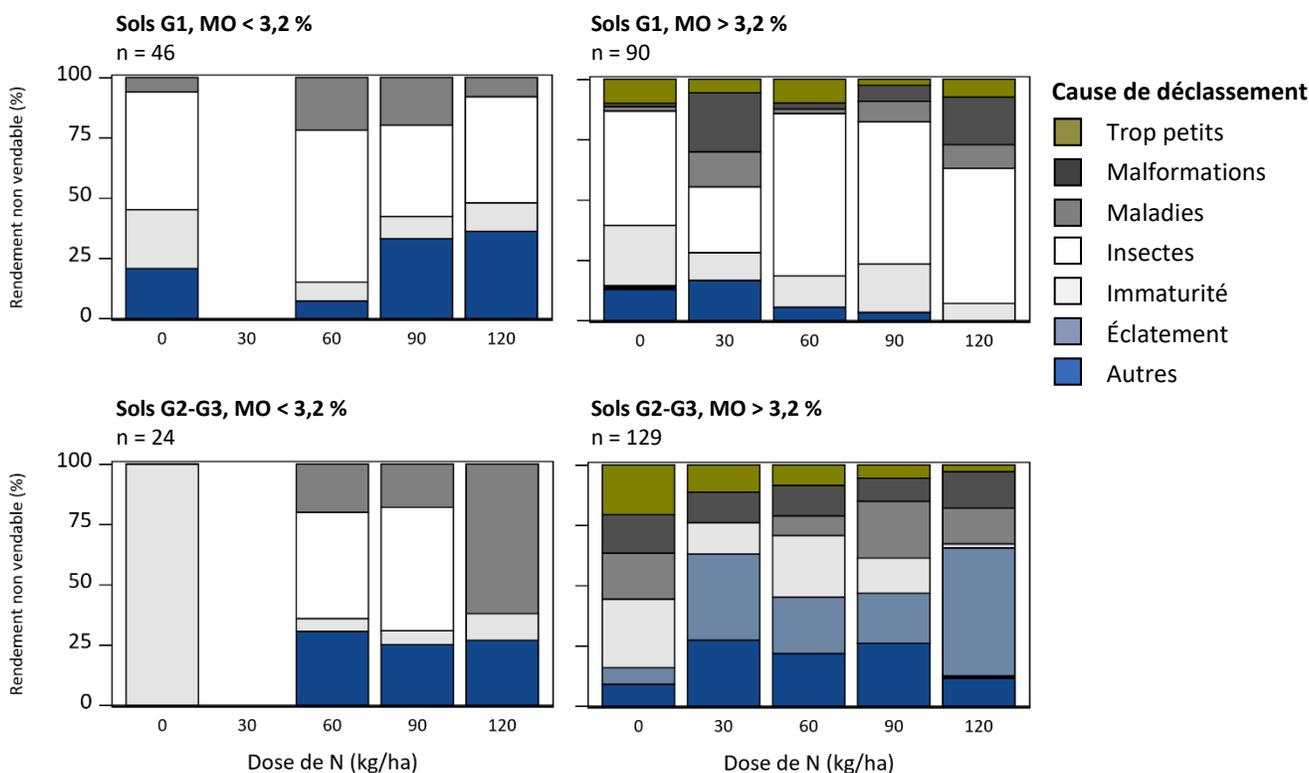


Figure 13. Répartition des pertes à la récolte en fonction des doses croissantes d'azote. n = nombre d'observations. G1 : sols à texture fine. G2 : sols à texture moyenne. G3 : sols à texture grossière. MO : Matière organique déterminée par la méthode par perte au feu.

2.2.3.5 Pertes suivant l'entreposage

Dans le cadre des essais, les rutabagas ont été entreposés suivant la récolte, lorsque possible, dans les entrepôts du producteur, sinon en s'assurant le plus possible d'être dans des conditions similaires. Entre autres, lorsque les essais étaient réalisés en station de recherche, des conditions similaires aux conditions commerciales ont été reproduites. Toutefois, des conditions d'entreposage inadéquates ont parfois mené à des pourcentages de pertes hors-normes à certains sites, entraînant leur exclusion du jeu de données. Suivant l'analyse exploratoire, 78 % de l'ensemble des données validées des essais N ont eu des données d'entreposage jugées adéquates. Tel que mentionné dans la section 1.8.4, en moyenne, l'entreposage des rutabagas a duré 160 jours (148 à 179 jours). La température et l'humidité relative à l'entreposage ont varié respectivement entre 1 et 4 °C (moyenne de 1,9 °C) et entre 70 et 95 % (moyenne de 86 %). Une température de 0 °C et un taux d'humidité relative compris entre 95 et 100 % sont considérés adéquats pour l'entreposage du rutabaga (Alberta Agriculture and Rural Development, 2014; MAAARO, 2011).

Dans l'ensemble, les causes de pertes principales suivant l'entreposage du rutabaga étaient le manque de fermeté, la présence de maladies non identifiées, la pourriture du collet, la pourriture racinaire et la présence de taches.

Dans les sols à textures fines (G1), les pertes suivant la période d'entreposage étaient similaires au-dessus ou en deçà du seuil de 3,2 % de MO (données non présentées). Par conséquent, les pertes dans les sols G1 ont été analysées ensemble et sont présentées toutes teneurs de MO confondues (Figure 14). Les pertes mesurées ont été de 2,5 à 6,2 % en moyenne, ces dernières n'ayant pas été affectées par la dose d'azote ($P = 0,286$). Toutefois, bien que non statistiquement significative, il semble y avoir davantage de pertes dans les parcelles témoin (0N), en comparaison des parcelles fertilisées.

Dans les sols à textures moyennes à grossières (G2-G3), l'effet de la dose de N sur les pertes suivant l'entreposage a varié dépendamment de la teneur en MO du sol. En effet, dans les sols ayant moins de 3,2 % de MO, la dose de N n'a pas affecté significativement les pertes suivant l'entreposage, bien que celles-ci semblaient plus élevées dans le traitement témoin (14,7 %) que dans les traitements fertilisés (8,5 à 11,0 %). Au-delà de 3,2 % de MO, les apports supérieurs à 60 kg N/ha ont entraîné des pertes significativement plus élevées qu'avec les apports plus faibles. Ces résultats sont contraires à ceux de Cutcliffe et Sanderson (1989) sur un sol loam sableux, qui n'ont observé aucun effet significatif de la fertilisation azotée sur les pertes de rutabagas (cv. York) de catégories vendables au cours de l'entreposage.

Finalement, en raison du faible effet de la fertilisation azotée sur les pertes de rendements à l'entreposage, aucun ajustement des VSRF n'a été effectué sur la base de ce critère dans les deux groupes de texture de sols. De plus, dans les sols G2-G3 ayant plus de 3,2 % de MO, la dose optimale de N (60 kg/ha) demeure sécuritaire considérant que les pertes enregistrées ont été parmi les plus faibles.

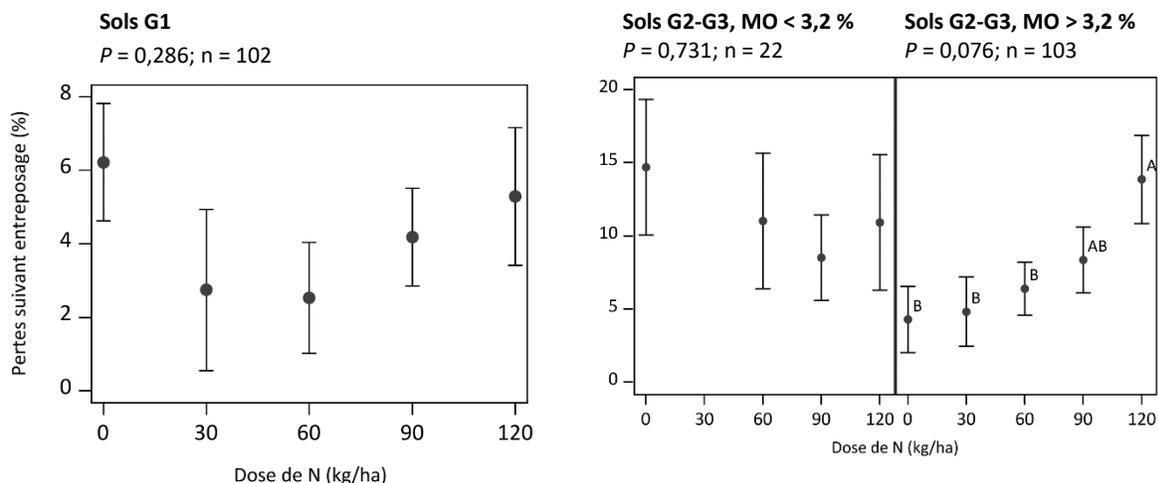


Figure 14. Pertes de rendement suivant l'entreposage en fonction de la dose d'azote appliquée, la teneur en matière organique et le groupe de textures du sol. Les moyennes présentées sont les valeurs estimées du modèle statistique. Les moyennes suivies d'une même lettre ne diffèrent pas statistiquement entre elles (LSD, $P < 0,12$). Les barres représentent les erreurs-types. G1 : sols à texture fine. G2 : sols à texture moyenne. G3 : sols à texture grossière. MO : Matière organique déterminée par la méthode par perte au feu. n : nombre d'observations.

2.3 Diagnostic nutritionnel et exportations en azote

Les concentrations et les exportations de N par les racines du rutabaga en fonction du diagnostic nutritionnel sont présentées au Tableau 12 et à la Figure 15. Le diagnostic nutritionnel et les exportations ont été calculés uniquement sur la biomasse racinaire puisque le feuillage demeure au champ. La population de tête (groupe d'individus à haut rendement et à l'équilibre nutritionnel) a eu une concentration moyenne d'azote de $1,72 \pm 0,22$ kg/t humide (Tableau 12). Au Michigan, Warncke et al. (2004) rapportent une concentration similaire en N de 1,54 kg N/t (3,4 lb/t) pour le rutabaga. Les concentrations en N obtenues dans le cadre de cette étude sont plus faibles que celle présentée actuellement dans le guide du CRAAQ (2010), qui est de 2,25 kg N/t humide, lorsque rapportée à 88 % d'humidité (1,5 kg/t à 92 % d'humidité). Considérant un rendement de 79 909 kg/ha, les exportations de la population de tête varient de 103 à 173 kg N/ha, avec une moyenne de 140 kg N/ha. La Figure 15 démontre que les exportations ont augmenté de façon assez linéaire avec les rendements, témoignant d'une faible variabilité de la concentration en N à travers les différents sites et traitements. Celle-ci pourrait en partie s'expliquer par l'utilisation du même cultivar pour tous les essais.

Tableau 12. Concentrations et exportations en N du rutabaga, 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 »)	88	1,72	0,22	140	137	103	173
Faible rendement et équilibre nutritionnel	86	1,51	0,15	103	101	83	128
Faible rendement et déséquilibre nutritionnel	87	1,72	0,27	89	90	52	156
Haut rendement et déséquilibre nutritionnel	88	1,57	0,07	118	118	116	121

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

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

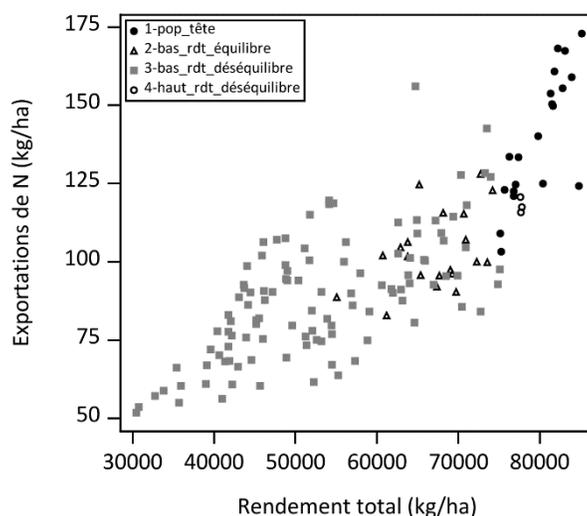


Figure 15. Exportations d'azote du rutabaga en fonction des rendements totaux et selon le diagnostic nutritionnel. Les exportations ont été calculées sur les racines seulement et ne tiennent pas compte du feuillage.

2.4 Nitrate résiduel à la récolte

Le N apporté par fertilisation n'est pas absorbé en totalité par les cultures. Ainsi, une partie de ce N restera au niveau du sol à la fin du cycle cultural, à risque de diffuser dans l'environnement (Bélanger et al., 2003). Afin d'évaluer ce risque, le nitrate (N-NO₃) résiduel a été mesuré sur deux profondeurs (0-30 et 30-60 cm) immédiatement après la récolte. Les concentrations en N-NO₃ des différents traitements ont été analysées en tant qu'« indice nitrate ». Cet indice s'obtient en divisant la teneur en N-NO₃ du traitement fertilisé par la teneur en N-NO₃ de la parcelle témoin. Ainsi, un indice nitrate de 1 signifie qu'il n'y a pas de hausse du nitrate dans les parcelles fertilisées, en comparaison du témoin (Figure 16).

Les résultats des analyses montrent que l'effet de la fertilisation azotée sur les teneurs en nitrate du sol est variable selon la profondeur et le groupe de textures considérés. En effet, l'apport de N par fertilisation a augmenté significativement le nitrate résiduel du sol par rapport au témoin dans la couche de sol de 0 à 30 cm dans les deux groupes de textures analysés (G1 vs. G2-G3). Dans cette strate de sol, les teneurs en nitrate résiduel

ont varié de 1,91 - 2,24 ppm et de 3,71 - 4,20 ppm pour les sols G1 et G2-G3, respectivement. Des hausses significatives du N-NO₃ résiduel ont été induites par la fertilisation azotée à partir de la dose de 60 kg N/ha dans les sols G1 et de 90 kg N/ha dans les sols G2-G3 (Figure 16). Dans les deux groupes de textures, les plus fortes teneurs ont été produites par l'apport de 120 kg N/ha et valaient environ 1,27 fois celles des traitements témoin. Dans la strate sous-jacente (30-60 cm), aucun effet significatif de la fertilisation n'a été observé sur la teneur en nitrate résiduel pour les deux catégories de sol. Comparativement à la couche de surface, de plus faibles concentrations ont été mesurées, soit de 1,55 à 1,64 et de 0,85 à 2,02 ppm dans les sols G1 et G2-G3, respectivement. Dans les sols du groupe G1, le nitrate résiduel était très similaire entre les différentes doses de N appliquées (Figure 16).

Dans les sols du groupe G1, le nitrate résiduel était très similaire entre les différentes doses de N appliquées, tandis que dans les sols G2-G3, les teneurs semblaient augmenter. Toutefois, cette hausse n'a pas été significative. Ceci pourrait découler de la nature plus perméable des sols G2-G3. Le mouvement du nitrate dans les sols repose en effet sur le transport convectif ('mass flow') qui est grandement facilité dans les sols de textures plus grossières (Tisdale et al., 1985; Havlin et al., 2005).

Selon les résultats des analyses du rendement vendable présentés à la section 1.8.2, les doses optimales de N ont varié de 30 à 60 kg/ha dans les sols G1 et de 60 à 90 kg/ha dans les sols G2 et G3, selon la teneur en MO des sols et le calibre visé. Ainsi, dans les sols G1, l'application de la dose de 60 kg/ha pourrait mener à une augmentation du nitrate dans le sol, et par conséquent, à une augmentation du risque de pertes dans l'environnement. De même, l'application de la dose de 90 kg/ha dans les sols G2-G3 pourrait présenter un risque environnemental accru. Cependant, il convient de noter que dans tous les cas, les quantités de N-NO₃ ont été généralement faibles. De plus, dans les sols G2-G3, la dose de 90 kg N/ha est recommandée uniquement pour les sols ayant moins de 3,2 % de MO.

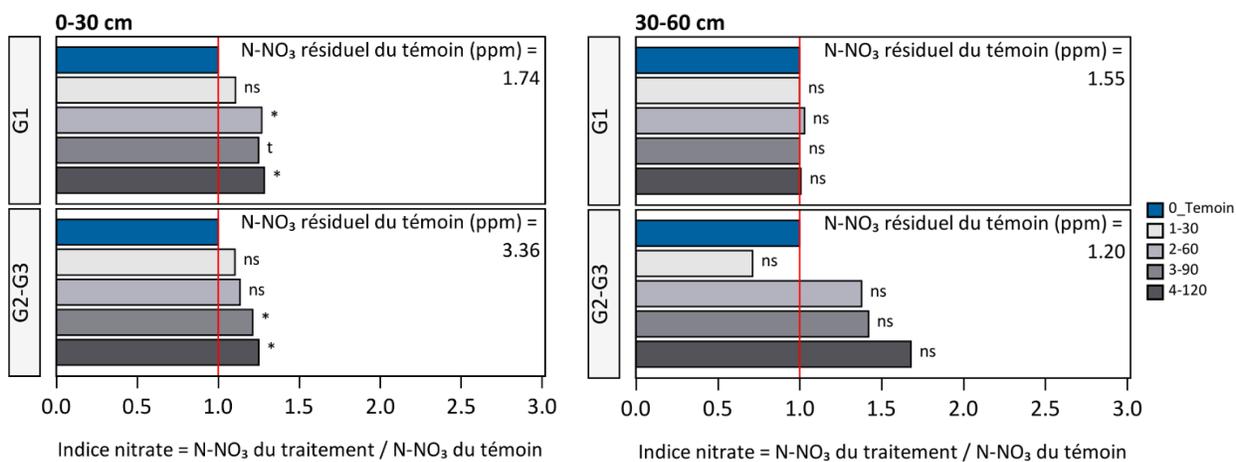


Figure 16. Indices nitrate des traitements d'azote du rutabaga aux profondeurs 0-30 et 30-60 cm dans les sols G1 vs G2-G3, au moment de la récolte. La statistique présentée à droite des barres horizontales indique si le traitement est différent du témoin 0 N. NS : non significatif. t : tendance à P < 0,12. * : P entre 0,05 et 0,01. ** : P entre 0,01 et 0,001. *** : P < 0,001. G1 : sols à texture fine. G2 : sols à texture moyenne. G3 : sols à texture grossière.

Pour le rutabaga, le coefficient d'utilisation apparent (CUA) de l'azote calculé sur la biomasse racinaire (biomasse foliaire non mesurée) a été en moyenne de 60 % (données non présentées). Les plus hauts CUA ont été calculés pour les sols du groupe de textures G1. Les CUA y atteignent des valeurs très élevées, allant en moyenne de 81 % pour la dose de 120 kg/ha à 93 % pour celle de 30 kg/ha. Dans les sols de textures moyennes à grossières, les CUA ont été plus faibles, ce qui était attendu, soit allant en moyenne de 42 % pour la dose de 30 kg/ha à 58 % pour celle de 90 kg/ha. Ces dernières valeurs sont toutefois surprenantes considérant que le CUA diminue généralement avec l'augmentation des doses, l'inverse ayant été observé dans ces sols.

Ainsi, dans les sols G2-G3, malgré la réponse importante de la culture à la fertilisation azotée jusqu'à la dose de 90 kg N/ha, une partie plus importante de l'apport est apparemment demeurée non prélevée et à risque de perte par lessivage. En effet, l'analyse combinée des résultats des CUA et du nitrate résiduel dans les sols montre qu'il y a concordance entre le CUA moins élevé et le nitrate résiduel plus grand dans les sols G2-G3, comparativement aux sols G1. Ces observations pourraient expliquer les résultats des ANOVA sur les rendements vus précédemment (section 2.2.2) selon lesquels de plus grands apports de N seraient requis dans les sols G2-G3, en comparaison des sols G1, si une partie du N minéral appliqué est plus facilement perdu que dans les sols argileux. Ces résultats doivent toutefois être interprétés avec prudence, puisque les CUA sont partiels et calculés à partir des analyses de la racine uniquement.

