

FERTILISATION DE LA BETTERAVE POTAGÈRE

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

FASCICULE 05 : Betterave potagère

Version finale



Responsable du projet : Christine Landry

Auteures : Christine Landry, Claude-Alla Joseph, Stéphanie Houde, Julie Forest-Drolet et Michèle Grenier.

Collaborateurs : Lélia Anderson, Olivier Breton-Bourgault, Simon Guillemette, Anne-Mary Le Guennec, Catherine Bossé.

Produit pour : Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation

Date : Janvier 2022

Fertilisation de la betterave potagère. Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation du Québec (2020-2023). Fascicule 05 : Betterave potagère.

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

LE RAPPORT PEUT ÊTRE CITÉ COMME SUIV :

Landry, C., C.-A. Joseph, S. Houde, J. Forest-D., et M. Grenier. 2022. Fertilisation de la betterave potagère. Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation du Québec (2020-2023). Fascicule 05. Présenté au ministère de l'agriculture et des pêcheries. 81 pages.

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

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

ÉQUIPE DE RÉALISATION DU PROJET

RESPONSABLE SCIENTIFIQUE ET GESTIONNAIRE DE PROJET

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

BASE DE DONNÉES

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

PROGRAMMES D'ANALYSE

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

VALEURS SCIENTIFIQUES DE RÉFÉRENCE EN NUTRITION DES CULTURES

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

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

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

PARTENAIRES



Ce projet a bénéficié d'une aide financière en vertu du Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (MELCC).

MISE EN CONTEXTE

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

Dans le cas de la betterave potagère, la recherche de données supplémentaires n'ayant pas permis de bonifier la base de données, les VSRF ont été déterminées exclusivement à partir des données des essais du PSEF. Celles-ci ont permis de préciser les recommandations en tenant compte des types de marchés visés par les producteurs, en plus de considérer la texture des sols et divers indicateurs de la fertilité, comme la teneur en matière organique, la saturation en phosphore et la teneur en potassium des sols. Les VSRF ne compromettent pas les rendements ni la qualité des récoltes, en plus de s'inscrire dans les bonnes pratiques agricoles. De manière générale, les doses proposées sont similaires ou supérieures aux recommandations actuelles pour les betteraves de calibre institution, mais similaires ou inférieures pour les betteraves de calibre cello.

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

aux producteurs et aux agronomes québécois un nouvel outil permettant de mieux concilier la productivité et la conservation des ressources. Les documents présentant les grilles officielles sont disponibles sur le site web du MAPAQ. Les intervenants qui souhaitent consulter les rapports scientifiques (fascicules) sur lesquels s'appuient les grilles MAPAQ sont invités à consulter la fiche de la chercheuse Christine Landry sur le site web de l'IRDA, où se retrouvent l'ensemble des publications, à cette adresse :

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

NOTE AU LECTEUR

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

TABLE DES MATIÈRES

GLOSSAIRE.....	XI
1. PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES ESSAIS ET DES ANALYSES.....	12
1.1 PROVENANCE DES DONNÉES.....	12
1.2 LOCALISATION DES SITES.....	12
1.3 PROPRIÉTÉS PHYSICO-CHIMIQUES DES SOLS.....	13
1.4 DISPOSITIFS EXPÉRIMENTAUX ET TRAITEMENTS	14
1.4.1 ESSAIS N.....	15
1.4.2 ESSAIS P.....	16
1.4.3 ESSAIS K.....	16
1.5 RENDEMENTS.....	17
1.6 ASPECTS ADDITIONNELS POUR L'INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS.....	19
1.6.1 VARIÉTÉ CULTURALE.....	19
1.6.2 PRÉCÉDENT CULTURAL	20
1.6.3 IRRIGATION	20
1.7 ANALYSE EXPLORATOIRE.....	20
1.8 CALCULS ET ANALYSES STATISTIQUES.....	21
1.8.1 DÉTERMINATION DES CLASSES DE FERTILITÉ DES SOLS	21
1.8.2 DÉTERMINATION DES DOSES OPTIMALES DE FERTILISANTS	23
1.8.3 DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL ET QUANTITÉS D'ÉLÉMENTS NUTRITIFS EXPORTÉS.....	24
1.8.4 ANALYSES SUR LA QUALITÉ, LES CALIBRES, LES PERTES À LA RÉCOLTE ET LES PERTES À L'ENTREPOSAGE	25
2. FERTILISATION AZOTÉE	26
2.1 PORTRAIT ET REPRÉSENTATIVITÉ DES DONNÉES	26
2.2 DÉTERMINATION DES DOSES AGRONOMIQUES OPTIMALES.....	26
2.2.1 RECHERCHE D'INDICATEURS DE FERTILITÉ DU SOL	26
2.2.2 EFFET DE LA DOSE D'AZOTE SUR LE RENDEMENT VENDABLE	27
2.2.3 EFFET DE LA DOSE D'AZOTE SUR LA QUALITÉ, LES CALIBRES, LES PERTES À LA RÉCOLTE ET LES PERTES À L'ENTREPOSAGE.....	32
2.3 DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL ET EXPORTATIONS EN AZOTE	37
2.4 NITRATE RÉSIDUEL À LA RÉCOLTE.....	39
2.5 FERTILISATION AZOTÉE PROPOSÉE ET COMPARAISON AVEC LES RECOMMANDATIONS AU CANADA ET À L'ÉTRANGER	40
3. FERTILISATION PHOSPHATÉE.....	45
3.1 PORTRAIT ET REPRÉSENTATIVITÉ DES DONNÉES	45
3.2 DÉTERMINATION DES DOSES AGRONOMIQUES OPTIMALES.....	45
3.2.1 RECHERCHE D'INDICATEURS DE FERTILITÉ DU SOL	45
3.2.2 ÉTUDE DE L'EFFET DE LA DOSE DE PHOSPHORE SUR LE RENDEMENT VENDABLE.....	46
3.2.3 EFFET DE LA DOSE DE PHOSPHORE SUR LA QUALITÉ, LES CALIBRES, LES PERTES À LA RÉCOLTE ET LES PERTES À L'ENTREPOSAGE...	49
3.3 DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL ET EXPORTATIONS EN PHOSPHORE	51
3.4 FERTILISATION PHOSPHATÉE PROPOSÉE ET COMPARAISON AVEC LES RECOMMANDATIONS AU CANADA ET À L'ÉTRANGER	53
4. FERTILISATION POTASSIQUE	58
4.1 PORTRAIT ET REPRÉSENTATIVITÉ DES DONNÉES	58
4.2 DÉTERMINATION DES DOSES AGRONOMIQUES OPTIMALES.....	58
4.2.1 RECHERCHE D'INDICATEURS DE FERTILITÉ DU SOL	58
4.2.2 EFFET DE LA DOSE DE POTASSIUM SUR LE RENDEMENT.....	59