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

Les valeurs scientifiques de référence en fertilisation (VSRF) proposées pour la culture des rutabagas au Québec sont présentées au Tableau 13. Différents niveaux d'information ont été considérés afin de structurer ces recommandations, soit (i) les calibres visés, (ii) les groupes de textures des sols et (iii) la teneur en matière organique du sol. Afin de déterminer la dose agronomique optimale, la réponse de la culture à la fertilisation azotée a été étudiée dans chacune des catégories produites par ces niveaux d'information.

Dans les sols G1, un seuil de MO critique de 3,2 % a été obtenu peu importe le calibre de rutabagas visé (Tableau 13). En effet, la dose optimale n'a pas différé selon le marché ciblé (calibres 1-2 ou calibres 1-2-3) puisque l'application de doses croissantes de N n'a pas diminué significativement la quantité de rutabagas de calibres 1 et 2 récoltés. Ainsi, sans distinction des marchés, des apports de 60 et 30 kg N/ha sont proposés respectivement en dessous et au-dessus du seuil de 3,2 % de MO. Dans les sols G2 et G3, contrairement aux sols G1, la réponse à la fertilisation était différente selon le calibre visé. Par conséquent, pour un rendement en rutabagas de diamètre entre 5 et 14 cm (calibres 1 et 2), la dose de N de 60 kg/ha est proposée indépendamment de la teneur en MO du sol. En effet, la réponse de la culture a été similaire sur toute la plage étudiée de valeurs de MO. Toutefois, si en plus des rutabagas de diamètre entre 5 et 14 cm, l'entreprise vise également obtenir des rutabagas de plus gros calibres (plus de 14 cm de diamètre), la dose de N peut être augmentée jusqu'à concurrence de 90 kg N/ha si le sol contient moins de 3,2 % de MO. Au-delà de cette teneur, la dose proposée demeure 60 kg N/ha.

Tant dans les sols G1 que G2-G3, la diminution des doses de N au-delà d'une certaine teneur en MO permettra, entre autres, de limiter la quantité de nitrate résiduel mesurée dans le sol après les récoltes (voir section 2.4), le

nitrate résiduel étant associé à un risque accru de perte de N par lessivage. À l’instar de ce qui a été testé dans les essais et dans le but d’optimiser les prélèvements par la plante afin de diminuer les risques de pertes de N dans l’agroenvironnement, les VSRF sont proposées en deux fractionnements pour les doses de 60 et 90 kg N/ha. Un seul apport est proposé pour la plus faible dose de 30 kg N/ha.

D’autres paramètres tels que le développement du feuillage et sa robustesse d’attache à la tige, les pertes de rendement à la récolte et à l’entreposage, la présence de cœur brun et de cœur creux et les teneurs en nitrate résiduel du sol ont été également étudiés dans le cadre de la détermination des VSRF. À la suite de l’interprétation des résultats de l’ensemble de ces paramètres, aucun ajustement des doses optimales déterminées lors des analyses sur le ROM n’a été nécessaire. Les conditions d’entreposage, très variables et inadéquates dans certains cas, ont influencé les pertes mesurées davantage que la fertilisation azotée. Enfin, quant au nitrate résiduel, bien que les traitements de fertilisation aient entraîné des augmentations significatives par rapport au témoin, aucun ajustement n’a été apporté sur cette base, en raison du fait que les quantités mesurées dans les sols étaient faibles. Toutefois, la prise en compte du taux de matière organique des sols lors du choix des doses à apporter, ainsi que le fractionnement des apports d’engrais, contribueront à diminuer le risque environnemental.

Comparativement aux recommandations actuellement utilisées au Québec (35 kg N/ha; CRAAQ, 2010), hormis dans les sols G1 ayant plus de 3,2 % de MO, les propositions de VSRF de la présente étude sont plus élevées (Tableau 14). Celles-ci sont également plus élevées que les recommandations de l’Alberta (33 kg/ha) et de l’Ontario (\leq 35 kg/ha). Cependant, elles sont comparables à celles des états américains du Mid-Atlantic et de la Nouvelle-Angleterre et inférieures à celles du Michigan.

Tableau 13. Fertilisation azotée du rutabaga – Valeurs scientifiques de référence en fertilisation

Groupe de textures ¹	Calibre visé ²	Classe de fertilité MO _{PAF} (%) ³	Période d’application	Fractionnement ⁴ (kg N/ha)	VSRF ⁵ (kg N/ha)	
G1	-	< 3,2	Au semis	30	60 ⁶	
			Au stade 4-6 feuilles	30		
G2, G3	1 et 2	-	Au semis	30	60 ⁶	
			Au stade 4-6 feuilles	30		
	1, 2 et 3	< 3,2	Au semis	30	90 ⁶	
			Au stade 4-6 feuilles	60		
			> 3,2	Au semis	30	60 ⁶
				Au stade 4-6 feuilles	30	

Note : Les essais réalisés en sols G1 ont été regroupés dans la région de Lanaudière uniquement tandis les essais en sols G2-G3 ont été situés en grande majorité (7 sites sur 8) dans la région de Chaudière-Appalaches.

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

² Calibre 1 : rutabagas de diamètre compris entre 5 et 9 cm ; Calibre 2 : rutabagas de diamètre compris entre 9 et 14 cm ; Calibre 3 : rutabagas de diamètre supérieur à 14 cm.

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

⁴ Les fractionnements sont présentés tel que testés lors des essais.

⁵ VSRF : Valeur scientifique de référence en fertilisation.

⁶ Dose agronomique optimale dans cette catégorie de sols.

Sols de moins de 2,3 % de MO

Sur l'ensemble des essais, aucun n'a été effectué sur des sols de moins de 2,3 % de MO. Considérant les risques de croissance excessive et l'effet considérable que peut avoir un surplus d'azote sur les calibres des rutabagas, le choix d'une dose supérieure dans ces sols peu pourvus en MO n'a pas été retenu. Ce sont les doses optimales déterminées pour les sols entre 2,3 et 3,2 % de MO qui ont été considérées également dans les sols de moins de 2,3 % de MO. De plus, les VSRF proposées dans la présente étude constituent une hausse des apports de N comparativement à la recommandation actuellement utilisée au Québec qui est de 35 kg N/ha (CRAAQ, 2010).



Répartition des groupes de texture de sols à travers les régions

Les essais de rutabaga ont été réalisés dans deux régions du Québec, soit Chaudière-Appalaches et Lanaudière. Les essais en sols G1 étaient tous localisés dans la région de Lanaudière, tandis que 7 des 8 essais effectués en sols G2-G3 étaient situés dans la région de Chaudière-Appalaches. Par conséquent, les résultats obtenus pourraient refléter un effet confondant de régions et de groupes de textures de sol.

Tableau 14. Comparaison des recommandations en N pour la production du rutabaga au Canada et aux États-Unis

Provinces/États	Mode et période d'application	Fractionnement	Indicateurs		Dose N (kg/ha)	Source
			Fertilité du sol	Autres		
Québec (CAN)	À la volée avant le semis	non	-	-	35	CRAAQ (2010)
Ontario (CAN)		non			35 ou moins	MAAARO (2011)
Alberta (CAN)					33	Alberta Agriculture and Rural Development (2014)
Michigan (É-U)	En bande au semis/ à la volée et incorporé	oui	-	-	56	Warncke et al. (2004)
	à la volée, 4 semaines après la l'émergence)				34-56	
	Dose totale				90-112	
Mid-Atlantic (É-U)	À la volée et incorporé	non	-	-	56	Kuhar et al. (2020)
Nouvelle Angleterre (É-U)	À la volée et incorporé	oui	-	-	56	University of Massachusetts Amherst (2022)
Provinces de l'atlantique (CAN)	À la volée au semis	non	-	-	50	Atlantic Provinces Advisory Committee on Vegetable Crops (1989)

3. FERTILISATION PHOSPHATÉE

3.1 Portrait et représentativité des données

La répartition des blocs des essais à travers les différentes classes de propriétés de sol (0-20 cm) est présentée au Tableau 15. Toutes textures de sol confondues, le pH était situé dans l'intervalle allant de 6,0 à 7,0 pour environ 70 % des sols, alors que 8 et 22 % avaient respectivement un pH inférieur à 6,0 et supérieur à 7,0. Le pH optimal pour la culture du rutabaga est défini à 6,5 (CRAAQ, 2010) ou entre 6,1 et 6,5 (MAAARO, 2011) afin d'assurer la disponibilité des éléments nutritifs à la culture. Les essais P du rutabaga ont été réalisés majoritairement sur des sols de textures fines (G1; 47 %), suivis par les sols de textures moyennes (G2; 35 %) et, en moindre importance, sur les sols de textures grossières (G3; 18 %). La plus faible proportion de sites dans les sols G3 s'explique par le fait que ces sols sont moins propices à la culture du rutabaga. En effet, le sable grossier présente des propriétés abrasives pouvant endommager les tissus de la racine et, par conséquent, compromettre leur entreposage (AAC, 2018). À l'instar des essais N, tous les essais réalisés en sols G1 ont été localisés dans la région de Lanaudière, tandis que tous les essais G3 ont été localisés dans la région de Chaudière-Appalaches. En conséquence, les résultats de cette étude pourraient refléter un effet confondant de régions et de groupes de textures de sol. Toutes textures de sol confondues, l'indice de saturation en phosphore ($ISP_1 = P_{M3}/Al_{M3} \times 100 \%$) a varié entre 2,7 et 31,6 %. Dans les sols G1, seulement 27 % des blocs avaient un ISP_1 inférieur au seuil de 7,6 % du règlement sur les exploitations agricoles (REA) (MDDEP, 2010). À l'opposé, dans respectivement 84 et 78 % des blocs des sols G2 et G3, le taux de saturation en P des sols étaient inférieur au seuil critique de 13,1 % du REA. Enfin, toutes textures confondues, plus de la moitié des blocs (63 %) avaient moins de 100 ppm de P_{M3} .

Tableau 15. Répartition des blocs des essais P du rutabaga selon différentes classes de propriétés de sol après la validation des données

pH _{eau} ¹	Bloc (%)	ISP ₁ (%) ²		ISP ₁ (%) ²			P _{M3} (ppm)	Bloc (%)	Groupe de textures ³	Bloc (%)
		Blocs (%)		Blocs (%)						
			G1		G2	G3				
≤ 6,0	8	≤ 3,8	12	≤ 3,8	16	46	≤ 50	17	G1	47
6,0 – 6,5	24	3,8 – 7,6	15	3,8 – 6,5	28	21	50 – 100	46	G2	35
6,5 – 7,0	46	7,6 – 15,2	35	6,5 – 13,1	40	11	100 – 200	21	G3	18
> 7,0	22	> 15,2	38	13,1 - 20	13	11	200 – 300	13	-	-
-	-	-	-	> 20	3	11	> 300	3	-	-

¹ Le pH optimal pour la culture de rutabaga est de 6,5 au Québec (CRAAQ, 2010) et de 6,1 à 6,5 en Ontario (MAAARO, 2011).

² ISP_1 : indice de saturation en phosphore = $P_{M3}/Al_{M3} \times 100 \%$, 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 ont le potentiel 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 ces indicateurs, le P_{M3} , l' ISP_1 , le pH_{eau} et la teneur en argile du sol 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 dont la valeur de P est inférieure à 0,12 sont présentés (Tableau 16). Parmi les indicateurs de fertilité testés, l’indice de saturation en P (ISP_1), un meilleur indicateur de la biodisponibilité du P que le P_{M3} seul (Khiari et al., 2000), a été le plus performant afin de prédire la réponse à la fertilisation du rutabaga.

La fertilisation en P n’a pas eu d’effet significatif sur les calibres (voir section 3.2.3.1). De plus, la réponse à la fertilisation phosphatée s’est montrée similaire peu importe la variable étudiée, c’est-à-dire le rendement vendable (calibres 1, 2 et 3) ou le rendement des calibres 1 et 2. Conséquemment, dans le but d’alléger la présentation du chapitre, et comme ce sont généralement les calibres 1 et 2 (diamètre de 5 à 14 cm) qui sont préconisés en contexte de production québécoise, seuls les seuils obtenus pour le rendement des calibres 1 et 2 sont présentés et font l’objet des analyses. Toutefois, il convient de souligner que les résultats sont considérés valides et applicables peu importe le calibre considéré.

Toutes textures confondues, le test de Cate-Nelson a indiqué un seuil de réponse à 8,1 % d’ ISP_1 . Lorsque les sols du groupe de textures G1 étaient considérés seuls, le seuil d’ ISP_1 critique a diminué à 7,2 %, tandis que dans les sols G2-G3, c’est plutôt la valeur de 8,9 % d’ ISP_1 qui a été déterminante. Toujours dans les sols G2 et G3, un second seuil de différenciation de l’ampleur de la réponse de la culture de 3,1 % a également été déterminé, correspondant à un rendement relatif de 63 %.

Tableau 16. Valeurs critiques des indicateurs potentiels de sols significatifs selon les tests de Cate-Nelson pour les essais P du rutabaga

Indicateur de sol	Groupes de textures ²	n ³	Valeur critique (%)	RRel ⁴ (%)	Sensitivité	Spécificité	Précision	P
ISP_1 ¹	G1, G2, G3	51	8,1	83	0,72	0,84	0,76	< 0,001
	G1	23	7,5	83	0,93	0,63	0,83	0,009
	G2, G3 (1 ^{er} seuil)	28	3,1	63	0,88	0,67	0,86	0,073
	G2, G3 (2 ^{ème} seuil)	28	8,9	85	0,68	0,82	0,74	0,002

¹ ISP_1 : indice de saturation en phosphore = $P_{M3}/Al_{M3} \times 100$ %, éléments extraits au Mehlich-3 (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 Effet de la dose de phosphore sur le rendement

Les résultats des ANOVA sont illustrés à la Figure 17 (pour plus d’explication concernant l’interprétation de la figure, consulter la section 2.2.2). Trois modèles sont présentés : sans indicateur (A); selon l’ ISP_1 dans les sols du groupe de textures G1 (B) et selon l’ ISP_1 dans les sols des groupes de textures G2 et G3 (C).

Les analyses de variance réalisées sur l’ensemble du jeu de données (modèle A, n = 230) ont montré un effet très significatif de la fertilisation phosphatée ($P < 0,001$) sur le rapport de rendements (ROM) du rutabaga. Les comparaisons multiples des moyennes ont démontré une dose agronomique optimale de 150 kg/ha de P_2O_5 , avec un gain de rendement moyen associé de 18,2 % par rapport au témoin. Cependant, l’analyse plus détaillée des données (modèles B et C) démontrent l’importance d’avoir un indicateur de fertilité du sol approprié afin d’évaluer les réels apports d’engrais nécessaires.

En effet, en tenant compte de la saturation en P des sols montre que dans les sols du groupe de textures G1, l'apport de P par fertilisation a augmenté les rendements de la culture uniquement lorsque l'ISP₁ du sol était inférieur au seuil de réponse agronomique de 7,5 % (Figure 17; modèle B). Toutefois, cette augmentation des rendements n'a été statistiquement significative qu'en dessous du seuil de 3,8 % ($P = 0,006$; $n = 14$). La dose optimale pour cette catégorie de sol a été de 150 kg P₂O₅/ha pour un gain de rendement moyen de 18 %. Il convient de souligner qu'aucun plafond de gain n'a été atteint dans cette catégorie de sol même avec la plus forte de dose testée, indiquant qu'un apport supplémentaire de P₂O₅ pourrait augmenter davantage les rendements de la culture. Dans les sols G1 ayant un ISP₁ entre 3,8 % et 7,5 %, des gains variant de 19 à 29 % par rapport au témoin ont été observés. Toutefois, aucune différence statistiquement significative n'a été mesurée entre les traitements, suggérant que la plus petite dose testée était suffisante pour l'obtention du rendement agronomique optimale de la culture. Dans les sols d'ISP₁ entre 7,5 et 15,0 %, malgré l'absence d'effet significatif de l'apport de P sur le rendement, les limites supérieures des intervalles de confiance montrent une probabilité d'avoir des gains de rendement non négligeables par rapport au témoin. Cela traduit que dans certains sols, un apport de P pourrait être nécessaire afin d'éviter des pertes de rendement. La plus petite dose testée est donc jugée adéquate pour couvrir les besoins en P de la culture pour cet intervalle de fertilité de sol. Au-delà du seuil de 15,0 % d'ISP₁, les probabilités d'avoir des gains de rendement à la suite de l'apport de P sur les sols semblent être plus faibles, comme les gains moyens étaient bas (maximum de 7 %).

Tel que mentionné dans la section 3.2.1, deux seuils de réponse ont été retenus dans les sols G2-G3, soit 3,1 et 8,9 % (Tableau 16). De plus, à partir du seuil d'ISP₁ de 8,9 %, le seuil de 13,3 % a été obtenu en appliquant une procédure modifiée de la méthode de Cope-Rouse (seuil multiplié par 1,5). De manière générale, dans les sols G2-G3 (Figure 17; modèle C), des gains de rendement statistiquement significatifs ont été observables jusqu'à un ISP₁ de 13,3 %. Pour un ISP₁ inférieur à 3,1 %, la dose optimale de 150 kg P₂O₅/ha a mené à des gains de rendement de 31 % en moyenne, avec une variation allant de 2 à 60 % ($P = 0,048$; $n = 22$). Cette dose, bien que non statistiquement différente du groupe de dose précédent (100-120 kg P₂O₅/ha), permet l'obtention d'un gain de rendement supplémentaire de 5 % en moyenne. Dans les sols G2-G3 dont l'ISP₁ était entre 3,1 et 8,9 %, l'application de 100 à 120 kg P₂O₅/ha a eu tendance ($P = 0,072$; $n = 55$) à entraîner des rendements de 16 % supérieurs au témoin, en moyenne.

Entre 8,9 et 13,3 % d'ISP₁, les apports croissants de P ont entraîné des différences de rendements ($P = 0,039$; $n = 19$), avec une dose optimale qui se situe entre 50 et 60 kg P₂O₅/ha. Toutefois, à la suite de l'apport de cette dose, des pertes de rendements de l'ordre de 4 % ont plutôt été enregistrées par rapport au témoin. Pour ces sols, les ROM moyens montrent que seule la dose de 90 kg/ha de P₂O₅ a permis un gain de rendement moyen positif. Cela traduit que selon l'historique de fertilité du site, un apport de P₂O₅ supérieur à la dose optimale de 60 kg/ha pourrait s'avérer nécessaire en vue d'atténuer les risques de pertes de rendement. Il est important de noter que pour ces sols, aucun plafond de rendement n'a été atteint, même à la suite de l'apport de la plus forte dose testée, soit celle de 90 kg/ha de P₂O₅. Cependant, vue l'absence de différence significative entre les doses de 50-60 et de 90 kg N/ha, le fait de ne pas avoir un plateau dans cette catégorie de sol pourrait probablement s'expliquer par le faible nombre de doses testées (3 traitements). L'absence de données pour les sols ayant un ISP₁ compris entre 13,3 et 17,8 % n'a pas permis de réaliser une ANOVA pour cette catégorie de sol afin de déterminer la dose agronomiquement optimale. En effet, un seul bloc d'un site a eu un ISP₁ compris entre 13,3 et 17,8 %. Au-delà du seuil de 17,8 % d'ISP₁, les apports de P₂O₅ n'ont pas eu d'effet sur le rendement du

rutabaga. Les différentes doses ont entraîné des gains variant de -13 à 11 % aux rendements du témoin. Ces résultats suggèrent donc qu'un apport nul serait à propos dans ces sols assez saturés en P.

Les résultats de la présente étude sont similaires à ceux de Cutcliffe et Munro (1973) qui ont rapporté un effet significatif de la fertilisation phosphatée sur l'augmentation du rendement dans des sols de fertilité en P de faible à moyenne. Des doses optimales généralement plus élevées, entre 112 et 297 kg/ha de P₂O₅ (49 à 130 kg P/ha), ont été rapportées par ces auteurs pour le rendement vendable. Reith et Inkson (1963) ont trouvé des doses optimales variant entre 90 et 147 kg P₂O₅/ha (environ 80 à 131 lb P₂O₅/ac) pour la culture du rutabaga selon le modèle mathématique utilisé et l'année de réalisation des essais. À l'opposé, dans un essai en serre, Macleod et al. (1971) n'ont rapporté aucun effet significatif de la fertilisation en P, même dans des sols peu pourvus.

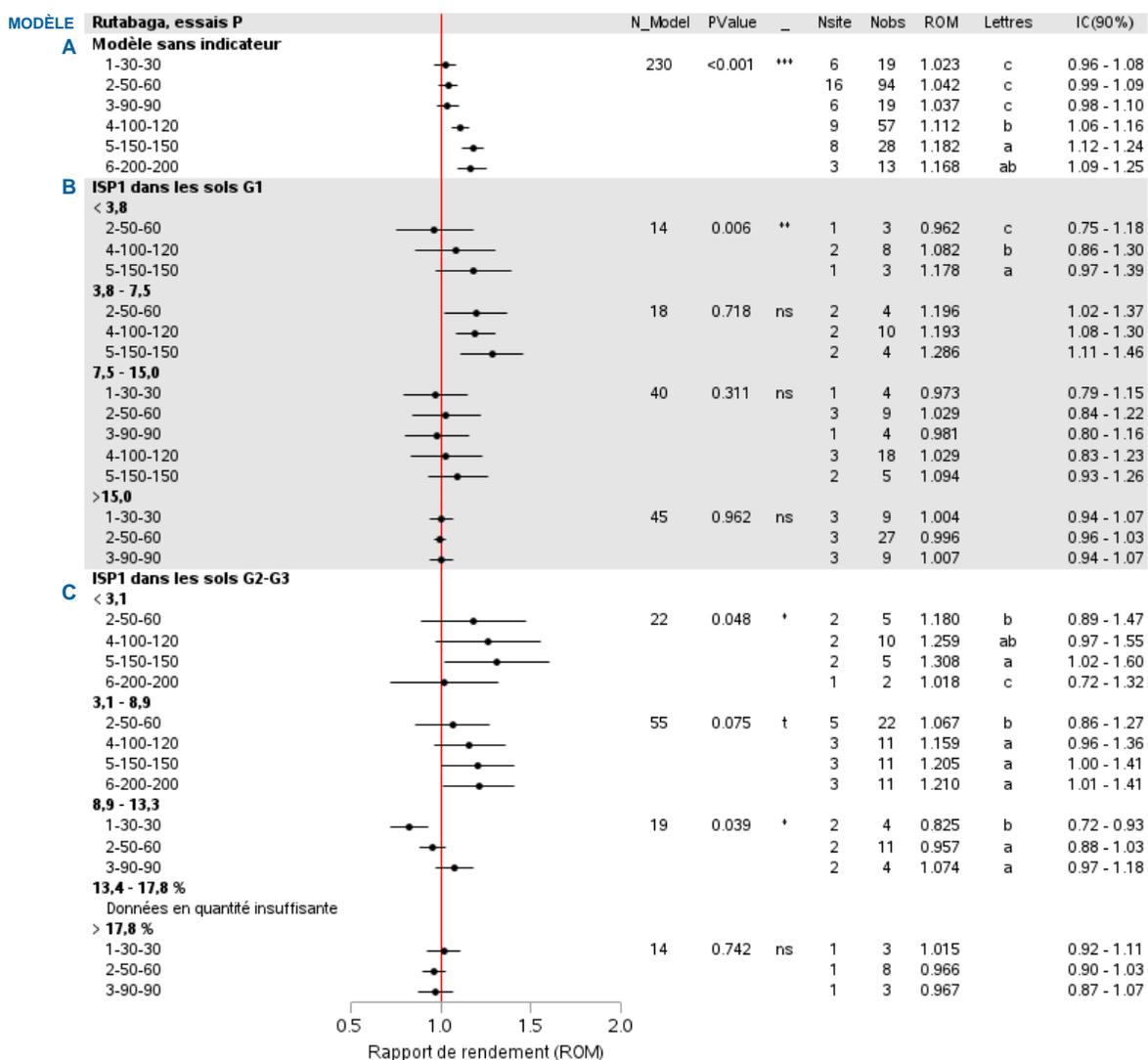


Figure 17. Résultats des analyses de variance sur la réponse du rutabaga aux doses croissantes de P₂O₅.
 N_model : nombre d'observations du modèle ; Nsite : nombre de sites ; Nobs : nombre d'observations ; ROM : rapport de rendement (rendement parcelle fertilisée/rendement parcelle témoin) ; IC : Intervalle de confiance ; G1 : sols à texture fine ; G2 : sols à texture moyenne ; G3 : sols à texture grossière ; Les moyennes d'une même catégorie qui ne partagent pas la même lettre sont significativement différentes au seuil de P < 0,12.

3.2.3 Effet de la dose de phosphore sur les calibres, l'état du feuillage, la qualité, les pertes à la récolte et les pertes à l'entreposage

3.2.3.1 Calibres à la récolte

À la récolte, les rutabagas vendables ont été classés en trois catégories (calibres) selon leur diamètre (Tableau 8). Les ANOVA ont été effectuées en considérant la proportion des rendements obtenus pour les calibres 1 et 2 (diamètre entre 5 et 14 cm), par rapport au rendement vendable (diamètre > 5 cm).

Contrairement à l'azote, la répartition des calibres suivant la fertilisation phosphatée a été similaire indépendamment de la texture du sol (données non présentées). Dans l'ensemble, la fertilisation en P_2O_5 n'a pas influencé les calibres des rutabagas, ni en termes de rendements bruts, ni en termes de proportions relatives à l'ensemble du rendement vendable. Tel qu'illustré sur la Figure 18, les proportions du rendement vendable que représentent les rutabagas de 5 à 14 cm étaient similaires à celles des rutabagas ayant un diamètre supérieur à 14 cm indépendamment de la dose de P_2O_5 appliquée. En raison de cette absence d'effet sur les calibres, aucun ajustement des doses de P recommandées n'a été nécessaire selon ce paramètre.

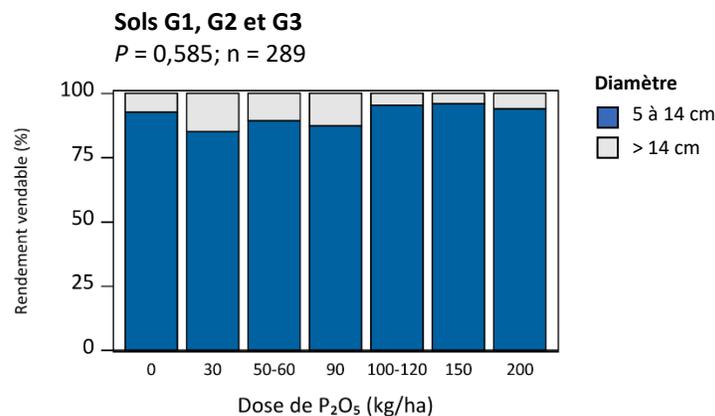


Figure 18. Calibres à la récolte selon les doses de phosphore. Les analyses statistiques ont été effectuées sur les proportions de rendement en rutabaga de diamètre entre 5 et 14 cm selon les différents traitements. G1 : sols à texture fine. G2 : sols à texture moyenne. G3 : sols à texture grossière. Calibre 1 : diamètre de 5 à 9 cm. Calibre 2 : diamètre de 9 à 14 cm. Calibre 3 : diamètre > 14 cm. n : nombre d'observations.

3.2.3.2 État du feuillage du rutabaga à la récolte

Robustesse de l'attache du feuillage

L'effet de la fertilisation phosphatée sur la robustesse de l'attache du feuillage a été évaluée selon les mêmes critères que pour les essais N. Les détails relatifs à cette évaluation peuvent être consultés dans les sections 1.8.4 et 2.2.3.2. Ces résultats, présentés à la Figure 19, ont montré que l'attache du feuillage a varié de très bonne (cote 1) à moyenne (cote 3) dans la grande majorité des parcelles tant dans les sols du groupe de textures G1 que dans ceux G2-G3 (Figure 19).

Dans les sols G1, aucun cas d'attache insuffisante (cotes 4 et 5) n'a été relevé dans le cadre de ces essais. En moyenne, l'attache du feuillage est classée très bonne dans 63 % des parcelles, bonne à moyenne dans 30 % des parcelles et moyenne dans 7 % des parcelles.

Dans les sols G2-G3, l'attache du feuillage a été jugée très bonne dans 43 % des parcelles, bonne à moyenne dans 35 % des parcelles et moyenne dans 18 % des parcelles. Contrairement aux sols G1 où aucun cas d'insuffisance (cote 4 et 5) n'a été relevé, il y a eu quelques cas d'attache moyenne à insuffisante dans les G2-G3, bien que l'occurrence ait été faible (4 %) et semble être liée à un effet site. Enfin, similairement aux G1, aucun cas d'attache du feuillage n'a été considéré insuffisant indépendamment de la dose de P₂O₅ appliquée.

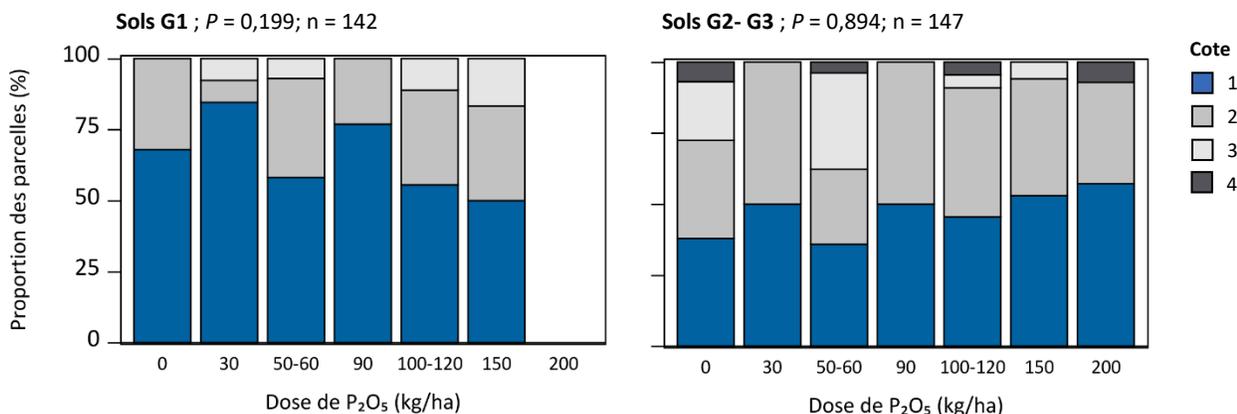


Figure 19. Évaluation de la robustesse de l'attache du feuillage à la tige selon la dose de phosphore. 1 : très bonne attache. 2 : attache très bonne à moyenne. 3 : attache moyenne. 4 : attache moyenne à insuffisante. 5 : attache insuffisante. G1 : sols à texture fine. G2 : sols à texture moyenne. G3 : sols à texture grossière. n : nombre d'observations.

Développement du feuillage

Tel qu'effectué dans les essais N, l'effet de la fertilisation en P sur le développement du feuillage du rutabaga a été évalué au moment de la récolte par la vérification systématique de quelques plants sélectionnés aléatoirement dans chaque unité expérimentale. Cinq niveaux de développement du feuillage ont été attribués, pour des cotes allant de 1 (Feuillage très dense ou excessif) à 5 (Feuillage insuffisamment dense) (Tableau 9). Les détails supplémentaires relatifs à cette évaluation peuvent être consultés dans les sections 1.8.4. Les résultats de cette évaluation sont présentés à la Figure 20.

La fertilisation phosphatée n'a pas influencé le développement du feuillage dans les sols de textures fines (G1) ($P = 0,979$; Figure 20). Tel qu'observé pour la robustesse de l'attache du feuillage, le développement du feuillage est généralement meilleur dans les sols G1 en comparaison aux sols G2-G3. En effet, contrairement aux sols G1 où aucun cas d'insuffisance n'a été enregistré, des cas d'insuffisance au niveau du développement du feuillage sont survenus dans les sols G2-G3, bien qu'observés sur peu de parcelles. Dans les sols G1, indépendamment de la dose de P₂O₅ appliquée, le feuillage a été très dense ou excessif, (cote 1) dans seulement 3 % des parcelles, traduisant un faible risque d'avoir des problèmes résultant d'un développement excessif du feuillage à la suite de l'apport de P. À l'opposé, le feuillage a été dense (cote 2) dans 44 % des parcelles et moyennement dense ou suffisant (cote 3) dans 53 % des parcelles.

Dans les sols G2-G3, les cotes ont varié entre 1 et 5, les cotes 4 et 5 étant insuffisantes pour la récolte mécanique. Tel qu'observé pour les sols G1, seulement 4 % des parcelles ont eu un feuillage très dense ou excessif (cote 1). Le feuillage a été dense (cote 2) dans 19 % des parcelles et moyennement dense ou suffisant (cote 3) dans 65 % des parcelles. Toutes les doses confondues, 13 % et 0,7 % des parcelles ont eu respectivement une cote de 4 et de 5. De même que pour l'azote, la cote de 5 n'a été observée que dans une seule parcelle, tandis que celle de 4 a été observée dans deux sites. Il est à noter que les quelques sites ayant présenté un développement du feuillage inadéquat sont les mêmes à avoir des cas d'insuffisance de la robustesse de l'attache du feuillage. Cela vient confirmer que les problèmes de la qualité du feuillage observés dans cette étude reflètent plus un effet site qu'un effet de la fertilisation en P.

Dans les sols G1 comme dans les sols G2-G3, les doses optimales de P₂O₅ ont varié de 0 à 150 kg/ha (section 3.2.2). En raison de l'absence d'effet significatif de la fertilisation phosphatée sur la qualité et le développement du feuillage, aucun ajustement des doses n'a été nécessaire sur la base de ce critère dans les deux grands groupes de texture de sols.

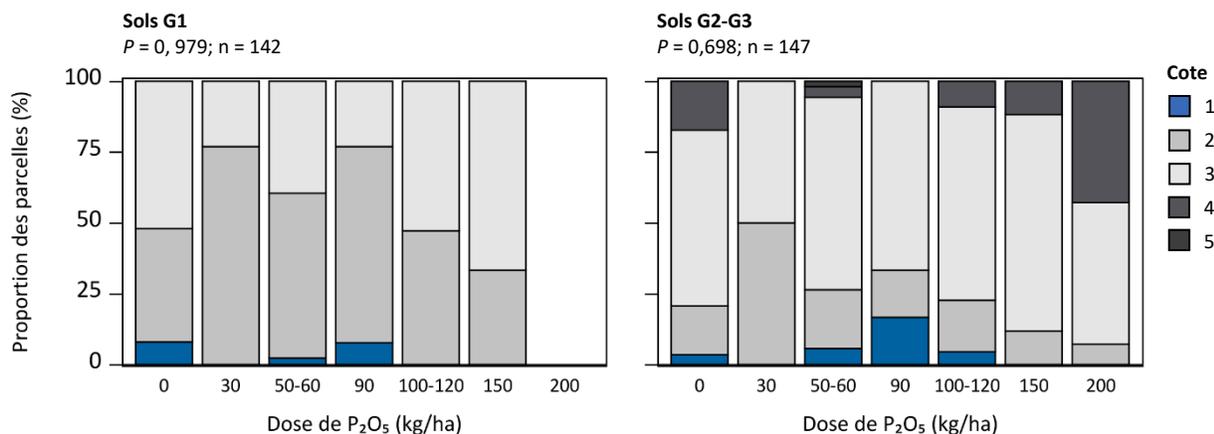


Figure 20. Évaluation du développement du feuillage selon les doses de phosphore. 1 : feuillage très dense ou excessif. 2 : feuillage dense ou supérieur au besoin pour arrachage mécanique. 3 : feuillage moyen ou suffisant. 4 : feuillage moyen à insuffisamment dense. 5 : feuillage insuffisamment dense. G1 : sols à texture fine. G2 : sols à texture moyenne. G3 : sols à texture grossière. n : nombre d'observations.

3.2.3.3 Qualité des rutabagas

Cœur brun

L'apparition du cœur brun a été investiguée lors des essais de fertilisation phosphatée, bien que son occurrence soit davantage associée à d'autres facteurs comme une carence en bore dans le sol (Sanderson et al., 2002; Shelp et Shattuck, 1987), la variété cultivée, le pH du sol, la pluviométrie et la teneur en K et Ca du sol (Beauchamp et Hussain, 1974; Sanderson et al., 2002). Cette évaluation visuelle a été effectuée à partir de 5 (PSEFCM) à 10 (MIRVRF) rutabagas tranchés sur l'axe longitudinal à deux occasions, soit à la récolte et après l'entreposage. Ainsi, ce sont 10 à 20 rutabagas par unité expérimentale qui ont constitué l'échantillon. Les données d'évaluation collectées à la récolte et après une période d'entreposage ont été analysées simultanément pour les raisons

évoquées dans la section sur l'azote (voir section 2.2.3.3). Pour des détails concernant la fertilisation en B des sites et l'analyse de la biomasse du rutabaga, voir la section 2.2.3.3. L'influence du groupe de textures du sol et du niveau de saturation en P a été vérifiée de façon à interpréter les résultats en relation avec ceux des ANOVA sur le rendement (section 3.2.2), cependant, aucun de ces facteurs n'a permis d'observer de différences significatives sur l'occurrence du cœur brun et les conclusions ont été les mêmes dans toutes les catégories de sol (données non présentées). Par conséquent, les résultats de l'évaluation de l'occurrence du cœur brun en fonction de la fertilisation phosphatée sont présentés sans distinction quant au groupe de textures du sol et à la saturation du sol en P (Figure 21).

La fertilisation phosphatée n'a pas eu d'effet significatif sur l'apparition du cœur brun ($P = 0,135$; Figure 21). En moyenne, selon la dose de P_2O_5 appliquée, entre 14,0 et 19,2 % des rutabagas présentaient un cœur brun et les proportions ont faiblement varié avec l'augmentation de la dose de P_2O_5 .

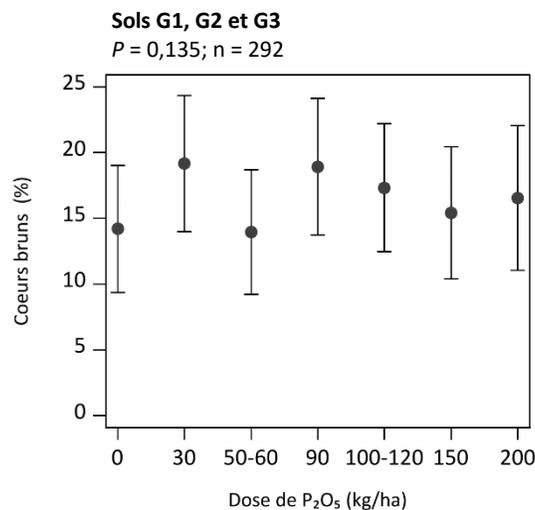


Figure 21. Effet de la dose de phosphore sur l'apparition du cœur brun du rutabaga. L'évaluation de la qualité a été réalisée sur un échantillon de 5 ou 10 rutabagas à la récolte et après une période d'entreposage, pour un total de 10 à 20 rutabagas. G1 : sols à texture fine ; G2 : sols à texture moyenne ; G3 : sols à texture grossière. n = nombre d'observations.