4.2.3	EFFET DE LA DOSE DE POTASSIUM SUR LA QUALITÉ, LES CALIBRES, LES PERTES À LA RÉCOLTE ET LES PERTES À L'ENTREPOSAGE ...	63
4.3	DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL ET EXPORTATIONS.....	67
4.4	FERTILISATION POTASSIQUE PROPOSÉE ET COMPARAISON AVEC LES RECOMMANDATIONS AU CANADA ET À L'ÉTRANGER.....	69
5.	CONCLUSION	73
6.	FERTILISATION DE LA BETTERAVE POTAGÈRE - VALEURS SCIENTIFIQUES DE RÉFÉRENCE EN FERTILISATION	74
	REMERCIEMENTS.....	75
7.	RÉFÉRENCES	76
	ANNEXE I.....	80

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1. DESCRIPTION SOMMAIRE DES SITES DES ESSAIS DE FERTILISATION DE LA BETTERAVE POTAGÈRE	15
TABLEAU 2. DESCRIPTION DES TRAITEMENTS DES ESSAIS DE FERTILISATION AZOTÉE	16
TABLEAU 3. DESCRIPTION DES TRAITEMENTS DES ESSAIS DE FERTILISATION PHOSPHATÉE	16
TABLEAU 4. DESCRIPTION DES TRAITEMENTS DES ESSAIS DE FERTILISATION POTASSIQUE	17
TABLEAU 5. STATISTIQUES DESCRIPTIVES SUR LES DONNÉES NON VALIDÉES (AVANT L'ANALYSE EXPLORATOIRE) DES RENDEMENTS EN BETTERAVES DES ESSAIS N, P ET K	18
TABLEAU 6. VARIÉTÉS CULTURALES AYANT FAIT L'OBJET DES ESSAIS N, P ET K DE LA BETTERAVE POTAGÈRE	20
TABLEAU 7. BILAN DE LA VALIDATION DES DONNÉES À L'ISSUE DE L'ANALYSE EXPLORATOIRE	21
TABLEAU 8. RÉPARTITION DES BLOCS DES ESSAIS N DE BETTERAVES POUR DIFFÉRENTES CLASSES DE PROPRIÉTÉS DE SOL APRÈS LA VALIDATION DES DONNÉES	26
TABLEAU 9. VALEURS CRITIQUES DES INDICATEURS DE SOL SIGNIFICATIFS SELON LES TESTS DE CATE-NELSON POUR LES ESSAIS N DE BETTERAVES ...	27
TABLEAU 10. CONCENTRATIONS ET EXPORTATIONS EN N DES BETTERAVES, SELON LE DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL	38
TABLEAU 11. FERTILISATION AZOTÉE DE LA BETTERAVE POTAGÈRE – VALEURS SCIENTIFIQUES DE RÉFÉRENCE EN FERTILISATION	43
TABLEAU 12. COMPARAISON DES RECOMMANDATIONS EN N POUR LA PRODUCTION DE BETTERAVE POTAGÈRE AU CANADA ET À L'ÉTRANGER	44
TABLEAU 13. RÉPARTITION DES BLOCS DES ESSAIS P DE LA BETTERAVE SELON DIFFÉRENTES CLASSES DE PROPRIÉTÉS DE SOL APRÈS LA VALIDATION DES DONNÉES	45
TABLEAU 14. VALEURS CRITIQUES DES INDICATEURS POTENTIELS DE SOLS SIGNIFICATIFS SELON LES TESTS DE CATE-NELSON POUR LES ESSAIS P DE LA BETTERAVE	46
TABLEAU 15. CONCENTRATIONS ET EXPORTATIONS EN P ₂ O ₅ SELON LE DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL	52
TABLEAU 16. FERTILISATION PHOSPHATÉE DE LA BETTERAVE POTAGÈRE – VALEURS SCIENTIFIQUES DE RÉFÉRENCE EN FERTILISATION	55
TABLEAU 17. COMPARAISON DES RECOMMANDATIONS EN P ₂ O ₅ POUR LA PRODUCTION DE BETTERAVE POTAGÈRE AU CANADA ET À L'ÉTRANGER ..	57
TABLEAU 18. RÉPARTITION DES BLOCS DES ESSAIS K SELON DIFFÉRENTES CLASSES DE PROPRIÉTÉS DE SOL APRÈS LA VALIDATION DES DONNÉES	58
TABLEAU 19. VALEURS CRITIQUES DES INDICATEURS DE SOLS SIGNIFICATIFS SELON LES TESTS DE CATE-NELSON POUR LES ESSAIS K DANS LA BETTERAVE POTAGÈRE	59
TABLEAU 20. CONCENTRATIONS ET EXPORTATIONS DE POTASSIUM DE LA BETTERAVE POTAGÈRE EN FONCTION DU DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL	68
TABLEAU 21. FERTILISATION POTASSIQUE DE LA BETTERAVE POTAGÈRE – VALEURS SCIENTIFIQUES DE RÉFÉRENCE EN FERTILISATION	70
TABLEAU 22. COMPARAISON DES RECOMMANDATIONS EN K ₂ O POUR LA PRODUCTION DE BETTERAVE POTAGÈRE AU CANADA ET À L'ÉTRANGER ...	72