Cœur creux

L'occurrence de l'apparition du problème de cœur creux a été investiguée lors des essais de fertilisation phosphatée à partir de 5 (PSEFCM) à 10 (MIRVRF) rutabagas tranchés sur l'axe longitudinal à deux occasions, soit à la récolte et après l'entreposage. Les données collectées à la récolte et après une période d'entreposage ont été analysées simultanément pour les mêmes raisons évoquées dans la section sur l'azote (voir section 2.2.3.3).

Les analyses de l'effet de la fertilisation en P sur l'occurrence du cœur creux chez le rutabaga ont été effectuées selon le groupe de textures et selon le niveau de saturation en P du sol de façon à interpréter les résultats en relation avec ceux des ANOVA sur le rendement (section 3.2.2). Dans les sols G1, le niveau de saturation en P du sol n'a pas influencé l'occurrence du cœur creux (données non présentées), tandis que dans les sols G2-G3, l'effet

de la fertilisation a différé selon l'ISP₁ du sol. Conséquemment, les résultats sont présentés sans distinction quant au niveau de saturation du sol en P dans les G1 et de part et d'autre du seuil d'ISP₁ dans les G2-G3 (Figure 22).

Dans les sols du groupe de textures G1, la fertilisation phosphatée n'a pas eu d'effet statistiquement significatif sur l'apparition du cœur creux chez le rutabaga ($P = 0,838$). En moyenne, indépendamment de la dose testée, de 2,7 à 6,0 % des rutabagas ont présentés un cœur creux, avec une plus grande fréquence d'apparition à la suite de l'application de la plus forte dose de P testée (150 kg P₂O₅/ha).

Pour les sols des groupes de textures G2 et G3 dont l'ISP₁ était inférieur à 8,9 %, la fertilisation phosphatée a affecté significativement l'occurrence du cœur creux chez le rutabaga ($P = 0,046$). Une augmentation significative de la proportion de rutabagas touchés par le problème de cœur creux a été observée avec l'accroissement des doses de P₂O₅. La fréquence d'apparition du cœur creux était significativement différente du témoin à partir de l'application de la dose de 150 kg/ha, soit pour les deux plus fortes doses de P₂O₅ testées. Pour les sols G2 et G3 dont l'ISP₁ était supérieur à 8,9 %, la fertilisation en P n'a eu aucune incidence sur les occurrences de cœurs creux ($P = 0,557$), lesquelles ont été particulièrement faibles (< 1 %) indépendamment de la dose de P appliquée.

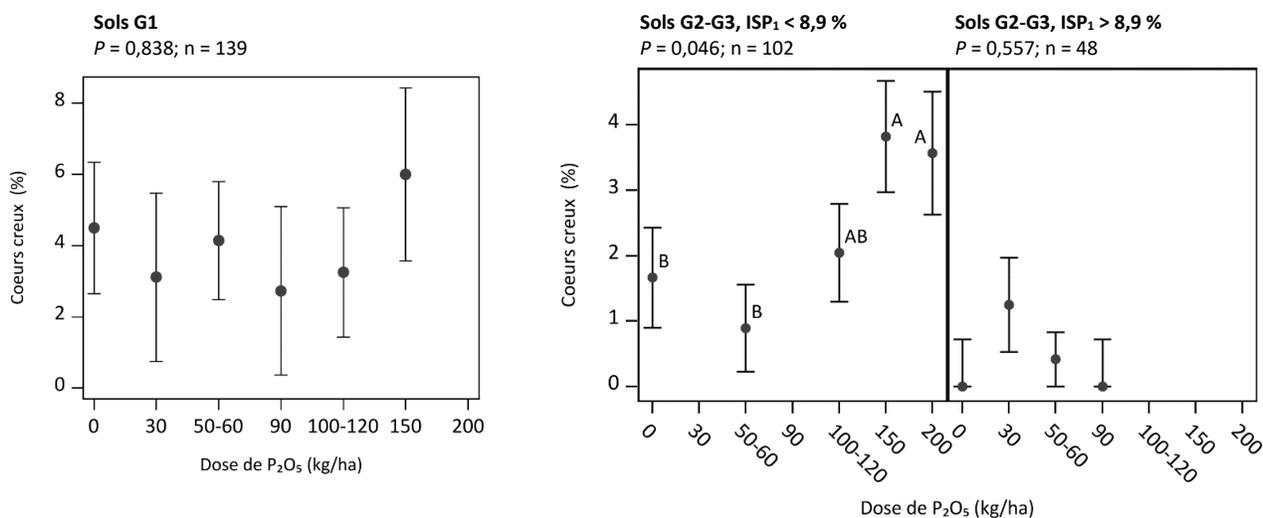


Figure 22. Effet de la dose de phosphore sur l'apparition du cœur creux du rutabaga. L'évaluation de la qualité a été réalisée sur un échantillon de 5 ou 10 rutabagas à la récolte et après une période d'entreposage, pour un total de 10 à 20 rutabagas. Les valeurs qui ne partagent pas une même lettre sont statistiquement différentes ($P < 0,12$). G1 : sols à texture fine. G2 : sols à texture moyenne. G3 : sols à texture grossière. n = nombre d'observations.

3.2.3.4 Pertes à la récolte

Les pourcentages de pertes à la récolte en fonction des doses de P₂O₅ appliquées sont illustrés à la Figure 23. Les données montrent que les pertes de rendement ont légèrement diminué à mesure que les apports en phosphore augmentaient, bien que cette diminution n'ait pas été statistiquement significative ($P = 0,304$). Indépendamment du groupe de textures de sols, les pertes à la récolte ont varié en moyenne de 3,2 % (dose de

200 kg P₂O₅/ha) à 6,7 % (traitement témoin) du rendement total. Considérant l'ensemble des essais P, ces pertes de rendements à la récolte ont été principalement causées par des dommages d'insectes non-récupérables ainsi que par la présence de maladies (pourriture du collet, hernie des crucifères, gale commune, rhizoctonie, etc.) (données non présentées). En raison de l'effet négligeable de la dose sur le pourcentage de pertes à la récolte, aucune dose de P recommandées n'a été ajustées selon ce paramètre.

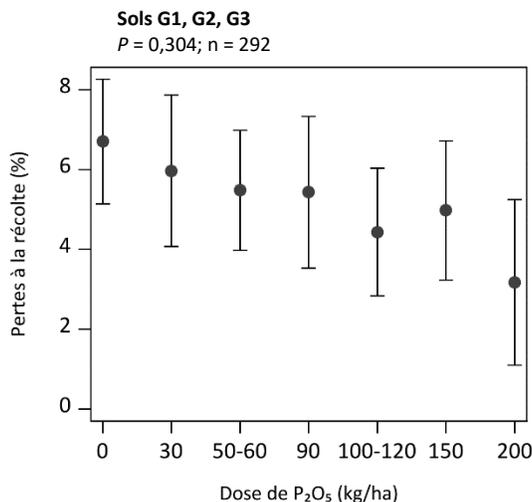


Figure 23. Pertes de rendements à la récolte en fonction de la dose de phosphore appliquée. Les moyennes présentées sont les valeurs estimées du modèle statistique. Les barres représentent les erreurs-types. G1 : sols à texture fine. G2 : sols à texture moyenne. G3 : sols à texture grossière. n : nombre d'observations.

3.2.3.5 Pertes suivant l'entreposage

Dans les essais P, les rutabagas ont été généralement entreposés dans les mêmes conditions que pour les essais N (voir section 1.8.4 et 2.2.3.5), ces derniers étant réalisés sur les mêmes sites. Dans l'ensemble, les causes expliquant les pertes enregistrées à l'entreposage étaient la présence de maladies non identifiées (26 %), la pourriture du collet (23 %), le manque de fermeté (20 %), la pourriture racinaire (19 %), la présence de taches (1) ou autres (9 %). Tel qu'observé à la récolte, les résultats de l'analyse des données montrent que la fertilisation phosphatée n'a pas eu d'effet significatif (*P* = 0,234) sur les pertes de rendement mesurées à l'entreposage (Figure 24). Indépendamment du groupe de textures de sols, les pertes à la récolte ont varié en moyenne de 4,5 (dose de 200 kg P₂O₅/ha) à 9,1 % (traitement témoin) du rendement total, selon la dose de P₂O₅ appliquée. Un patron d'évolution des pertes de rendement similaire à celui obtenu à la récolte a été observé à l'entreposage avec des valeurs qui diminuent à mesure que les apports de P augmentent.

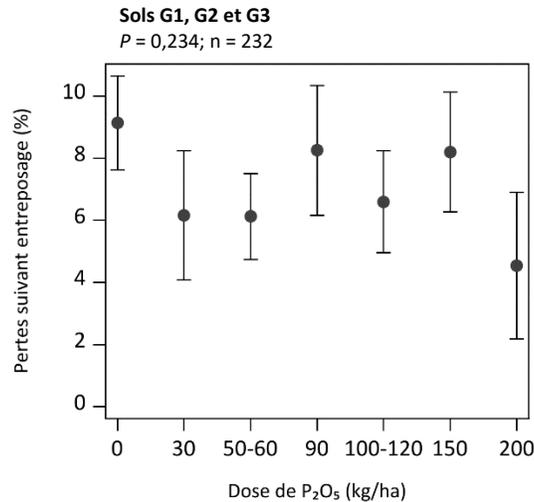


Figure 24. Pertes de rendements à l'entreposage en fonction de la dose de phosphore appliquée. Les moyennes présentées sont les valeurs estimées du modèle statistique. Les barres représentent les erreurs-types. G1 : sols à texture fine. G2 : sols à texture moyenne. G3 : sols à texture grossière. n : nombre d'observations.

3.3 Diagnostic nutritionnel et exportations en phosphore

Les valeurs calculées d'humidité, de concentrations et d'exportations en P₂O₅ en fonction du diagnostic nutritionnel sont présentées au Tableau 17 et à la Figure 25. De même que pour le N, le diagnostic nutritionnel et les exportations n'ont pu être calculés que sur la biomasse racinaire uniquement étant donné l'absence de données sur les rendements du feuillage. Toutes les valeurs présentées considèrent les racines seulement et ne tiennent pas compte du feuillage.

La concentration en P₂O₅ de la population de tête, présentant des hauts rendements et à l'équilibre nutritionnel, a été en moyenne de $1,17 \pm 0,06$ kg de P₂O₅ par tonne humide de rutabaga. Cette concentration en P₂O₅ a résulté en une exportation moyenne, à l'hectare, de 95 kg de P₂O₅ pour un rendement humide total de 79 909 kg/ha, avec des valeurs qui ont varié entre 74 et 110 kg/ha de P₂O₅. Les données de la Figure 25 montrent que les exportations en P₂O₅ du rutabaga ont augmenté de façon assez linéaire avec les rendements. Cette faible variabilité dans la concentration pourrait être attribuable à l'utilisation d'un seul cultivar dans le cadre des essais, soit le Thomson Laurentian. Pour de plus faibles rendements (sous-groupe d'individus à faible rendement et à l'équilibre nutritionnel; 67 147 kg humide/ha), les exportations ont diminué à 79 kg/ha de P₂O₅ en moyenne. La concentration mesurée dans la présente étude est comparable, bien que légèrement inférieure, à celle de $1,30 \pm 0,39$ kg P₂O₅/t humide (92 % d'humidité) présentée dans l'actuel guide de référence en fertilisation du CRAAQ (2010), correspondant à 1,95 kg P₂O₅/t humide lorsque rapportée à 88 % d'humidité. Elle est également très similaire à la valeur de 1,18 kg/t humide (2,6 lb/t) rapportée par Warncke et al. (2004) au Michigan pour la culture du rutabaga.

Tableau 17. Concentrations et exportations en P₂O₅ du rutabaga selon le diagnostic nutritionnel

	Humidité			Exportations ^{1,2}			
	(%)	(kg P ₂ O ₅ /t humide)		(kg P ₂ O ₅ /ha)			
		Moy	Éc-T	Moy	Med	Min	Max
Haut rendement et équilibre nutritionnel (« population de tête »)	88	1,17	0,06	95	95	74	110
Faible rendement et équilibre nutritionnel	86	1,16	0,20	79	80	64	102
Faible rendement et déséquilibre nutritionnel	87	0,96	0,21	50	49	23	102
Haut rendement et déséquilibre nutritionnel	88	0,98	0,19	74	71	59	94

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

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

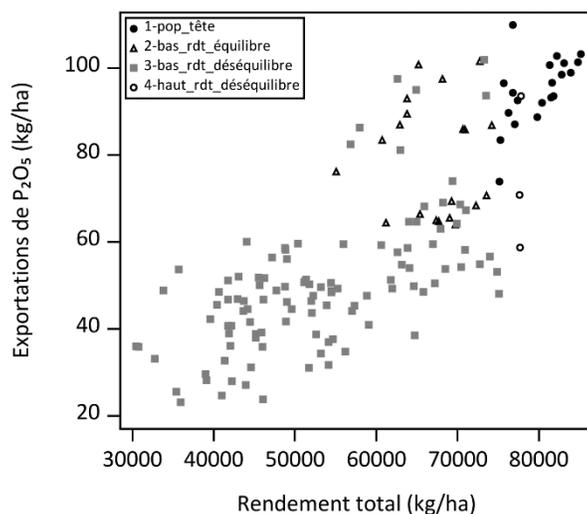


Figure 25. Exportations de phosphore du rutabaga en fonction des rendements totaux selon le diagnostic nutritionnel. Les exportations ont été calculées sur les racines seulement et ne tiennent pas compte du feuillage.

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

Les valeurs scientifiques de référence en fertilisation (VSRF) de P₂O₅ proposées pour la culture du rutabaga sont présentées au Tableau 18. En raison de l'absence d'effet de la fertilisation phosphatée sur le calibre des rutabagas récoltés, leurs calculs ont été basés sur les rendements en rutabagas de calibres 1 et 2 (diamètre de 5 à 14 cm). Toutefois, ces VSRF sont considérées adéquates et sécuritaires, indépendamment du marché visé. Dans l'ensemble, les résultats des analyses complémentaires montrent que la fertilisation phosphatée n'a influencé ni le développement du feuillage, ni la robustesse de son attache, ni les pertes à la récolte ou à l'entreposage. Par conséquent, les VSRF reposent sur l'effet des doses de P₂O₅ sur les rendements.

La détermination des classes de fertilité de sol est basée sur l'indice de saturation en phosphore des sols (ISP₁) et sur les groupes de textures de sols, deux paramètres influençant significativement la dynamique du P et donc

sa disponibilité dans les sols (Giroux et al., 2002; Parent et al., 2002). Le choix de l'ISP₁ comme indicateur, en lieu et place du P_{M3}, découle du fait que l'ISP₁ (P_{M3}/Al_{M3}) est un indicateur agroenvironnemental plus fiable et plus performant que la seule considération du P_{M3} afin d'évaluer la disponibilité du P (Khiari et al., 2000). Cela permet de favoriser la protection de l'environnement en réduisant les risques de pertes de P des sols agricoles vers les ressources en eaux souterraines et de surfaciques.

Dans les sols du groupe de textures G1, quatre classes de fertilité de sol ont été distinguées selon l'ISP₁ : 1) inférieur ou égal à 3,8 %, 2) entre 3,9 et 7,5 %, 3) entre 7,6 % et 15,0 % et 4) supérieur à 15,0 %. Pour la première classe de fertilité regroupant les sols ayant un ISP₁ égal ou inférieur à 3,8 %, la dose optimale de 150 kg P₂O₅/ha est proposée, laquelle se démarque des doses inférieures par l'obtention d'importants gains par rapport au témoin et aux autres doses. Il est important de préciser que pour ces sols, aucune donnée n'était disponible en dessous d'un ISP₁ de 2,7 %. Ainsi, la dose de 150 kg P₂O₅/ha obtenue pour les sols ayant un ISP₁ compris entre 2,7 % et 3,8 % a été étendue pour les sols ayant un ISP₁ inférieurs à 2,7 %. Cette décision repose sur le fait que la dose de 150 kg/ha couvre largement les exportations en P₂O₅ de la culture, lesquelles sont en moyenne de 92 kg/ha avec un plafond à 110 kg/ha. L'apport de 150 kg/ha est donc jugé largement suffisant pour couvrir les besoins en P₂O₅ de la culture, même dans les sols très faiblement saturés en P. En effet, dans ces sols, un apport de P par la fertilisation pourrait être nécessaire afin de réduire les risques de perte de rendement et de baisse de la fertilité du sol à moyen ou à long terme. Cet apport permettrait donc l'adoption d'un bilan équilibré, ce qui permettrait d'éviter une baisse du P disponible à la suite de la transformation du P dans le sol et des exportations par la plante. En effet, selon une étude de Giroux et al. (2002), un apport de P inférieur aux exportations des cultures entraînerait une diminution de la teneur en P disponible dans les sols déjà faiblement saturés en P. Ainsi, un bilan équilibré ou modérément excédentaire serait nécessaire afin de maintenir le même niveau de fertilité phosphatée, et surtout, la même quantité de P disponible en solution pour lequel la dynamique est affectée plus rapidement (ou fortement) que celle de l'ISP₁ (Zheng et al., 2003). Dans les sols ayant un ISP₁ compris entre 3,9 et 7,5 %, la dose agronomique optimale de 50 kg P₂O₅/ha est recommandée. Cette dose est toutefois faible par rapport à celle proposée dans la classe de fertilité précédente de 150 kg P₂O₅/ha, soit trois fois moins. Pour les sols ayant un ISP₁ compris entre 7,6 et 15,0 %, la dose de 30 kg P₂O₅/ha, soit la plus petite dose testée dans cette catégorie de sols est recommandée en absence de différence entre les traitements. Dans la dernière classe de fertilité regroupant les sols d'ISP₁ au-delà de 15,0 %, un apport entre 0 à 30 kg P₂O₅/ha est proposée. Pour ces sols, une dose nulle est également suggérée, considérant l'absence complète de gain de rendement suivant des apports d'engrais sur ces sols saturés en P.

Dans les sols des groupes de textures G2-G3, cinq classes de fertilité de sol ont été distinguées selon l'ISP₁ : 1) inférieur ou égal à 3,1 %, 2) entre 3,2 et 8,9 %, 3) entre 9,0 et 13,3 %, 4) entre 13,4 et 17,8 % et 5) supérieur à 17,8 %. En dessous d'un ISP₁ de 3,1 %, la dose optimale de 150 kg P₂O₅/ha est proposée. Tel que mentionné pour les sols G1, dans les sols G2-G3, aucune donnée n'a été disponible en dessous d'un ISP₁ de 1,3 %. La dose de 150 kg/ha de P₂O₅ obtenue pour les sols ayant un ISP₁ compris entre 1,33 % et 3,12 % a donc été également proposée pour ces sols pour les mêmes motifs qu'énoncé précédemment pour les sols G1. Dans les sols ayant un ISP₁ compris entre 3,1 % et 8,9 % et entre 9,0 et 13,3 % respectivement, les doses agronomiques optimales de 100 et de 50 kg P₂O₅/ha sont recommandées. Pour les sols ayant un ISP₁ compris entre 13,4 et 17,8 %, l'absence de données en quantité suffisante n'a pas permis de déterminer une VSRF sur la base des analyses statistique car un seul bloc d'un site a été disponible. En absence de données, la dose de 30 kg/ha de P₂O₅ est

donc proposée pour cette classe de fertilité de sol. Cette dose correspond à la plus petite dose testée sur ces sols et aussi à la dose inférieure à celle optimale pour la classe de fertilité précédente (ISP₁ de 9,0 – 13,3 %). De plus, la dose de 30 kg/ha de P₂O₅ a été également proposée au lieu d’une dose nulle en raison de la réponse significative à la fertilisation phosphatée observée dans 3 classes de fertilité précédentes.