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1. RÉPARTITION GÉOGRAPHIQUE DES SITES	12
FIGURE 2. DISTRIBUTION DES BLOCS DES ESSAIS DANS LE TRIANGLE DES TEXTURES.	13
FIGURE 3. RENDEMENT MOYEN PAR SITE DES PRINCIPALES CATÉGORIES DE RÉCOLTE EN FONCTION DES TRAITEMENTS DE FERTILISATION.	19
FIGURE 4. DÉFINITIONS DES QUADRANTS D'UN TEST DE PARTITION BINAIRE DE CATE-NELSON (1979).....	23
FIGURE 5. RÉSULTATS DES ANALYSES DE VARIANCE SUR LA RÉPONSE DE LA BETTERAVE VENDABLE (DIAMÈTRE ENTRE 3,8 ET 10,2 CM) AUX DOSES CROISSANTES D'AZOTE.	29
FIGURE 6. RÉSULTATS DES ANALYSES DE VARIANCE SUR LA RÉPONSE DE LA BETTERAVE DE CALIBRE CELLO (DIAMÈTRE ENTRE 3,8 ET 6,4 CM) AUX DOSES CROISSANTES D'AZOTE.	31
FIGURE 7. ÉVALUATION DE LA ROBUSTESSE DE L'ATTACHE DU FEUILLAGE SELON LES DOSES DE N.	32
FIGURE 8. CALIBRES DES BETTERAVES À LA RÉCOLTE SELON LES DOSES DE N.	33
FIGURE 9. PERTES DE RENDEMENTS À LA RÉCOLTE EN FONCTION DES TRAITEMENTS DE FERTILISATION AZOTÉE TOUTES TEXTURES CONFONDUES ET DANS LES GROUPES G1 VS. G2-G3.	34
FIGURE 10. PERTES DE BETTERAVES À LA RÉCOLTE PAR RAPPORT AU RENDEMENT TOTAL EN FONCTION DES TRAITEMENTS DE FERTILISATION DANS LES GROUPES DE TEXTURES G1 VS. G2-G3.	35
FIGURE 11. POURCENTAGES DE PERTES SUIVANT UNE PÉRIODE D'ENTREPOSAGE EN FONCTION DES GROUPES DE TEXTURES DE SOL.	36
FIGURE 12. PROPORTION DES BETTERAVES ENTREPOSÉES DANS CHAQUE CATÉGORIE EN FONCTION DES TRAITEMENTS DE FERTILISATION AZOTÉE SELON LES GROUPES DE TEXTURES DE SOL.	36
FIGURE 13. EXPORTATIONS D'AZOTE DE LA BETTERAVE EN FONCTION DES RENDEMENTS TOTAUX SELON LES VARIÉTÉS (A) ET LE DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL (B).	39
FIGURE 14. INDICES NITRATE DES TRAITEMENTS D'AZOTE DE LA BETTERAVE AUX PROFONDEURS 0-30 ET 30-60 CM DANS LES SOLS G1 VS G2-G3, AU MOMENT DE LA RÉCOLTE.	40
FIGURE 15. RÉSULTATS DES ANALYSES DE VARIANCE SUR LA RÉPONSE AUX DOSES CROISSANTES DE P_2O_5	48
FIGURE 16. ROBUSTESSE DE L'ATTACHE DU FEUILLAGE SELON LA DOSE DE PHOSPHORE.	49
FIGURE 17. CALIBRES À LA RÉCOLTE SELON LES DOSES DE PHOSPHORE.	50
FIGURE 18. PERTES À LA RÉCOLTE EN FONCTION DES DOSES CROISSANTES DE PHOSPHORE.	50
FIGURE 19. CATÉGORIES DE BETTERAVES PERTES PAR RAPPORT AU RENDEMENT TOTAL EN FONCTION DES TRAITEMENTS DE FERTILISATION	51
FIGURE 20. EXPORTATIONS DE PHOSPHORE DE LA BETTERAVE POTAGÈRE EN FONCTION DES RENDEMENTS TOTAUX SELON LES VARIÉTÉS (A) ET LE DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL (B)	53
FIGURE 21. RÉSULTATS DES ANALYSES DE VARIANCE SUR LA RÉPONSE DE LA BETTERAVE POTAGÈRE AUX DOSES CROISSANTES DE POTASSIUM.	61
FIGURE 22. RÉSULTATS DES ANALYSES DE VARIANCE SUR LA RÉPONSE DE LA BETTERAVE POTAGÈRE DE CALIBRE CELLO AUX DOSES CROISSANTES DE POTASSIUM.	63
FIGURE 23. ÉVALUATION DE LA ROBUSTESSE DE L'ATTACHE DU FEUILLAGE SELON LA DOSE DE POTASSIUM.	64
FIGURE 24. CALIBRES À LA RÉCOLTE SELON LES DOSES DE POTASSIUM.	65
FIGURE 25. PERTES À LA RÉCOLTE EN FONCTION DES DOSES CROISSANTES DE POTASSIUM.	66
FIGURE 26. PERTES À LA RÉCOLTE PAR RAPPORT AU RENDEMENT TOTAL ET EN FONCTION DES TRAITEMENTS DE FERTILISATION DANS LES GROUPES DE TEXTURES G1 VS. G2-G3.	66
FIGURE 27. PERTES SUIVANT UNE PÉRIODE D'ENTREPOSAGE EN FONCTION DES DOSES CROISSANTES DE POTASSIUM.	67

FIGURE 28. EXPORTATIONS DE K_2O EN FONCTION DES RENDEMENTS DE LA BETTERAVE POTAGÈRE EXPRIMÉS SELON LES VARIÉTÉS (A) ET SELON LE DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL (B)	68
---	----

GLOSSAIRE

Rendement cello : Désigne le rendement vendable des betteraves ayant un diamètre entre 3,8 et 6,4 cm.