Finalement, dans la dernière classe de fertilité regroupant les sols ayant un ISP₁ au-delà de 17,8 %, un apport allant de 0-30 kg P₂O₅/ha est proposée. Pour ces sols, la dose nulle est également recommandée en raison de l’absence de gains rendement, suivant les apports de P et en raison du fait que ces sols, étant saturés en P, ont théoriquement la capacité de fournir une partie des besoins en P de la culture.

L’intervalle des VSRF proposées dans le cadre de cette étude, soit de 0 à 150 kg/ha de P₂O₅, est similaire à celui recommandé actuellement au Québec (CRAAQ, 2010), variant de 20 à 150 kg/ha, selon le teneur en P_{M3} du sol (Tableau 19). Toutefois, dans les sols du groupe de textures G1, ayant un ISP₁ > 3,8 %, les doses proposées dans la présente étude sont généralement plus faibles que celles utilisées actuellement au Québec. Comparativement aux grilles de fertilisation étrangères présentées dans le Tableau 19, les présentes VSRF sont généralement similaires, à l’exception de la grille albertaine, où les doses sont plus élevées (variant de 176 à 266 kg/ha).

Tableau 18. Fertilisation phosphatée du rutabaga – Valeurs scientifiques de référence en fertilisation

Groupe de textures ¹	Classe de fertilité ISP ₁ (%) ²	Période d’application	VSRF ³ (kg P ₂ O ₅ /ha)
G1	≤ 3,8	Au semis	150 ^{4,5}
	3,9 – 7,5		50 ⁶
	7,6 – 15,0		30 ⁶
	> 15,0		0-30 ^{6,7}
G2, G3	≤ 3,1	Au semis	150 ⁴
	3,2 – 8,9		100 ⁴
	9,0 – 13,3		60 ⁴
	13,4 – 17,8		30 ⁶
	> 17,8		0-30 ^{6,7}

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

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

³ VSRF : Valeurs scientifiques de référence en fertilisation.

⁴ Dose agronomique optimale pour cette catégorie de sols.

⁵ Dans cette catégorie de sols, l’ISP₁ le plus faible a été 2,7 %.

⁶ Plus petite dose testée pour cette catégorie de sol étant donnée l’absence de différence significative entre les traitements.

⁷ Intervalle proposant un apport nul, considérant l’absence probable de gain par la fertilisation dans cette catégorie de sols.

Sols G1 : absence de données en dessous d'un d'ISP₁ 2,7 %

Dans les sols du groupe de textures G1, aucun des sites ne présentait un ISP₁ inférieur à 2,7 %. La dose de 150 kg/ha de P₂O₅, obtenue pour sols ayant un ISP₁ compris entre 2,7 et 3,8 %, a donc été également proposée pour ces sols. Cette décision est basée sur le fait que cette dose couvre largement les exportations en P₂O₅ de la culture qui sont en moyennes de 92 kg/ha, mais qui atteignent 110 kg/ha. Cette dose a donc été jugée suffisante pour couvrir les besoins en P₂O₅ de la culture pour cette catégorie de sols.

Sols G1 : important écart entre la dose proposée dans les sols ayant un ISP₁ < 3,8 % et celle de la classe de fertilité subséquente

La dose optimale de 150 kg P₂O₅/ha obtenue pour les sols G1 ayant un ISP₁ inférieur à 3,8 % triple celle de 50 kg/ha obtenue pour la classe de fertilité suivante (3,8 % ≤ ISP₁ ≤ 7,5 %). Il en résulte un grand écart entre les VSRF proposées pour deux sols dont les taux de saturation en P se trouvent de part et d'autre du seuil de 3,8 %. Considérant le fait que l'ISP₁ maximal des sols se trouvant dans la première classe de fertilité est de 3,3 %, une classe de fertilité intermédiaire pourrait être créée dans laquelle les exportations moyennes en P₂O₅ de la culture (95 kg P₂O₅/ha) seraient proposée. Les VSRF suivantes seraient donc proposées en alternative dans les sols du groupe G1.



Groupe de textures	Classe de fertilité ISP ₁ (%)	Période d'application	VSRF (kg P ₂ O ₅ /ha)
G1	≤ 3,4	Au semis	150
	3,5-5,4	Au semis	(95)*
	5,5 – 7,5	Au semis	50
	7,6 – 15,0	Au semis	30
	> 15,0	Au semis	0-30

*Note : Dose proposée, basée sur les exportations moyennes en P₂O₅ de la culture s'élevant à 95 kg P₂O₅/ha.

Sols G2-G3 ayant entre 13,3 et 17,8 % d'ISP₁

Un seul bloc d'un site a eu un ISP₁ compris entre 13,3 et 17,8 %. En absence de données, la dose de 30 kg/ha de P₂O₅ est proposée pour cette classe de fertilité en raison du fait que ces sols, étant saturés en P (ISP₁ > 13,1 %), ont théoriquement la capacité de fournir une partie des besoins en P de la culture.

Répartition des groupes de texture de sols à travers les régions

Les essais de rutabaga ont été réalisés dans deux régions du Québec : 1) Chaudière-Appalaches et 2) Lanaudière. Les sols du groupe de textures G1 ont été testés exclusivement dans région de Lanaudière. À l'opposé, sept des huit essais établis sur les sols G2 et G3 ont été localisés dans la région de Chaudière-Appalaches. Par conséquent, les résultats obtenus pourraient refléter un effet confondant de régions et de groupes de textures de sol.

Tableau 19. Comparaison des recommandations en P₂O₅ pour la production du rutabaga au Canada et aux États-Unis

Provinces/États	Mode et période d'application	Fractionnement	Indicateurs de Fertilité du sol	Dose P ₂ O ₅ (kg/ha)	Source
Québec (CAN)	-	-	0-50 kg P _{M3} /ha	150	CRAAQ (2010)
			51-100	135	
			101-150	125	
			151-200	110	
			201-300	90	
			301-400	60	
Ontario (CAN)	À la volée avant le semis et incorporé	non	P du sol (Polsen)	0-180	MAAARO (2011)
Alberta (CAN)		non		176-266	Alberta Agriculture and Rural Developpement (2014)
Michigan (É-U)	À la volée, incorporé avant le semis ou en bande au semis	non	P du sol	0-168	Warncke et al. (2004)
Mid-Atlantic (É-U)	À la volée et incorporé	non	P du sol (PM3)	0- 168	Virginia Cooperative Extension (2020)
Nouvelle Angleterre (É-U)	À la volée et incorporé	non	P du sol	0-168	University of Massachusetts Amherst (2022)

4. FERTILISATION POTASSIQUE

4.1 Portrait et représentativité des données

La répartition des blocs des essais K du rutabaga selon différentes classes de propriétés de sol (0-20 cm) est présentée au Tableau 20. De même que dans les essais N et P, les essais K ont été réalisés majoritairement sur des sols de textures fines (50 %), suivis de ceux de textures moyennes (30 %) et de ceux de textures grossières (20 %). En effet, un peu plus de la moitié des blocs (55 %) avait une teneur en argile inférieure à 30 %, alors que le reste avait entre 30 et 50 % d'argile. Tel que mentionné pour les essais N et P, la répartition des groupes de textures sur lesquels ont été réalisés les essais a particulièrement varié en fonction de la région : en effet tous les sols des groupes de textures G1 étaient situés dans Lanaudière, tandis que 7 des 8 sites établis sur des sols G2-G3 étaient situés dans Chaudière-Appalaches. Par conséquent, les résultats de cette étude pourraient refléter un effet de région combiné à celui des groupes de textures de sol. Toutes textures de sols confondues, seulement 18 % des blocs avaient un pH compris entre 6,0 et 6,5, tandis que 8 % et 73 % des blocs se situaient respectivement en dessous et au-dessus de cet intervalle. Un pH de 6,5 (CRAAQ, 2010) ou de 6,1 à 6,5 (MAARO, 2011) serait optimal pour la bonne croissance de cette culture. Pour les sols à textures fines (G1), les teneurs en K_{M3} s'étendaient de 97 à 400 ppm. Moins de 1 % des blocs avait une teneur en K_{M3} inférieure à 100 ppm, 54 % avaient entre 101 et 200 ppm, 24 % entre 201 et 300 ppm et 22 % avaient plus de 300 ppm. Pour les sols de textures moyennes à grossières (G2 et G3), les teneurs en K_{M3} variaient entre 45 et 180 ppm. De ceux-ci, 41 % contenaient moins de 100 ppm de K_{M3} et 59 % se trouvaient dans l'intervalle de 101 à 180 ppm de K_{M3} . Cette forte proportion de sols peu pourvus en K_{M3} est propice à la détection d'une réponse à la fertilisation potassique. Cependant, au-delà de 180 ppm K_{M3} , aucune donnée n'était disponible dans les sols de textures moyennes à grossières, limitant l'étude dans les sols mieux pourvus en K.

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} ² (ppm)	Blocs (%)		Groupe de textures ³	Blocs (%)	Teneur en argile (%)	Blocs (%)
			G1	G2-G3				
< 6,0	8	≤ 100	< 1	41	G1	50	≤ 30	55
6,0 – 6,5	18	> 100 – 200	54	59	G2	30	> 30 – 50	45
6,5 – 7,0	45	> 200 – 300	24	0	G3	20	> 50	0
> 7,0	28	> 300	22	0	-	-	-	-

¹ Le pH adéquat pour la culture de rutabaga est de 6,5 (CRAAQ, 2010).

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

³ 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 Impact de la fertilisation borique sur la réponse de la culture à la fertilisation potassique

Selon la littérature scientifique (Hadas et Hagin, 1972; Watson, 1972), une interaction pourrait exister entre les prélèvements en B et en K chez le rutabaga. La tendance exacte de cette interaction reste toutefois indéterminée et peu documentée. Ainsi, en raison de la disparité existante entre les sites d'essais en rapport à leur fertilisation en B, une comparaison visuelle de la réponse au K entre les différents sites d'essais a été effectuée (Figure 26). De manière générale, l'exploration des données montre que la réponse du rutabaga à la fertilisation en K est similaire, ainsi que les rendements atteints, indépendamment de fait que du B ait été appliqué ou non.

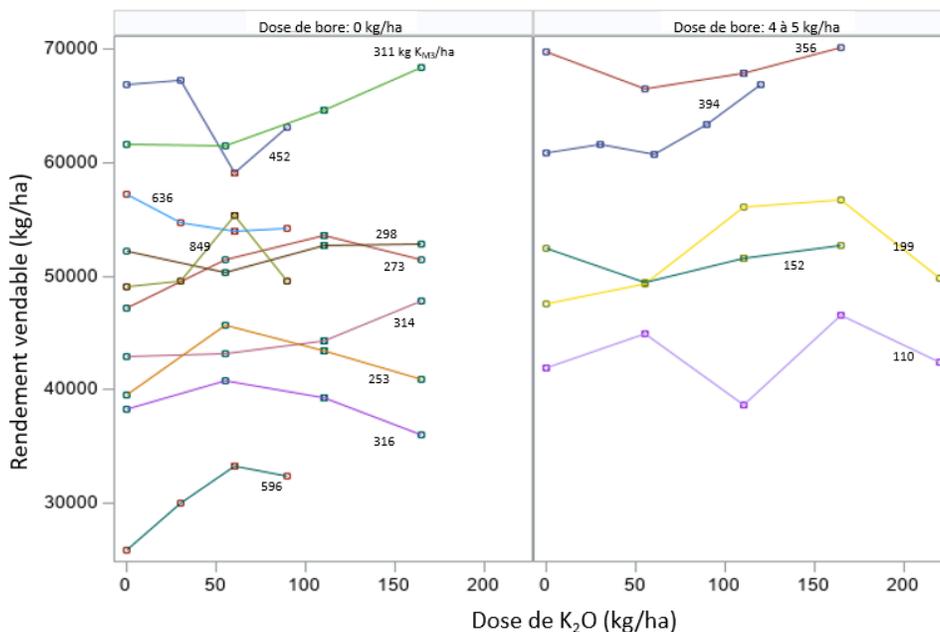


Figure 26. Réponse du rutabaga à la fertilisation potassique selon que les sites aient été non fertilisés (à gauche) ou fertilisés (à droite) en bore. Les étiquettes correspondent aux teneurs moyennes en K_{M3} du sol des sites, exprimées en kg/ha. K_{M3} : K extrait par la méthode Mehlich-3 (1984).

4.2.2 Recherche d'indicateurs de fertilité du sol

Plusieurs facteurs peuvent influencer la biodisponibilité du K dans le sol et par conséquent, influencer la réponse des cultures 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).

La fertilisation en K n'a pas eu un effet significatif sur les calibres (voir section 4.2.4.1). De plus, la réponse à la fertilisation potassique s'est montrée similaire peu importe la variable étudiée, c'est-à-dire le rendement

vendable (calibres 1, 2 et 3) ou le rendement des calibres 1 et 2. Conséquemment, dans le but d’alléger la présentation du chapitre, et comme ce sont généralement les calibres 1 et 2 (diamètre de 5 à 14 cm) qui sont préconisés en contexte de production québécoise, seuls les seuils obtenus pour le rendement des calibres 1 et 2 sont présentés et font l’objet des analyses. Toutefois, il convient de souligner que les résultats sont considérés valides et applicables peu importe les calibres visés.

Les potentiels indicateurs de fertilité du sol, les seuils de réponse à la fertilisation potassique du rutabaga, ainsi que les paramètres statistiques des tests de Cate-Nelson sont présentés au Tableau 21. Parmi les indicateurs testés, la teneur en K_{M3} s’est avérée être le principal indicateur potentiel de prédiction de la fertilité du sol. Lorsque les données étaient considérées sans tenir compte du groupe de textures, un seuil de réponse de 156 ppm a été obtenu.

Tableau 21. Valeurs critiques des indicateurs de sols significatifs selon les tests de Cate-Nelson pour les essais K du rutabaga.

Indicateur de sol	Groupe de textures ²	N ³	Valeur critique (ppm)	RRel (%) ⁴	Sensitivité	Spécificité	Précision	P
K Mehlich-3	G1, G2, G3	45	155,5	91	0,56	0,70	0,56	0,122

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

³ Nombre d’observations.

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

4.2.3 Effet de la dose de potassium sur le rendement

Les résultats des ANOVA des essais K du rutabaga sont présentés à la Figure 27 (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. De manière générale, les résultats des analyses ont montré une absence d’effet significatif de la fertilisation potassique sur les rendements (Figure 27). De même, de faibles pourcentages de gain de rendements ont été observé en comparaison à l’azote (section 2.2.2) et au phosphore (section 3.2.2).

Tout d’abord, une ANOVA a été effectuée sans tenir compte des indicateurs de fertilité du sol afin de visualiser globalement l’effet de la fertilisation sur le rapport de rendements (ROM) de la culture (Figure 27A). Ce modèle (A) a démontré une absence de réponse de la culture à l’apport des doses croissantes de K_2O ($P = 0,337$, $n = 210$). Le deuxième modèle (B) considère la réponse du rutabaga à la fertilisation potassique selon le groupe de textures du sol (G1 vs. G2-G3). Une fois de plus, la fertilisation en K n’a pas eu d’effet significatif sur les rapports de rendements tant dans les sols G1 ($P = 0,312$; $n = 107$, gains entre 2,2 et 11,3 %) que dans ceux G2-G3 ($P = 0,278$; $n = 103$, gains entre 0 et 6,3 %). De plus, les gains de rendement moyens ont été faibles dans les deux groupes (5,3 et 2,8 % respectivement dans G1 et G2-G3).

Dans le dernier modèle (C), les analyses ont été réalisées en tenant compte de la teneur en K_{M3} du sol. En raison du comportement similaire du rutabaga à la fertilisation potassique dans les sols G1 et G2-G3, le seuil de réponse de 155,5 ppm obtenu pour tous les sols indépendamment de leur texture a été retenu pour la suite des analyses (Figure 27C). En considérant l’ensemble des sites, la teneur minimale en K_{M3} du sol était de 44,7 ppm K_{M3} , seuil

sous lequel aucune analyse n'a pu être effectuée en raison de l'absence de données. Pour les sols ayant une teneur en K_{M3} comprise entre 44,7 et 155,5 ppm, l'effet de la fertilisation a été non significatif ($P = 0,365$; $n = 116$). L'apport de la plus petite dose testée (50-60 kg K_2O /ha) a été suffisant pour l'obtention du rendement agronomique optimal et le gain de rendement moyen faible (1,8 %). Dans les sols de plus de 155 ppm K_{M3} , aucune réponse de la culture à la fertilisation n'a été observée. Cela traduit que l'apport de 30 kg K_2O /ha serait suffisant pour l'obtention du rendement optimal, avec un gain de rendements moyen faible de 1,3 %.

Les résultats obtenus sont conformes à plusieurs études présentes dans la littérature scientifique, dont certaines récentes (ex. Cutcliffe et Munro, 1973; Cutcliffe et Sanderson, 1989; Thomsen et al., 2017), qui ont également démontré que d'une manière générale, la fertilisation potassique n'affecte pas de manière significative le rendement vendable du rutabaga. Ces résultats sont aussi en accord avec la grille de référence en fertilisation des provinces atlantiques (Tableau 25) qui recommande un apport de 0 kg K_2O /ha en absence de réponse de la culture au potassium. Il existe cependant certaines études plus anciennes qui rapportent un effet positif de la fertilisation potassique sur le rendement du rutabaga (Macleod et al. 1971), dont celle de Reith et Inkson (1963) qui ont déterminé des doses optimales variant entre 108 et 131 kg K_2O /ha (96 à 117 lb K_2O /ac).