Rendement institution : Désigne le rendement vendable des betteraves ayant un diamètre entre 6,5 et 10,2 cm.

Rendement vendable : Désigne la somme du rendement cello et du rendement institution.

Rendement non vendable : Désigne la somme des rendements non-commercialisables, comme les betteraves présentant des malformations, des maladies ou des calibres trop petits (diamètre < 3,8 cm) ou trop gros (diamètre > 10,2 cm).

Rendement total : Désigne la 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 sol et les valeurs scientifiques de référence en fertilisation (VSRF) de la betterave potagère cultivée en sol minéral (ci-après « betterave ») ont été calculées à partir des données du PSEF, pour lesquels les essais se sont déroulés entre 2013 et 2017.

1.2 Localisation des sites

La répartition géographique des essais de betteraves est présentée à la Figure 1. Afin d'assurer une bonne représentativité de la production du Québec, les essais ont eu lieu majoritairement dans les régions de Lanaudière, des Laurentides et de la Montérégie et, dans une plus faible proportion, dans les régions de la Capitale-Nationale et de Chaudière-Appalaches (Figure 1).

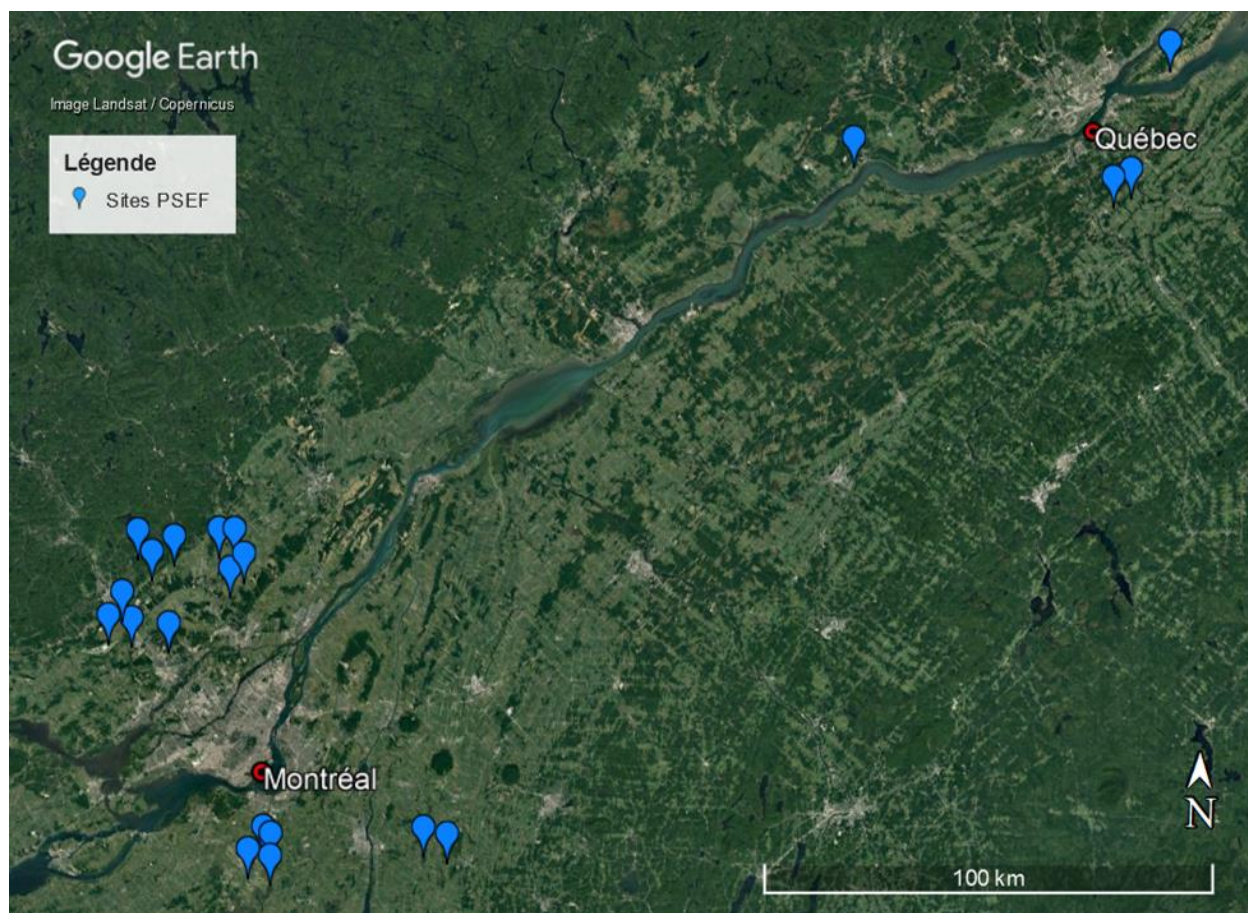


Figure 1. Répartition géographique des sites L'emplacement des repères est approximatif et vise seulement à représenter la répartition géographique des sites sur le territoire du Québec.

1.3 Propriétés physico-chimiques des sols

Les analyses physico-chimiques du sol (0-20 cm) ont été effectuées par bloc afin de déterminer des indicateurs de fertilité. Plusieurs paramètres ont été mesurés, soit la teneur en matière organique (méthode par perte au feu, MO_{PAF}), en éléments nutritifs (méthode Mehlich-3), la masse volumique apparente, la granulométrie, la distribution des agrégats stables à l'eau et la teneur en $N-NO_3$ (0-30 cm) au semis. De plus, pour chaque site, une analyse des profils de sol a été réalisée par l'équipe des pédologues de l'IRDA, laquelle a servi à identifier les séries de sols et leurs particularités pédologiques, à valider le groupe de textures et à prendre en considération l'état de santé du sol lors de l'analyse exploratoire. Les essais ont été menés sur sols de textures variées (Figure 2). Ceux-ci contenaient entre 6 et 46 % d'argile, la grande majorité se situant sous le seuil de 30 %. En effet, de l'ensemble des essais, 29 % ont été réalisés sur des sols du groupe de textures G1, 34 % sur des G2 et 37 % sur des G3. Très peu voire aucun essai n'a été effectué sur des sols à forte proportion d'argile, en raison du fait que ces sols sont peu propices à la culture de la betterave (MAAARO, 2011). Il est à noter que les sols de la classe texturale « loam sablo-argileux » ont été attribués au groupe G2 plutôt qu'au G1, conformément aux recommandations de l'équipe de pédologie de l'IRDA (C. Bossé, comm. perso., 2021), puisqu'ils partagent davantage les caractéristiques des G2.

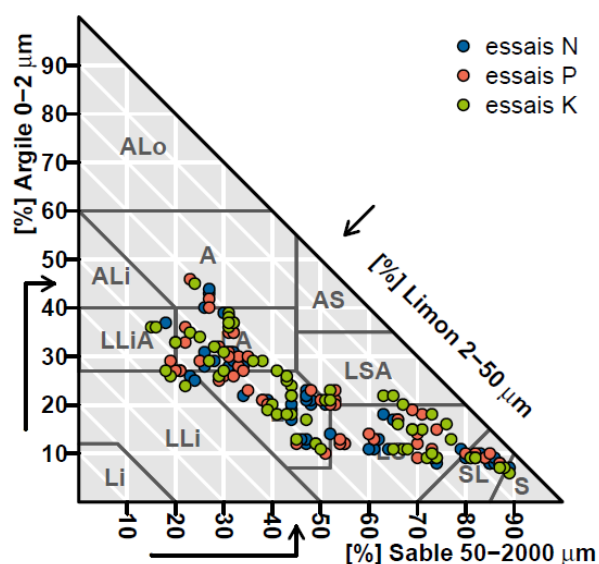


Figure 2. Distribution des blocs des essais dans le triangle des textures. ALo : Argile lourde ; ALi : Argile limoneuse ; A : Argile ; LLiA : Loam limono-argileux ; LA : Loam argileux ; AS : Argile sableuse ; L : Loam ; Li : Limon ; LLi : Loam limoneux ; LSA : Loam sablo-argileux ; SL : Sable loameux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

Les données sont issues d'essais de fertilisation répartis dans cinq régions administratives du Québec. Le pH_{eau} moyen du sol était de $6,3 \pm 0,5$, alors que le CRAAQ (2010) définit le pH adéquat pour la culture de la betterave potagère à 6,3. En Ontario, où toutefois les sols peuvent différer, l'intervalle optimal de pH est établi entre 6,8 et 7,8 (MAAARO, 2011). Dans l'ensemble, 68 % des blocs contenaient entre 2 et 4 % de MO_{PAF} (étendue de 1,2 à 8,2 %). Les analyses par la méthode Mehlich-3 ont révélé que le quart des blocs avaient un indice de saturation du sol en P (ISP_1) de moins de 5 % et que la moitié avait entre 5 et 15 % d' ISP_1 . Le dernier quart des sites était fortement saturé ($> 15 \%$), avec des ISP_1 allant jusqu'à 65 %. Les teneurs des sols en K_{M3} variaient largement

entre 43 à 399 ppm K_{M3} , 80 % des blocs contenant toutefois moins de 175 ppm. Finalement, les profils de sol réalisés par l'équipe de pédologie de l'IRDA ont révélé que certains avaient été établis sur des sols présentant des signes de dégradation, comme une structure massive ou de la battance. Toutefois, pour la totalité des essais, le diamètre moyen pondéré (DMP) des agrégats stables à l'eau était de 1,67 mm et s'étendait de 0,20 à 3,87 mm. Une prépondérance de macroagrégats (0,25 mm de diamètre et plus) a été mesurée sur la majorité des sites, ce qui pourrait indiquer une bonne structure du sol (N'dayegamiye, 2007).

1.4 Dispositifs expérimentaux et traitements

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

Hormis les essais N, les traitements ont été choisis en fonction de la classe de fertilité du sol pour l'élément testé (Essais P, section 1.4.2 et essais K, section 1.4.3). L' ISP_1 et la teneur du sol en K_{M3} ont été utilisés pour la classification de la fertilité des sols dans les essais P et les essais K, respectivement. Des doses plus élevées de P_2O_5 et de K_2O ont donc été testées dans les sols dits « faiblement saturés en P » ou « à faibles teneurs en K_{M3} » que dans les sols dits à « fortes teneurs ». Cependant, quatre sites des essais P et un site des essais K ont été mal classés de part et d'autre des seuils présumés de non-réponse de la culture et n'ont pas reçu les doses prévues (ex. : doses élevées pour des sites ayant une forte teneur en K_{M3}). Ceci a pu faire en sorte que la réponse de la culture à la fertilisation n'a pu être adéquatement étudiée. Par exemple, en cas de mauvais classement dans les sols à faibles teneurs, même les niveaux de traitement les plus élevés pourraient être insuffisants pour l'atteinte d'un plateau de production. Au contraire, dans les sols à fortes teneurs mal classés, le plateau de production pourrait être atteint dès l'application du plus faible niveau de traitement. Enfin, pour tous les essais, seul l'élément testé variait, les autres éléments nutritifs majeurs étant fixés au troisième niveau de traitement de chaque élément afin qu'ils ne soient pas limitants.