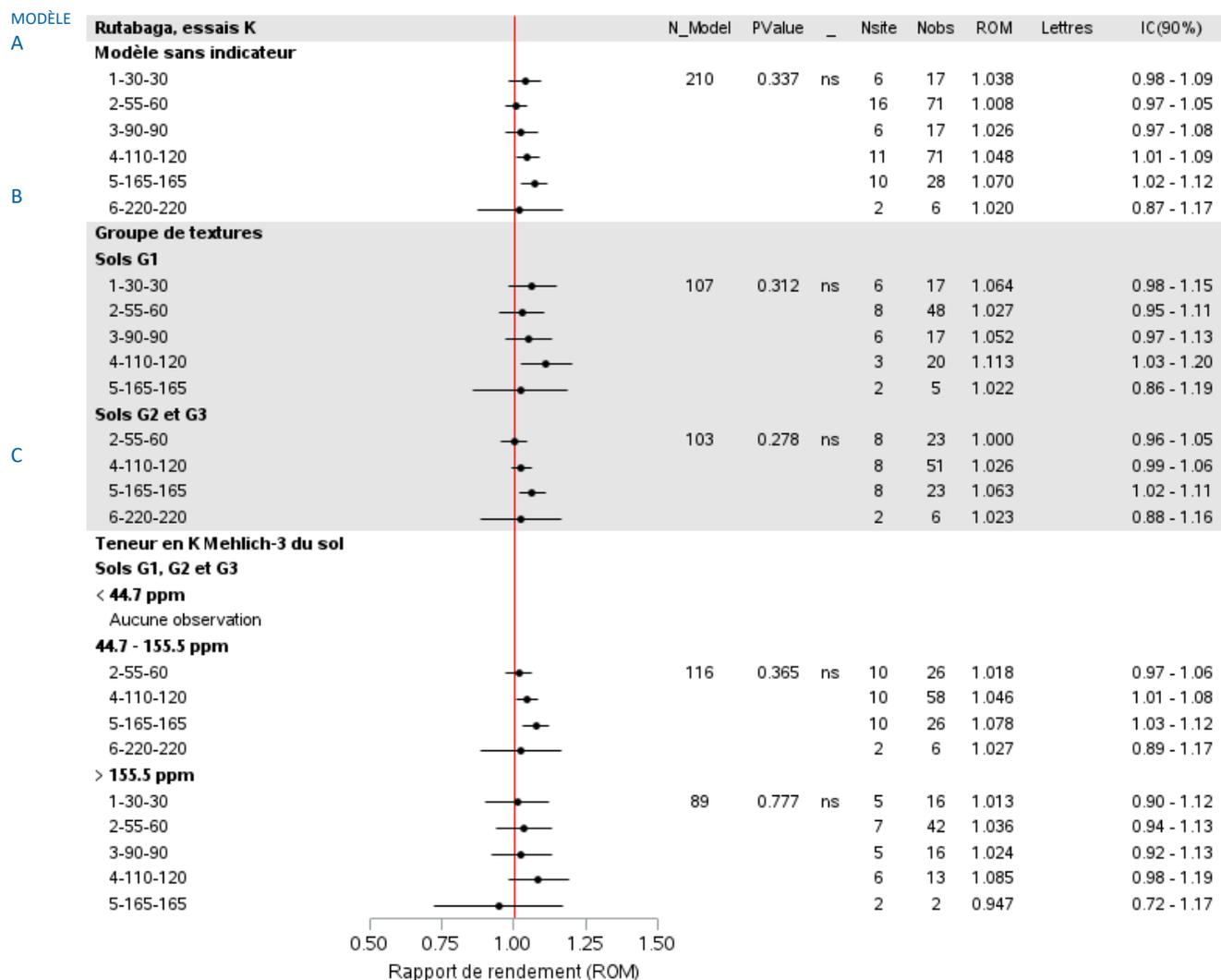


Figure 27. Résultats des analyses de variance sur la réponse du rutabaga aux doses croissantes de potassium.

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 $P < 0,12$.

4.2.4 Effet de la dose de potassium sur les calibres, l'état du feuillage, la qualité, les pertes à la récolte et les pertes à l'entreposage

4.2.4.1 Calibres à la récolte

De même que pour les essais N et P, les rutabagas ont été classés à la récolte en trois catégories selon leur diamètre (Tableau 8). Les ANOVA ont été effectuées en considérant la proportion du rendement qu'ont représentés les rutabagas de calibres 1 et 2 (diamètre compris entre 5 et 14 cm), par rapport à l'ensemble du rendement vendable (> 5 cm).

La fertilisation potassique n’a exercé aucune influence sur le calibre du rutabaga indépendamment de la teneur en K_{M3} du sol et de sa texture ($P = 0,981$). Telle qu’illustrées sur Figure 28, les proportions du rendement vendable que représentent les calibres 1 et 2 vs. 3 sont similaires entre les doses appliquées. Toutes textures confondues, les proportions de rutabaga ayant un calibre supérieur à 14 cm étaient similaires entre les différents traitements de K_2O et ont été en moyenne de 7 % (intervalle de 6 à 8 %). Ces résultats sont assez en accord avec les observations de la section 4.2.3, où aucune augmentation de rendement n’a été perceptible suivant les apports de fertilisation potassique. En raison de cette absence d’effet, aucun ajustement des doses de K_2O recommandées ne serait donc nécessaire selon ce paramètre. Une étude de Reith et Inkson (1963) avait également montré que la fertilisation potassique n’influait pas les calibres des rutabagas.

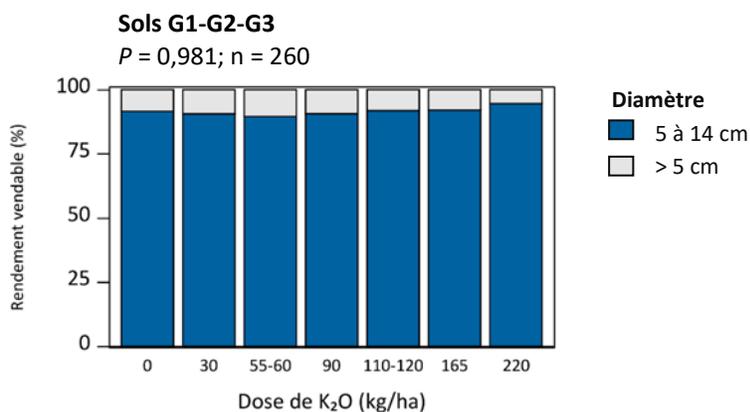


Figure 28. Calibres à la récolte selon les doses de potassium. G1 : sols à texture fine. G2 : sols à texture moyenne. G3 : sols à texture grossière. n: nombre d’observations.

4.2.4.2 État du feuillage du rutabaga à la récolte

Robustesse de l’attache du feuillage

La robustesse de l’attache du feuillage a été évaluée dans le cadre des essais de fertilisation selon les mêmes critères que pour les essais d’azote et de phosphore. Les détails relatifs à cette évaluation peuvent être consultés dans les sections 1.8.4 et 2.2.3.2. Les résultats sont présentés à la Figure 29.

La dose de K n’a pas eu d’effet sur la robustesse de l’attache du feuillage de part et d’autre du seuil de réponse de 155,5 ppm de K_{M3} (Figure 29). La robustesse de l’attache du feuillage a varié de moyenne (cote 3) à très bonne (cote 2) dans la grande majorité (98,5 %) des parcelles. Dans les sols dont la teneur en K_{M3} est inférieure à 155,5 ppm, l’attache à la tige a été très bonne dans 18 % des parcelles, bonne à moyenne dans 49 % des parcelles et moyenne dans 30 % des parcelles. À l’opposé, l’attache a été classée moyenne à insuffisante (cote 4) dans seulement 3 % des parcelles. L’occurrence de l’insuffisance de l’attache du feuillage a été légèrement supérieure dans le traitement témoin. Toutefois, ce phénomène semble être lié à un effet de site, car il n’a été observé que dans un seul essai. Dans les sols de plus de 155,5 ppm de K_{M3} , aucun cas d’attache insuffisante (cotes 4 et 5) n’a été relevé. En moyenne, l’attache était très bonne dans 73 % des parcelles, bonne à moyenne dans 23 % des parcelles et moyenne dans 4 % des parcelles.

D’une manière globale, une meilleure attache du feuillage a été observée dans les sols mieux pourvus en K_{M3} (Figure 29), ce qui pourrait être attribuable à l’important rôle que joue le potassium dans le maintien de la

structure cellulaire des tissus de la plante (Cummings et Wilcox, 1968). La meilleure robustesse de l'attache du feuillage observée au-dessus du seuil de 155,5 ppm de K_{M3} coïncide également avec le fait qu'elle a été meilleure dans les sols G1, généralement plus riches en K que les sols G2-G3 (données non présentées). En effet, le pourcentage de parcelles montrant une très bonne attache du feuillage à la tige (cote 1) a été grandement supérieur dans les sols G1 (61 %) en comparaison à ceux G2-G3 (25 %). De plus, bien qu'observés sur très peu de parcelles, les cas d'insuffisance de la robustesse d'attache du feuillage sont survenus dans les sols G2. Par conséquent, cette observation pourrait également être liée à un effet de la texture du sol.

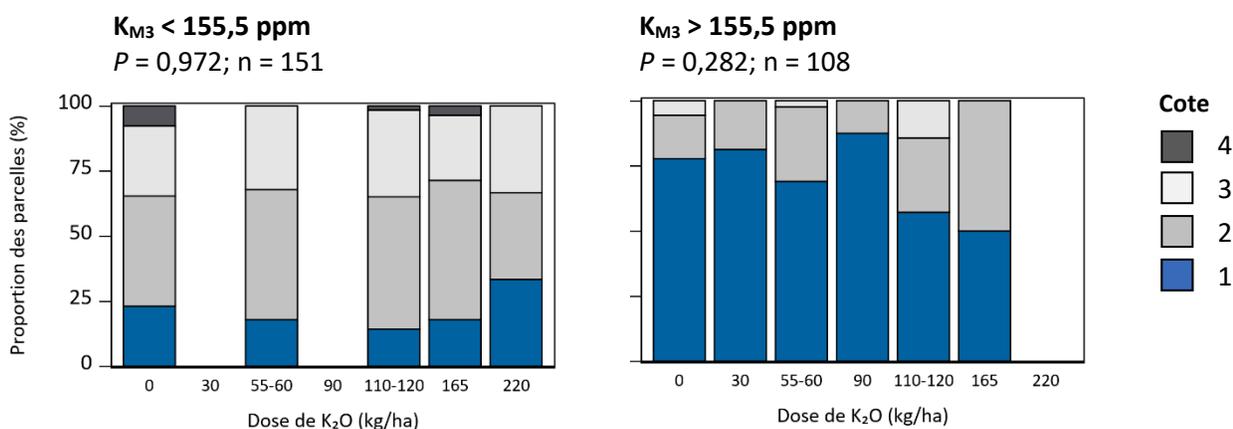


Figure 29. Évaluation de la robustesse de l'attache du feuillage selon la dose de potassium. 1 : très bonne attache. 2 : attache très bonne à moyenne. 3 : attache moyenne. 4 : attache moyenne à insuffisante. 5 : attache insuffisante. n : nombre d'observations. K_{M3} : K extrait par la méthode Mehlich-3 (1984).

Développement du feuillage

Tel qu'effectué dans les essais N et P, cinq niveaux de développement du feuillage ont également été attribués lors de l'étude de l'effet de la fertilisation potassique sur la qualité du feuillage du rutabaga. Les détails relatifs à cette évaluation peuvent être consultés à la section 1.8.4 (Tableau 9). Les résultats de cette évaluation sont présentés à la Figure 30.

En général, le développement du feuillage du rutabaga varie de moyennement dense (cote 3) à dense (cote 2) dans la grande majorité des parcelles. Tel que pour la robustesse de l'attache du feuillage, aucun effet de la fertilisation potassique n'a été observé de part et d'autre du seuil de réponse agronomique de 155,5 ppm de K_{M3} (Figure 30). De même, indépendamment de la dose de K_2O appliquée, le développement du feuillage a été meilleur dans les sols mieux pourvus en K_{M3} , où aucun cas d'insuffisance n'a été observé (Figure 30). Les cas d'insuffisance au niveau du développement du feuillage sont également survenus dans les sols G2-G3, bien qu'observés sur très peu d'unités expérimentales (données non-présentées).

En dessous du seuil de 155,5 ppm et indépendamment de la dose de K_2O appliquées, le feuillage a été très dense ou excessif (cote 1) dans seulement 3 % des parcelles, dense (cote 2) dans 26 % des parcelles, moyennement dense (cote 3) dans 62 % des parcelles et moyen à insuffisamment dense (cote 4) dans 9 % des parcelles. Contrairement à ce qui est attendu, dans cette catégorie de sol, la plus grande occurrence de l'insuffisance du

développement du feuillage (50 %) a été observée dans les parcelles recevant la plus forte dose de K₂O testée, 220 kg/ha. Ce pourcentage élevé pourrait probablement s’expliquer par le faible nombre d’observations disponibles pour cette dose dans la base de données (6 observations sur 259) comparativement aux autres groupes de doses (16 à 77 observations chacun). Il est également important de souligner que les sites présentant un développement du feuillage inadéquat ont été les mêmes ayant montré des cas d’insuffisance de la robustesse de l’attache du feuillage dans les essais N et P. Cela pourrait indiquer que cette lacune quant au développement du feuillage a reflété davantage un effet de site qu’un effet de la fertilisation.

Dans les sols ayant une teneur en K_{M3} supérieure à 155,5 ppm, aucune insuffisance du développement du feuillage (cotes 4 et 5) n’a été relevée dans le cadre de ces essais et les cas de développement excessif du feuillage ont été faibles, soit dans 6 % des parcelles. En moyenne, le développement du feuillage était classé dense dans 49 % des parcelles et moyennement dense ou suffisant dans 45 % des parcelles.

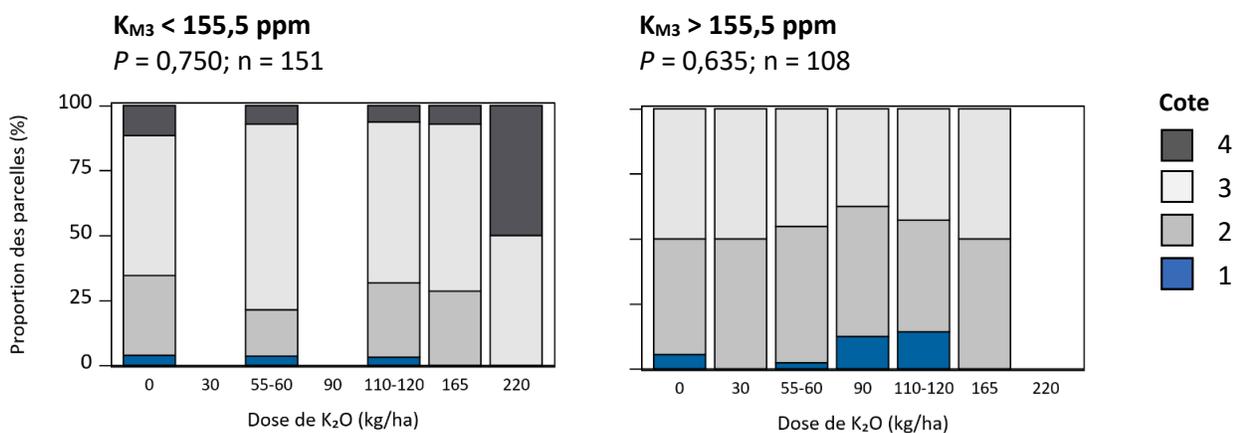


Figure 30. Évaluation du développement du feuillage selon les doses de potassium. 1 : feuillage très dense ou excessif. 2 : feuillage dense ou supérieur au besoin pour arrachage mécanique. 3 : feuillage moyen ou suffisant. 4 : feuillage moyen à insuffisamment dense. 5 : feuillage insuffisamment dense. n : nombre d’observations. K_{M3} : K extrait par la méthode Mehlich-3 (1984).

4.2.4.3 Qualité des rutabagas à la récolte et à l’entreposage

Cœur brun

De même que pour le N et le P, dans les essais K, l’évaluation de l’occurrence de l’apparition du problème de cœur brun a été effectuée à la récolte et après l’entreposage, à partir de 5 (PSEFCM) ou 10 (MIRVRF) échantillons. Pour des détails concernant la fertilisation en B des sites et l’analyse de la biomasse du rutabaga, voir la section 2.2.3.3. Dans la présente section, seule la richesse en K_{M3} du sol a été considérée pour interpréter les résultats en relation avec ceux des ANOVA sur le rendement. Les données d’évaluation collectées à la récolte et à l’entreposage ont également été analysées simultanément pour les mêmes raisons évoquées dans les chapitres des essais N et P. Les résultats de cette évaluation sont présentés à la Figure 31. Dans les sols ayant moins de 155,5 ppm K_{M3}, la fertilisation potassique a influencé significativement (P = 0,005) la fréquence d’apparition du cœur brun chez le rutabaga (Figure 31). La comparaison multiple des moyennes des traitements a montré que les apports supérieurs à 55-60 kg K₂O/ha avaient nui à la plante. Cette observation est en accord avec les résultats des ANOVA sur le rendement, où la dose de 55-60 kg K₂O/ha a été suffisante pour la nutrition en K de la culture.

Dans les sols ayant plus de 155,5 ppm de K_{M3} , l'effet de l'apport de K sur l'occurrence du symptôme de cœur brun n'a pas été statistiquement significatif. Malgré l'absence d'effet de la fertilisation, une plus grande proportion de parcelles a été touchée par ce problème. Cette observation soutient l'idée que l'augmentation de la disponibilité du K dans le sol pourrait augmenter la fréquence d'apparition du cœur brun chez le rutabaga.

Il est important de noter que contrairement à ce qui est observé dans la présente étude, où la disponibilité du K dans le sol augmente les probabilités d'apparition du cœur brun, Beauchamp and Hussain (1974) ont observé l'effet inverse. Selon ces derniers auteurs, une réduction de l'occurrence des symptômes du cœur brun serait attribuable à l'apport de K et cet effet serait dû à la diminution du ratio Ca/B dans la racine du rutabaga. Plusieurs études de la littérature (Beauchamp et Hussain, 1974; Hadas et Hagin, 1972; Watson, 1972; White-Stevens et Wessels, 1944) ont également rapporté que la disponibilité du K aurait un effet indirect sur l'apparition de symptôme du cœur brun chez les cultures en raison de la diminution du Ca disponible du sol et de son effet sur l'absorption du B par la plante. Toutefois, la tendance exacte de cet effet est indéterminée. En effet, en fonction des conditions initiales du sol récepteur (teneur en Ca ou en B), un apport de K peut diminuer ou augmenter l'absorption du bore chez les cultures. Par exemple, selon certaines études (Hadas et Hagin, 1972; Watson, 1972), l'apport de K peut diminuer l'absorption de B dans le cas où celui-ci serait faiblement disponible dans le sol, tandis que l'effet inverse est susceptible de se produire si sa disponibilité est initialement élevée dans le sol.

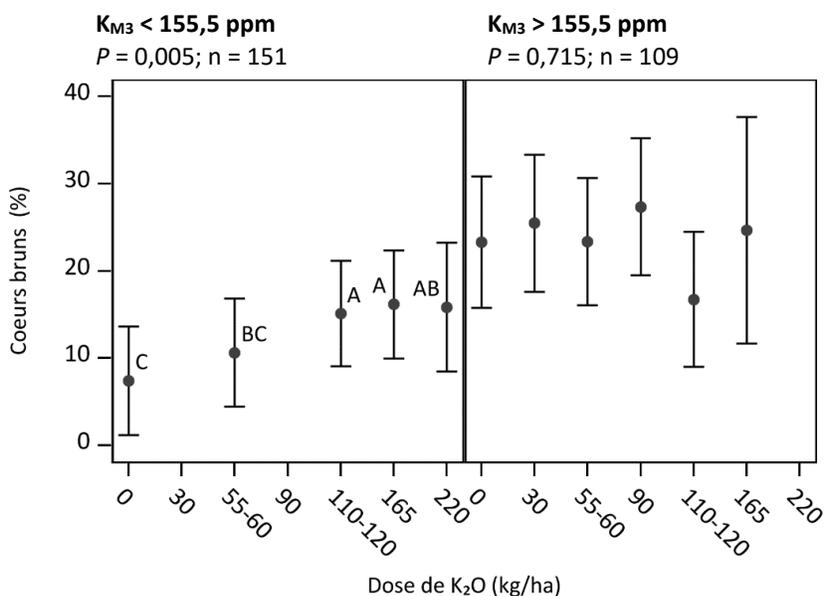


Figure 31. Effet de la dose de potassium sur l'apparition du cœur brun du rutabaga. L'évaluation de la qualité a été réalisée sur un échantillon de 5 ou 10 rutabagas à la récolte et à l'entreposage. Les moyennes suivies d'une même lettre ne diffèrent pas statistiquement (LSD, $P < 0,12$). Les barres représentent les erreurs-types. n : nombre d'observations. K_{M3} : K extrait par la méthode Mehlich-3 (1984).