Pour les essais N, P et K, les protocoles indiquaient que la première application d'engrais devait se faire en bande au moment du semis. Toutefois, cette application a été effectuée en post-levée, alors que les plants étaient approximativement au stade cotylédon. Cette adaptation a résulté de la nécessité de visualiser l'emplacement des plants pour assurer le bon positionnement de l'engrais. Un seul site fait exception (site 18), la première application d'engrais ayant été faite sous la ligne de semis, avant le semis.

Tableau 1. Description sommaire des sites des essais de fertilisation de la betterave potagère

# site	Série de sol	Région admin. ¹	Année	Date semis	Date récolte	Durée essai jours	Argile %	Essais N		Essais P		Essais K	
								MO ²	Rdt ³ vendable	ISP ₁ ^{4, 6}	Rdt vendable	Teneur en K _{M3} ^{5, 6}	Rdt vendable
								%	kg/ha	%	kg/ha	kg/ha	kg/ha
1	Saint-Nicolas	03	2013	15 juin	13 sept.	90	34	2,9	19 390	14,0	20 338	417	16 273
2	Batiscan	03	2016	16 juin	26 sept.	102	12	4,3	23 032	6,8	18 060	115	20 744
3	Le Bras	12	2017	14 juin	13 sept.	91	20	2,9	26 462	5,2	32 084	253	27 163
4	Le Bras	12	2017	14 juin	29 sept.	107	26	3,2	22 006	4,3	20 671	204	20 193
5	Sainte-Rosalie	14	2014	21 juin	14 oct.	115	30	3,2	52 632	4,8	55 447	262	55 966
6	Achigan	14	2016	13 juin	12 sept.	91	10	2,5	40 094	10,0	58 806	306	53 539
7	Achigan	14	2017	14 juin	28 sept.	106	12	3,4	46 193	nd	nd	nd	nd
8	nd	14	2017	14 juin	28 sept.	106	12	3,9	52 861	9,5	56 499	190	54 653
9	Beaudette	14	2013	05 juin	19 sept.	106	27	2,8	49 354	8,2	63 785	363	42 473
10	Soulanges	14	2014	09 juin	17 sept.	100	16	nd	nd	27,0	52 034	320	46 891
11	Sainte-Rosalie	14	2015	25 mai	15 oct.	143	42	5,2	59 462	15,0	58 253	399	60 011
12	Saint-Damase	15	2017	14 juin	13 sept.	91	16	2,7	26 931	3,2	45 774	256	48 585
13	Uplands	15	2014	07 mai	19 août	104	10	2,5	23 673	31,0	17 833	317	23 331
14	Aston / Sainte-Rosalie	15	2016	30 avril	11 août	103	11	2,2	19 186	0,6	18 162	585	25 567
15	Saint -Damase	15	2017	14 juin	06 sept.	84	8	1,8	18 913	8,9	23 358	193	23 507
16	Napierville	16	2014	14 mai	25 sept.	134	22	3,5	48 819	65,0	48 868	438	51 735
17	Saint-Blaise	16	2015	08 mai	11 sept.	126	37	7,8	52 800	4,0	64 031	197	61 207
18	Laprairie	16	2017	04 juil.	04 oct.	92	22	3,0	11 737	28,0	11 856	353	11 652
19	Laprairie	16	2016	15 juin	06 sept.	83	28	3,7	35 082	5,1	35 553	136	30 142
20	Sainte-Brigide / Lery Tourbeux	16	2013	17 mai	31 juil.	75	25	2,1	10 755	15,0	11 896	138	12 757
21	Sainte-Brigide	16	2015	21 juin	25 août	65	16	7,3	14 414	13,0	12 174	292	16 087
Moyenne						101	21	3,5	32 690	13,9	36 274	287	35 124

¹ Région administrative; 03 : Capitale-Nationale; 12 : Chaudière-Appalaches; 14 : Laurentides; 15 : Lanaudière; 16 : Montérégie.

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

³ Rdt : Rendement sur base humide.

⁴ ISP₁ : Indice de saturation du sol en phosphore (P/Al)_{Mehlich-3}.

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

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

1.4.1 Essais N

Les traitements des essais azotés correspondaient à cinq doses de N variant de 0 à 200 kg/ha. Ces doses ont été appliquées sous forme de nitrate d'ammonium calcique (27-0-0) en deux apports (Tableau 2). Une première application des engrais était effectuée en bande, c.-à-d. dans un sillon creusé et refermé avec une binette, après la levée (une à deux semaines après le semis). Un soin particulier était apporté afin de ne pas déraciner les plantules. La deuxième application, aussi en bande, avait lieu au stade 6 feuilles, ou environ 6 semaines après le semis. 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 T13 des essais P et K (Tableaux 3 et 4 respectivement). En raison d'une erreur dans le calcul des engrais au site 18, les doses testées à celui-ci sont inférieures à celles prévues au protocole (0, 67, 100, 134 et 167 kg N/ha).

Tableau 2. Description des traitements des essais de fertilisation azotée

Essais N			Dose de N (kg/ha)				
Années	Nombre de sites	Mode et période d'application	T1	T2	T3	T4	T5
2013-2017	20 ¹	En bande après la levée	0	50	70	100	120
		En bande au stade 6 feuilles (≈ 6 semaines après le semis)	0	30	50	60	80
		Apport total	0	80	120	160	200

¹ Des erreurs d'application au site 18 ont mené à des doses différentes de celles présentées dans le tableau (0, 67, 100, 134 et 167 kg N/ha).

1.4.2 Essais P

Les traitements correspondaient à cinq doses de P₂O₅ variant de 0 à 160 kg/ha ou de 0 à 120 kg/ha. L'un ou l'autre de ces intervalles était sélectionné en fonction de l'ISP₁ du sol par rapport au seuil du REA (MDDEP, 2010; Tableau 3). L'engrais était appliqué en totalité en bande, c.-à-d. dans un sillon creusé et refermé avec une binette, après la levée (une à deux semaines après le semis), sous forme de superphosphate triple (0-46-0). Tous les traitements de P comportaient des apports complémentaires de N et de K₂O dont la dose, le mode et la période d'application correspondaient au T3 et au T13 des essais N et K (Tableaux 2 et 4). En raison d'une erreur dans le calcul des engrais au site 18, les doses testées à celui-ci sont inférieures à celles prévues au protocole (0, 17, 33, 67, et 100 kg P₂O₅/ha).

Tableau 3. Description des traitements des essais de fertilisation phosphatée

Essais P				Dose de P ₂ O ₅ (kg/ha)				
Années	Nombre de sites ¹	ISP ₁ ³	Mode et période d'application	T6	T7	T8	T9	T10
2013-2017	13	≤ 7,6 ou ≤ 13,1 %	En bande après la levée (apport total)	0	40	80	120	160
	7 ²	> 7,6 ou > 13,1 %	En bande après la levée (apport total)	0	20	40	80	120

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

² Des erreurs d'application au site 18 ont mené à des doses différentes de celles présentées dans le tableau (0, 17, 33, 67, et 100 kg P₂O₅/ha).

³ ISP₁ : indice de saturation en phosphore du sol, (P/Al)_{M3}. Le seuil est de 7,6 % pour les sols de plus de 30 % d'argile et de 13,1 % pour les sols de moins de 30 % d'argile.

1.4.3 Essais K

Les traitements correspondaient à cinq doses de K₂O variant de 0 à 280 kg/ha ou de 0 à 140 kg/ha selon la teneur du sol en K_{M3} (Tableau 4). En fonction des traitements, l'engrais était appliqué à deux moments : (i) après la levée (un ou deux apports, en bande et à la volée si applicable) et (ii) en bande au stade 6 feuilles. L'application en bande consistait en un sillon creusé et refermé avec une binette. Les sources d'engrais préconisées étaient le muriate de potassium (0-0-60) ou le sulfate de potassium et de magnésium (0-0-22-11) lorsque du Mg était nécessaire. Tous les traitements de K₂O comportaient des apports complémentaires de N et de P₂O₅ dont la dose, le mode et la période d'application correspondaient au T3 et au T8 des essais N et P (Tableaux 2 et 3). En raison d'une erreur dans le calcul des engrais au site 18, les doses testées à celui-ci (0, 59, 117, 176 et 234 kg K₂O/ha) sont inférieures à celles prévues au protocole. De plus, aux sites 2, 3 et 4, une erreur dans la considération de la

concentration du sulfate de potassium et de magnésium a occasionné une différence entre les doses testées (0, 50, 120, 190 et 260 kg K₂O/ha) et les doses prévues au protocole.

Tableau 4. Description des traitements des essais de fertilisation potassique

Essais K				Dose de K ₂ O (kg/ha)				
Années	Nombre de sites ¹	K _{M3} (kg/ha)	Mode et période d'application	T11	T12	T13	T14	T15
2013-2017	15 ²	≤ 400	À la volée après la levée	0	0	40	110	180
			En bande après la levée	0	50	50	50	50
			En bande au stade 6 feuilles (≈ 6 semaines après le semis)	0	20	50	50	50
			Apport total	0	70	140	210	280
	5	> 400	À la volée après la levée	0	0	0	0	35
			En bande après la levée	0	35	50	50	50
			En bande au stade 6 feuilles (≈ 6 semaines après le semis)	0	0	20	55	55
			Apport total	0	35	70	105	140

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 Des erreurs dans les calculs d'engrais ont mené à des doses différentes de celles présentées dans le tableau. Sites 2, 3 et 4 : 0, 50, 120, 190 et 260 kg K₂O/ha Site 18 : 0, 59, 117, 176 et 234 kg K₂O/ha.

1.5 Rendements

Les rendements ont été mesurés sur la partie racinaire de la betterave, sans le feuillage. Les statistiques descriptives des rendements totaux, des rendements vendables et des pourcentages de pertes à la récolte sont présentées au Tableau 5. Les rendements totaux moyens étaient de 38 131, 42 558 et 40 279 kg/ha dans les essais N, P et K, respectivement. Ceux-ci ont varié de façon importante entre les différents sites, les différents essais et les différents traitements, s'étendant de 3 486 à 95 241 kg/ha. Les pertes à la récolte (différence entre les rendements totaux et vendables) ont été en moyenne de 11 à 12 %, bien que dans de rares cas, celles-ci aient atteint 90 % en raison, notamment, de maladies ou d'immaturité. L'analyse exploratoire (ou validation des données) a permis de déterminer si les causes des pertes enregistrées pouvaient être liées ou non à la fertilisation. Dans les cas où les pertes n'étaient pas liées à la fertilisation et qu'elles ont nui à l'observation de la réponse à la fertilisation, les données ont été écartées.