Cœur creux

L'occurrence de l'apparition du problème de cœur creux a été investiguée lors des essais de fertilisation potassique du rutabaga à la récolte et après l'entreposage à partir de 5 (PSEFCM) à 10 (MIRVRF) échantillons. Les analyses de l'effet de la fertilisation en K sur l'occurrence du cœur creux chez le rutabaga ont été effectuées selon la teneur en K disponible du sol de façon à interpréter les résultats en relation avec ceux des ANOVA sur le rendement. Les données d'évaluation de l'occurrence du cœur creux à la récolte et à l'entreposage ont été analysées simultanément pour les raisons évoquées dans la section sur l'azote (voir section 2.2.3.3). Les résultats de cette évaluation sont présentés à la Figure 32.

Les résultats des analyses montrent que la fertilisation potassique n'a pas influencé significativement la fréquence d'apparition du cœur creux chez le rutabaga de part et d'autre du seuil 155,5 ppm de K_{M3} (Figure 32). Toutefois, en dessous du seuil de réponse de la culture à la fertilisation, l'occurrence du cœur creux a diminué avec l'augmentation des doses de K_2O appliquées, tandis qu'à l'opposé, lorsque la teneur en K_{M3} du sol est supérieure à 155,5 ppm, la fréquence d'occurrence du problème du cœur creux augmente avec l'augmentation des doses de K_2O appliquées. Bien que ces différences soient non significatives, celles-ci pourraient indiquer que dans les sols moins pourvus en K, l'apport de potassium permettrait de réduire la présence du cœur creux. À l'inverse, dans les sols ayant déjà une teneur adéquate en K disponible, un surplus de K pourrait nuire.

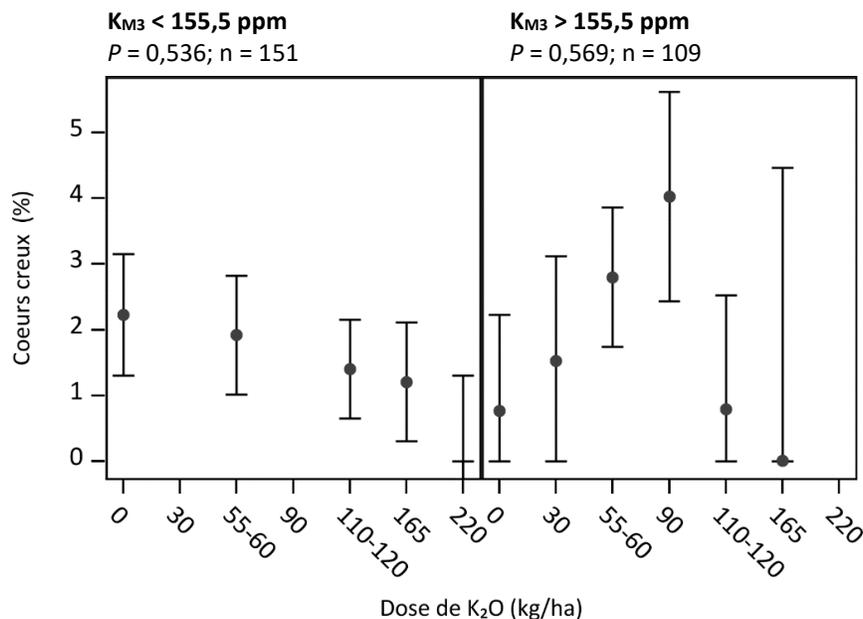


Figure 32. Effet de la dose de potassium sur l'apparition du cœur creux du rutabaga. L'évaluation de la qualité a été réalisée sur un échantillon de 5 ou 10 rutabagas à la récolte et à l'entreposage. Les barres représentent les erreurs-types. n : Nombre d'observations. K_{M3} : K extrait par la méthode Mehlich-3 (1984).

4.2.4.4 Pertes à la récolte

À l'instar des analyses de la section précédente, les pourcentages de pertes à la récolte ont été étudiés en considérant l'ensemble des données (G1, G2, G3). Les pourcentages du rendement vendable qu'ont représenté les pertes et les causes des pertes à la récolte sont présentés respectivement dans la Figure 33 et la Figure 34, respectivement. Les résultats de la Figure 34 sont présentés à des fins descriptives et qu'elles n'ont pas fait l'objet d'analyses statistiques.

La dose de K_2O n'a pas influencé significativement le pourcentage de pertes à la récolte de part et d'autre du seuil de 155,5 ppm de K_{M3} (Figure 33). Toutefois, les pertes moyennes ont été généralement plus faibles dans les sols moins pourvus en K_{M3} (< 155,5 ppm). Dans ces sols ayant moins de 155,5 ppm de K_{M3} , les pertes de rendement ont varié entre 2,1 et 3,1 % avec les doses respectives de 165 et 110 à 120 kg K_2O/ha . Les principales causes de pertes ont été l'immaturation et la présence de maladies, les deux comptant pour environ la moitié des pertes mesurées (Figure 34). D'autres causes de pertes non identifiées systématiquement lors de cette évaluation ont représenté environ le quart du rendement non-vendable. Au-delà du seuil de réponse de 155,5 ppm ($P = 0,553$), les pertes ont été généralement d'environ deux à trois fois plus élevées qu'en dessous du seuil, avec des valeurs allant de 5,4 et 8,9 % pour les doses respectives de 110 -120 et 30 kg K_2O/ha . Dans ces sols, la principale cause de pertes à la récolte a été la présence d'insectes, comptant pour environ la moitié des pertes mesurées.

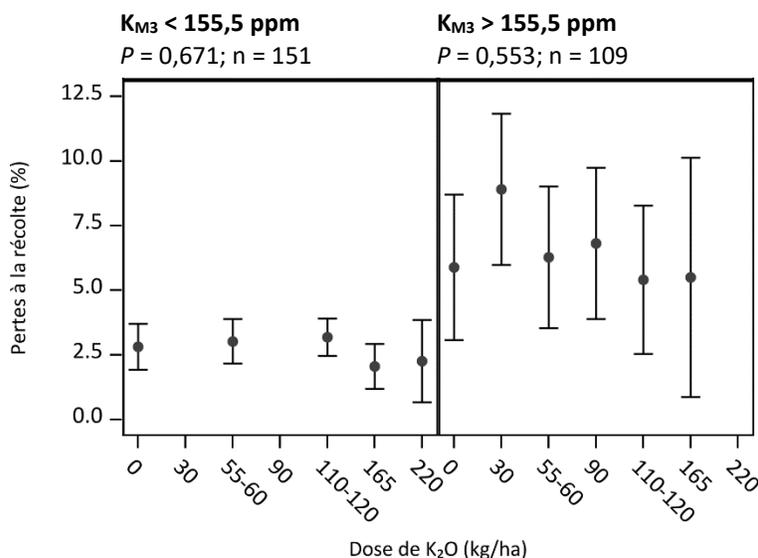


Figure 33. Pertes à la récolte en fonction des doses croissantes de potassium. Les barres représentent les erreurs-types. n : nombre d'observations. K_{M3} : K extrait par la méthode Mehlich-3 (1984).

Dans les deux classes de fertilité de sols, il a été constaté que la proportion des pertes dues aux malformations augmentait avec les doses de K_2O appliquées (Figure 34). Les causes expliquant cette relation entre la fertilisation potassique et l'apparition des malformations chez le rutabaga restent toutefois non encore documentées dans la littérature scientifique.

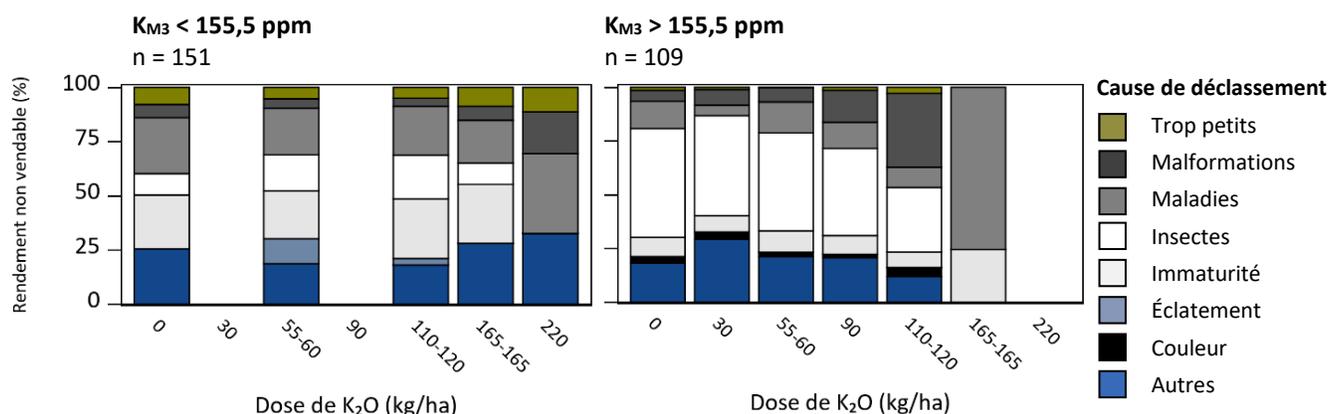


Figure 34. Répartition des pertes à la récolte en fonction des doses croissantes de K_2O . n = Nombre d'observations.
 K_{M3} : K extrait par la méthode Mehlich-3 (1984).

4.2.4.5 Pertes suivant l'entreposage

De même que pour les essais N et P, à l'issue des récoltes, les rutabagas ont été entreposées, lorsque possible, dans les mêmes conditions que celles du producteur chez qui l'essai a été réalisé. Lorsque les essais étaient réalisés en station de recherche, des conditions similaires aux conditions commerciales ont été reproduites. Toutefois, des conditions d'entreposage inadéquates ont parfois mené à des pourcentages de pertes hors-normes à certains sites ou pour certaines parcelles, entraînant leur exclusion du jeu de données. Suivant l'analyse exploratoire, 79 % de l'ensemble des données validées des essais K du rutabaga ont également eu des données validées pour l'analyse en entreposage. Tel que mentionné dans la section 1.8.4, les rutabagas ont été entreposés en moyenne 160 jours (148 à 179 jours) dans des conditions variées en fonction des installations disponibles sur les sites où les essais ont été réalisés. De même que pour les essais N et P, la température et le taux d'humidité à l'entreposage ont varié respectivement entre 1 et 4°C (moyenne de 1,9°C) et entre 70 et 95 % (moyenne de 86 %). Une température de 0°C et un taux d'humidité relative compris entre 95 et 100 % sont considérés adéquats pour l'entreposage des rutabagas (Alberta Agriculture and Rural Développement, 2014; MAAARO 2011).

Les résultats de l'analyse de l'effet de la fertilisation potassique sur les pertes de rutabagas à l'entreposage sont présentés à la Figure 35. En dessous du seuil de réponse à la fertilisation (155,5 ppm de K_{M3}), l'apport de K_2O tendait ($P = 0,117$) à influencer le pourcentage de pertes à l'entreposage (Figure 35). Toutefois, le patron de distribution des moyennes a été irrégulier et aucune tendance claire n'a pu être dégagée en fonction des doses appliquées. Au-delà du seuil de réponse, l'application de doses croissantes de K_2O n'a pas influencé

significativement les pertes suivant l'entreposage ($P = 0,202$). Cependant, bien que non significatif, les pertes ont diminué progressivement avec l'augmentation de la dose appliquée. Les pertes mesurées ont été relativement faibles et ont varié de 1,2 à 6,6 % pour les doses respectives de 165 et 30 kg K_2O /ha. Les principales causes des rejets ont été la pourriture du collet et le manque de fermeté. En général, ces résultats sont similaires à ceux de Cutcliffe et Sanderson (1989), qui ont montré que l'apport de K n'a pas eu d'effet significatif sur les pertes suivant l'entreposage.

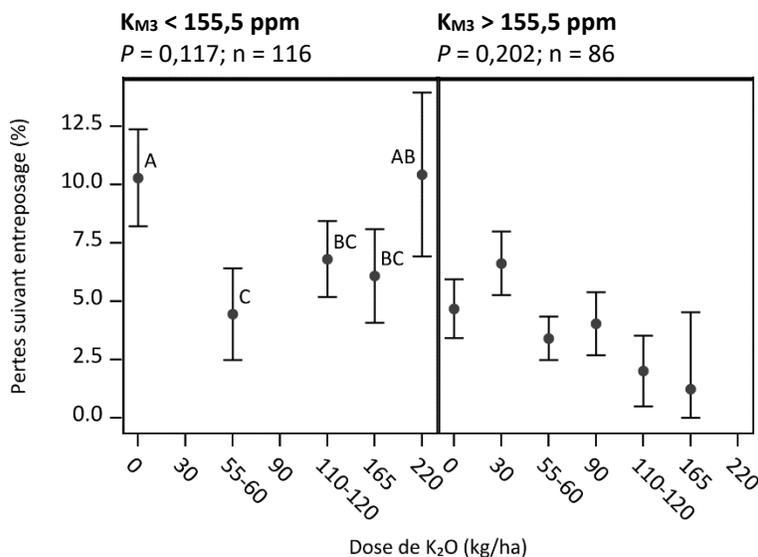


Figure 35. Pertes suivant une période d'entreposage en fonction des doses croissantes de potassium. Les moyennes présentées sont les valeurs estimées du modèle statistique. Les moyennes suivies d'une même lettre ne diffèrent pas statistiquement (LSD, $P < 0,12$). Les barres représentent les erreurs-types. n : nombre d'observations. K_{M3} : K extrait par la méthode Mehlich-3 (1984).

4.3 Diagnostic nutritionnel et exportations

À l'instar des essais précédents (N et P), le diagnostic nutritionnel est basé uniquement sur les rendements et la composition chimique des racines et ne tiennent pas compte de l'analyse du feuillage. Les résultats des analyses du diagnostic nutritionnel du rutabaga sont présentés au Tableau 22.

Les résultats des analyses montrent que la population de tête a eu une concentration en K_2O de $3,18 \pm 0,20$ kg/tonne humide, à un taux d'humidité de 88 % (Tableau 22). Cette valeur est similaire à celle de $2,30 \pm 1,40$ kg/tonne à 92 % d'humidité rapportée dans l'actuel guide de référence en fertilisation du CRAAQ (2010), correspondant à 3,45 kg/tonne humide lorsque rapportée à 88 % d'humidité. Bien que plus faible, la valeur obtenue dans cette étude est également proche de la valeur de 3,67 kg/tonne humide (8,1 lb/tonne) rapportée par Warncke et al. (2004) au Michigan pour cette culture.

Lorsque rapportée à l'hectare et en considérant un rendement moyen de 79 909 kg, les exportations moyennes de la population de tête ont été de 259 kg K_2O et ont varié de 216 à 284 kg K_2O . Tel qu'observé pour les autres

éléments majeures N et P, les exportations en K₂O du rutabaga ont varié peu en raison de l'utilisation d'un cultivar unique et ont augmentées linéairement avec l'augmentation le rendement (Figure 36).

Tableau 22. Concentrations et exportations de potassium du rutabaga en fonction du diagnostic nutritionnel

	Humidité		Exportations ^{1, 2}				
	(%)	(kg K ₂ O/t humide)	(kg K ₂ O/ha)				
		Moy	Éc-T	Moy	Med	Min	Max
Haut rendement et équilibre nutritionnel (« population de tête »)	88	3,18	0,20	259	260	216	284
Faible rendement et équilibre nutritionnel	86	3,38	0,52	231	231	184	294
Faible rendement et déséquilibre nutritionnel	87	3,03	0,50	158	154	89	291
Haut rendement et déséquilibre nutritionnel	88	2,94	0,33	222	228	184	254

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

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

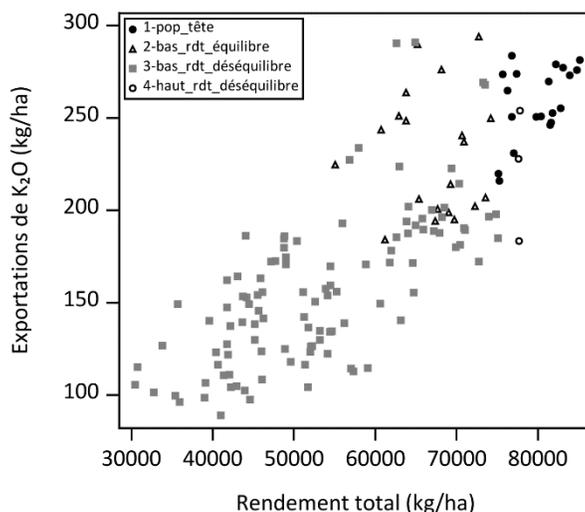


Figure 36. Exportations de K₂O en fonction des rendements du rutabaga selon le diagnostic nutritionnel. Les exportations du rutabaga ont été calculées sur la racine seulement et ne tiennent pas compte du feuillage.

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

Suivant l'analyse statistique des ROM, aucune réponse du rutabaga n'a été mesurée en fonction des apports de potassium et cela, sans impact apparent de la régée du B lors des essais. Il n'est donc pas possible de baser une grille sur la dose optimale dans les différentes classes de sol. Cette absence de réponse va dans le même sens que celle rapportée par divers travaux (Cutcliffe et Munro, 1973; Cutcliffe et Sanderson, 1989; Thomsen et al., 2017) et par les grilles de référence en fertilisation d'autres provinces (provinces atlantiques; Tableau 25). Il appert donc que la grille actuelle de référence en fertilisation du Québec (CRAAQ, 2010) recommande une sur-

fertilisation qui entraîne des coûts monétaires et environnementaux inutiles. Afin d'éviter de poursuivre avec l'usage de cette grille (CRAAQ, 2010), diverses alternatives peuvent être envisagées en absence de réponse de la culture à la fertilisation résultant en l'incapacité d'établir des VSRF basées sur les doses optimales de potassium :

A. Grille basée sur des fractions de la valeur d'exportation. Les valeurs d'exportations sont issues de calculs robustes effectués sur les données validées générées par les essais de fertilisation menés au Québec 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). Elles constituent en ce sens des VSRF. Par ailleurs, ces valeurs 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). Cette option permet une grande latitude dans le choix de la fraction ciblée de cette valeur comme apport à recommander.

B. Recommandation d'une dose potassique nulle. À l'image des Provinces de l'Atlantique (Tableau 25), la grille pourrait proposer des recommandations pour le N et le P, sans toutefois en proposer pour le K puisque la culture n'a pas montré de réponse à l'apport d'engrais potassique. Il s'agit toutefois d'un changement radical peu sujet à promouvoir l'acceptabilité. De plus, aucune étude scientifique ne permet de prédire l'effet d'une telle recommandation à long terme sur la fertilité des sols et le rendement de la culture.

Tout considéré, la proposition A (fractions de la valeur d'exportation) est préconisée puisqu'elle se base sur des VSRF, elle est la plus prudente agronomiquement et permet d'importantes réductions des apports de K, tout en étant la plus susceptible d'être acceptée socialement.

Ainsi, sur la base des seuils déterminés au Cate-Nelson (Tableau 21), indépendamment des groupes de textures de sols, quatre classes de fertilité ont été déterminées à partir de la teneur en K_{M3} du sol (valeurs arrondies, Tableau 23). La première classe de fertilité est délimitée par la teneur en K_{M3} de 44,7 ppm K_{M3} (≤ 50 ppm), soit la borne inférieure du jeu de données sous laquelle aucune donnée n'était disponible. La seconde classe de fertilité regroupe les sols ayant entre 44,7 et 155,5 ppm K_{M3} (51-150 ppm), soit le seuil déterminé au test de Cate-Nelson, tandis que la troisième est délimitée par le seuil et le double du seuil (155,5 et 311,0 ppm K_{M3}) (151-300 ppm). Enfin, une quatrième classe regroupe les sols de plus de 311,0 ppm K_{M3} (> 300 ppm).

Dans la première classe de fertilité potassique, la dose de 130 kg K_2O /ha, correspondant à la moitié des exportations en K_2O (259 kg/ha) de la culture est proposée. L'apport de l'équivalent de la moitié des exportations de la culture a été jugé suffisant en se basant sur l'absence de réponse à la fertilisation observée dans toutes les autres classes de fertilité de sol. Dans la deuxième classe de fertilité, le tiers des exportations est proposée. Pour la 3^{ème} et la 4^{ème} classe de fertilité, respectivement, le 1/5 et 1/8 des exportations sont proposées. Au-delà du seuil de 300 ppm K_{M3} , la fertilisation en K des sols peut être omise en raison de la richesse des sols en cet élément.

Tableau 23. Fertilisation potassique du rutabaga basée sur les exportations en K₂O de la culture Valeurs scientifiques de référence en fertilisation

Classe de fertilité K _{M3} ¹ (ppm)	Période d'application	Fractionnement (kg K ₂ O/ha)	VSRF ² (kg K ₂ O/ha)	% des exportations en K ₂ O
			G1-G2-G3 ³	
≤ 50	Au semis	90	130	50
	Au stade 4-6 feuilles	40		
51-150	Au semis	50	90	33,3
	Au stade 4-6 feuilles	40		
151-300	Au semis	-	50	20
> 300	Au semis	-	0 - 30	0 – 12,5

¹ K_{M3} : K extrait par la méthode Mehlich-3 (1984).

² VSRF : Valeur scientifique de référence en fertilisation.

³ G1 : sols à texture fine ; G2 : sols à texture moyenne ; G3 : sols à texture grossière.

Les recommandations du Tableau 23 sont en accord avec les analyses portant sur l'impact de la fertilisation potassique sur l'ensemble des autres paramètres, tels que le développement du feuillage et sa robustesse d'attache, les pertes de rendement à la récolte et à l'entreposage et la présence de cœur brun et de cœur creux. Tel que mentionnée pour l'azote, il a été observé que les conditions d'entreposage, très variables et inadéquates dans certains cas, ont semblé être plus déterminantes que la fertilisation potassique sur les pertes observées.

De manière générale, les recommandations en K₂O de cette étude, variant entre 0 et 130 kg K₂O/ha sont inférieures aux recommandations actuellement en vigueur au Québec (20 à 165 kg K₂O/ha; CRAAQ, 2010) et permettent des réductions importantes d'apports (Tableau 24, Tableau 25). Hormis la Nouvelle-Angleterre et les provinces de l'Atlantiques, ces valeurs sont également plus faibles que celles recommandées ailleurs au Canada et dans le nord-est des États-Unis où les doses recommandées varient entre 0 et 340 kg K₂O/ha (Tableau 25).

Tableau 24. Comparaison entre les recommandations en K₂O pour la production du rutabaga actuellement utilisées au Québec et celles de la présente étude.

Classe de fertilité K _{M3} ¹ (ppm)	Recommandations actuelles (CRAAQ, 2010) (kg K ₂ O/ha)	Recommandations IRDA (% d'exportations) (kg K ₂ O/ha)
≤ 50	165	130
51-150	120-140	90
151-300	40-90	50
> 300	20	0-30

¹ K_{M3} : K extrait par la méthode Mehlich-3 (1984).



Répartition des groupes de texture de sols à travers les régions

De même que pour les essais N et P, les essais de rutabaga ont été réalisés dans deux régions du Québec : 1) Chaudière-Appalaches et 2) Lanaudière. Tous les sols des groupes de textures G1 étaient situés dans Lanaudière, tandis que 7 des 8 sites établis sur des sols G2-G3 étaient situés dans Chaudière-Appalaches. Les résultats obtenus pourraient refléter un effet confondant de régions et de groupes de textures de sol.

Tableau 25. Comparaison des recommandations en K₂O pour la production du rutabaga au Canada et à l'étranger

Provinces/États	Mode et période d'application	Fractionnement	Indicateurs		Dose K ₂ O (kg/ha)	Source
			Fertilité du sol	Autres		
Québec (CAN)			< 100 kg K _{M3} /ha		165	CRAAQ (2010)
			101-200		140	
			201-300		120	
			301-400		90	
			401-500		65	
			501-600		40	
			601 et +		20	
Ontario (CAN)	À la volée avant le semis et incorporé	non	K du sol (K acétate d'ammonium)	Mg du sol. Dans les sols ayant moins de 100 ppm de Mg, les recommandations en potasse sont ajustées à la baisse à un minimum de 50 % à 50 ppm de Mg	0-340	MAAARO (2011)
Alberta (CAN)		non			60-172	Alberta Agriculture and Rural Developpement (2014)
Michigan (É-U)	À la volée avant le semis et incorporé	Appliquer 20 kg/ha de K ₂ O pour une application en bande au semis et les reste en post levée	K du sol	CEC du sol	0-212	Warncke et al. (2004)
Mid-Atlantic (É-U)	À la volée et incorporé	non	K du sol (K _{M3})		0-168	Virginia Cooperative Extension (2020)
Nouvelle Angleterre (É-U)	À la volée et incorporé	non	K du sol		0-112	University of Massachusetts Amherst (2022)
Provinces de l'atlantique (CAN)	-	-	-	-	Non réponse de la cultures à la fertilisation potassique	Atlantic Provinces Advisory Committee on Vegetable Crops (1989)

5. CONCLUSION

Les travaux réalisés par l'IRDA dans le cadre du Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation 2020-2023 (MIRVRF) ont permis de générer de nouvelles connaissances centrales pour la fertilisation du rutabaga en sol minéral. Ces recommandations reposent sur l'analyse des données validées d'expérimentations scientifiques québécoises réalisées au champ, appuyée de l'expertise agronomique et de principes scientifiques reconnus dans le domaine de la nutrition des cultures. Dans le cas du rutabaga, la recherche de données supplémentaires n'ayant pas permis de bonifier la base de données, les VSRF ont été déterminées exclusivement à partir des données des essais du PSEFCM et du MIRVRF. Selon l'élément, celles-ci tiennent compte de la texture des sols et de divers indicateurs de la fertilité des sols, comme la teneur en matière organique, la saturation en phosphore et la teneur en potassium. Les doses proposées ne compromettent pas la qualité, les rendements ni le potentiel d'entreposage, en plus de s'inscrire dans les bonnes pratiques agricoles. En fait, dans le cas de tous les éléments majeurs à l'étude, les résultats des analyses complémentaires ont indiqué peu d'effet de la fertilisation sur les pertes à la récolte et à l'entreposage. Les conditions de croissance prévalant au champ et à l'entreposage semblent représenter des facteurs plus déterminants que la fertilisation.

En raison de l'impact considérable de la fertilisation azotée sur le diamètre du rutabaga qui à son tour peut influencer les prix de vente, les apports azotés ont été établis sur la base des calibres visés en plus de considérer le groupe de textures et/ou la teneur matière organique du sol. En effet, dans le cas où les producteurs agricoles viseraient l'obtention de rutabaga de diamètre allant de 5 à 14 cm (calibres 1 et 2), il devient important d'éviter toute sur-fertilisation en N afin de limiter la croissance des racines. Quant à la fertilisation phosphatée, elle est précisée par le groupe de textures du sol et son indice de saturation en P (ISP). En effet, la texture du sol influence grandement le dynamisme et biodisponibilité du P, tandis que l'ISP 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. En raison de l'absence d'effet de la fertilisation phosphatée sur les calibres obtenus, une série unique de VSRF a été produite sans tenir compte du calibre visé. Ces VSRF constituent des diminutions par rapport aux recommandations actuelles (CRAAQ, 2010). Finalement, pour le potassium, en raison de l'absence d'effet de la fertilisation potassique sur le rendement, des VSRF basées sur une fraction des valeurs d'exportations en K_2O de la culture sont proposées plutôt qu'une recommandation d'apport nul quelque soit la catégorie de sol. Ces VSRF sont modulées selon la teneur en potassium (K_{M3}) 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. De même que pour le phosphore, les VSRF potassiques ne tiennent pas compte du calibre visé en raison de l'absence d'impact significatif de la fertilisation en K sur les diamètres des racines.

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

6. FERTILISATION DU RUTABAGA

Valeurs scientifiques de référence en fertilisation

AZOTE					
Groupe de textures ¹	Calibres visés	Classe de fertilité MO _{PAF} (%)	Période d'application	Fractionnement ² (kg N/ha)	VSRF (kg N/ha)
G1	-	≤ 3,2	Au semis	30	60 ³
			Au stade 4-6 feuilles	30	
		> 3,2	Au semis	30	30 ³
G2, G3	1 et 2	-	Au semis	30	60 ³
			Au stade 4-6 feuilles	30	
	1, 2 et 3	≤ 3,2	Au semis	60	90 ³
			Au stade 4-6 feuilles	30	
		> 3,2	Au semis	30	60 ³
			Au stade 4-6 feuilles	30	

PHOSPHORE			
Groupe de textures	Classe de fertilité ISP ₁ (%)	Période d'application	VSRF (kg P ₂ O ₅ /ha)
G1	≤ 3,8	Au semis	150 ³
	3,9 – 7,5		50 ³
	7,6 – 15,0		30 ³
	> 15,0		0-30 ^{3,4}
G2, G3	≤ 3,1	Au semis	150 ³
	3,13 – 8, 9		100 ³
	9,0 – 13,3		60 ³
	13,4 – 17, 8		30 ³
	> 17,8		0-30 ^{3,4}

POTASSIUM			
Classe de fertilité K _{M3} (ppm)	Période d'application	Fractionnement (kg K ₂ O/ha)	VSRF (kg K ₂ O/ha)
≤ 50	Au semis	90	130 ⁵
	Au stade 4-6 feuilles	40	
51 – 150	Au semis	50	90 ⁵
	Au stade 4-6 feuilles	40	
151 – 300	Au semis	-	50 ⁵
> 300	Au semis	-	0 – 30 ⁵

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

¹ Les sols G1 ont été regroupés dans la région de Lanaudière uniquement et ceux G2-G3 dans la région de Chaudière-Appalaches.

² Les fractionnements sont présentés tels que testés lors des essais.

³ Dose agronomique optimale dans cette catégorie de sols.

⁴ Dose nulle également proposée, considérant l'absence probable de gains par la fertilisation dans cette catégorie de sols.

⁵ En absence de réponse de la culture à la fertilisation potassique, ces doses sont basées sur les exportations moyennes en K₂O de la culture (259 kg/ha). Les doses varient de 0 % à 50 % des exportations selon la teneur en K_{M3} du sol.



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

Remerciements

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

7. RÉFÉRENCES

- AAC. (2018). *Profil de la culture du rutabaga au Canada*. Agriculture et Agroalimentaire Canada. Programme de la lutte antiparasitaire. https://publications.gc.ca/collections/collection_2020/aac-aafc/A118-10-23-2018-fra.pdf
- Alberta Agriculture and Rural Development. (2014). *Vegetable Production on the Prairies Commercial Vegetable Production*. Alberta Agriculture and Rural Development.
- 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.
- APMQ. (2022). *Association des producteurs maraichers du Québec - Répertoire*. Association des producteurs maraichers du Québec. <https://apmquebec.com/repertoire>
- Beauchamp, E. G. et Hussain, I. (1974). Brown Heart in Rutabagas Grown on Southern Ontario Soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 54(2), 171-178.
- 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>
- Black, C. A. (1993). *Soil Fertility Control and Evaluation*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.
- Brown, D. (1945). The growth and composition of the tops of peach trees in sand culture in relation to nutrient-element balance. *West Va. Agr. Exp. Sta. Bui*, 322, 1-72.
- Cate, R. et Nelson, L. (1971). A Simple Statistical Procedure for Partitioning Soil Test Correlation Data Into Two Classes. *Soil Science Society of America Journal*, 35(4), 658-660.
- Cope, J. T., Rouse, R. D., Walsh, L. M. et Beaton, J. D. (1973). Interpretation of soil test results. *Soil testing and plant analysis*, 35-54.
- CRAAQ. (2010). *Guide de référence en fertilisation. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec* (2e éd.). Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec, Commission chimie et fertilité des sols, Québec, Canada.
- Culman, S., Fulford, A., Camberato, J. et Steinke, K. (2020). *Tri-State Fertilizer Recommendations for Corn, Soybean, Wheat, and Alfalfa*.
- Cummings, G. A. et Wilcox, G. E. (1968). Effect of potassium on quality factors- fruits and vegetables. *The Role of Potassium in Agriculture*, (2542), 243-267.
- Cutcliffe, J. A. et Munro, D. C. (1973). Effects of nitrogen, phosphorus, and potassium on rutabaga yields. *Canadian Journal of Plant Science*, 53, 357-361.
- Cutcliffe, J. A. et Sanderson, J. B. (1989). Effects of added nitrogen and potassium on yield and storability of rutabagas. *Canadian Journal of Plant Science*, 69, 1359-1363.
- 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*.
- Giroux, M., Cantin, J., Rivest, R. et Tremblay, G. (2002). *Évolution des teneurs en phosphore de sols selon la fertilisation, les rotations de cultures et les types de sols*. (p. 19).
- Hadas, A. et Hagin, J. (1972). Boron adsorption by soils as influenced by potassium. *Soil Science*.

- Hubert, M. et Debruyne, M. (2010). Minimum covariance determinant. *Wiley Interdisciplinary Reviews Computational Statistics*, 2(1), 36-43.
- IRDA. (2021). Institut de recherche et développement en agroenvironnement. Package cnd version 1.2, cndMethodRobustIrda.R, [lien GitHub à venir].
- 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.
- Kuhar, T. P., Hastings, P. D., Hamilton, G. C., VanGessel, M. J., Johnson, G. C., Wyenandt, C., Vuuren, van M., Reiter, M. S., Rideout, S. L., Strawn, L. K., Langston, D. B., Wilson, J., Parkhurst, J. et Doughty, H. (2020). *Mid-Atlantic Commercial Vegetable Production Recommendations*. Virginia Cooperative Extension. Virginia Cooperative Extension.
- 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.
- MacLeod, J. A., Gupta, U. C. et Cutcliffe, J. A. (1971). Effect of N, P, and K on root yield and nutrient levels in the leaves and roots of rutabagas grown in a greenhouse. *Plant and Soil*, 35(1), 281-288.
- 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.
- 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*, 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>
- Reith, J. W. S. et Inkson, R. H. E. (1963). Effects of fertilizers and farmyard manure on swedes and turnips. *The Journal of Agricultural Science*, 60(2), 145-157.
- Sanderson, K. R., Sanderson, J. B. et Gupta, U. C. (2002). Boron for brown-heart control on two rutabaga cultivars. *Canadian Journal of Plant Science*, 82(3), 561-565.
- SAS Institute inc. (2018). SAS/STAT® 15.1 User's guide. SAS Institute inc.
- Shelp, B. J. et Shattuck, V. I. (1987). Boron nutrition and mobility, and its relation to the elemental composition of greenhouse grown root crops I. Rutabaga. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 18(2), 187-201.
- 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
- Thomsen, M. G., Riley, H., Borge, G. I. A., Lea, P., Rødbotten, M. et Bengtsson, G. B. (2017). Effects of soil type and fertilization on yield, chemical parameters, sensory quality and consumer preference of swede (*Brassica napus* L. ssp. *rapifera*). *European Journal of Horticultural Science*, 82(6), 294-305.
- University of Massachusetts Amherst. (2022). *New England Vegetable Management Guide. Rutabaga and Turnip*.
<https://nevegetable.org/crops/rutabaga-and-turnip>
- Warncke, D., Dahl, J. et Zandstra, B. (2004). Nutrient Recommendations for Vegetable Crops in Michigan (E2904). *Michigan State University Extension Bulletin*, (E2934), 1-32.
- Watson, M. E. (1972). *Interaction among nitrogen, potassium and boron and effects on critical concentration of boron in tomato, Lycopersicon esculentum Mill*. University of Guelph.
- White-Stevens, R. H. et Wessels, P. H. (1944). Studies in the Minor Element Nutrition of Vegetable Crop Plants: I. The Interrelation of Nitrogen, Phosphorus, Potash, and Boron in the Growth of Rutabagas1. *Agronomy Journal*, 36(11), 903-921. <https://doi.org/10.2134/agronj1944.00021962003600110003x>
- Zheng, Z., Parent, L. E. et MacLeod, J. A. (2003). Influence of soil texture on fertilizer and soil phosphorus transformations in Gleysolic soils. *Canadian journal of soil science*, 83(4), 395-403.

Annexe I

Sommaire des données exclues de l'analyse et justifications

#Site	Donnée exclue	Raison justifiant l'exclusion
1	Essai P : 104	Présence de plants particulièrement petits sur le dernier mètre de la zone de récolte, affectant le rendement de l'unité expérimentale.
2	Essai N : 104 Essai K : 412	Perte de rendement élevée à la récolte (41 %). Perte de rendement élevée à la récolte (57 %).
3	Essai K : Blocs 3,4 et 5 Essai P : 408 Essai P : 409 (entreposage) Essai K : 103 (entreposage)	Problématique localisée liée au terrain et non contrôlée par le dispositif expérimental. Unité expérimentale présentant un rendement particulièrement élevé par rapport aux autres, entraînant un coefficient de variation élevé (27 %) pour ce traitement. Pourcentage de perte élevé suivant la période d'entreposage, non représentatif des pourcentages obtenus en conditions commerciales.
4	Essai P : 212 (entreposage) Site entier (biomasse de récolte)	Pourcentage de perte élevé suivant la période d'entreposage, non représentatif des pourcentages obtenus en conditions commerciales. Erreur suspectée lors du séchage et de la pesée des échantillons, comme les teneurs en matière sèche ont été de plus du double de celles des autres essais.
6	Essai N: 215 Essai K: 107, 108, 111, 101 Essai P: 101, 111 Entreposage Site entier	Rendements faibles dans ces unités expérimentales. Problématique de terrain non-contrôlée par le dispositif expérimental. Pertes élevées sur l'ensemble du site (13 à 60 %).
7	Site entier	Site particulièrement riche en MO (13,7 - 19,1 %), hors des critères des présents essais se déroulant en sol minéral.
9	Essai K : 224	Présence de pucerons sur les feuilles jeunes (gondolées) et anciennes (rouges)
10	Entreposage Essai K : 214, 327	Pourcentage de perte élevé suivant la période d'entreposage, non représentatif des pourcentages obtenus en conditions commerciales.
11	Essai N : 332 Essai P : 335	Unité expérimentale présentant un rendement particulièrement faible par rapport aux autres, entraînant un coefficient de variation élevé (18 %) pour ces traitements.
12	Site entier	L'ensemble du site a été affecté par une problématique importante de mouche du chou, <i>Delia Radicun</i> . Les pertes ont été environ de 18 % sur l'ensemble des essais, soit six fois supérieures aux pertes moyennes des autres sites de rutabaga.
17	Essai K : 220, 328 Site entier (entreposage)	Problème d'identification des numéros d'unités expérimentales sur les sacs de récolte, selon le commentaire laissé par le Collaborateur. Ces unités expérimentales ont présenté des rendements anormalement faibles entraînant des coefficients de variation élevés (31 et 46 %) pour ces traitements. La somme des rendements par catégories ne correspond pas au poids total sec. Erreur de mesure suspectée dans une ou plusieurs catégories.
18	Site entier	Problématique liée au terrain (présence d'une pente) et non contrôlée par le dispositif expérimental.
19	Essai K : 106 (entreposage)	La masse mesurée en pré-entreposage a été inférieure à la masse mesurée en post-entreposage.
20	Essai P	Application de chaux sur le site à l'automne précédent l'essai (5 t/ha de chaux magnésienne).