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

	Nb obs.	Moyenne	Écart-type	Minimum	Maximum
Rendement total (kg/ha)					
N	300	38 131	18 529	3 486	80 033
P	295	42 558	21 294	8 563	95 241
K	298	40 279	19 069	6 467	82 610
Rendement vendable (calibres institution et cello; kg/ha)					
N	300	33 864	16 758	352	74 693
P	299	37 436	19 080	6 394	80 044
K	298	36 131	17 301	4 667	76 689
Rendement vendable de calibre cello (kg/ha)					
N	300	18 665	10 589	352	48 882
P	300	19 619	12 092	2 896	48 904
K	299	19 399	10 888	3 715	52 566
Pertes à la récolte (%)					
N	300	12	8	1	90
P	295	12	7	2	46
K	298	11	6	0	42

¹ Nb obs. : nombre d'observations; Les Nb obs. qui sont inférieurs à 300 sont causés par des données manquantes. Ex.: un sac de betteraves de catégorie « Institution » a été perdu, ainsi, les rendements vendables et totaux sont manquants.

Les rendements vendables en fonction des traitements de fertilisation sont présentés à la Figure 3. En général, dans tous les essais, une majorité de sites a atteint pour au moins un traitement la moyenne des rendements de référence de 2013 à 2017, illustrée par la ligne jaune. Les rendements de références ont été atteints moins souvent dans les essais P que dans les essais N et K. Environ la moitié des sites a enregistré des rendements vendables autour des rendements de référence, alors que les rendements de l'autre moitié avoisinaient le double des rendements de référence. Cette séparation en deux groupes de rendements pourrait s'expliquer par la régie de culture (rangs doubles ou simples; plein champ, butte ou billons), la variété culturale (voir Tableau 6 de la section suivante) ou la durée de l'essai.

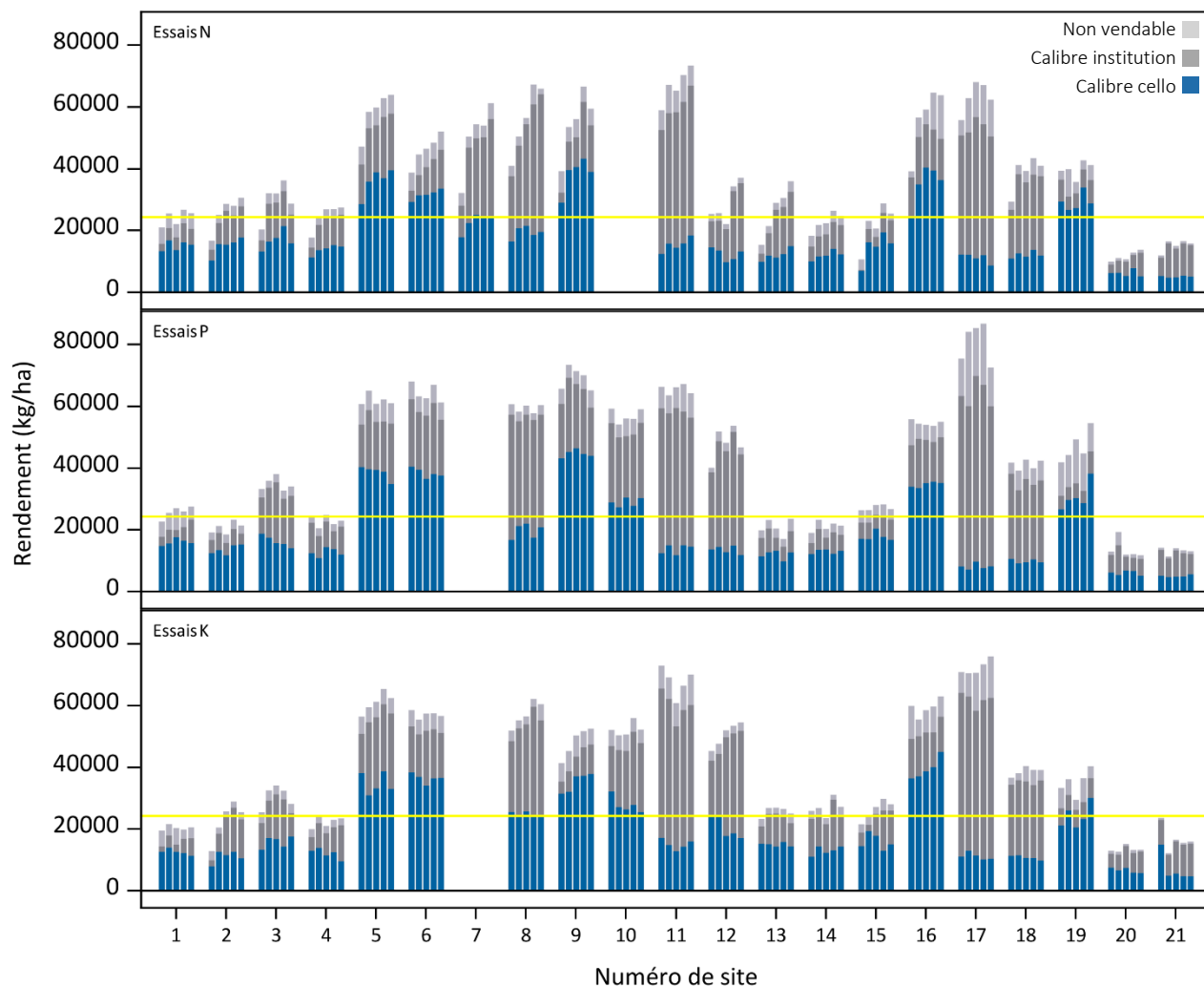


Figure 3. Rendement moyen par site des principales catégories de récolte en fonction des traitements de fertilisation. Bleu : calibre cello, gris foncé : calibre institution, gris pâle : non vendable. Les traitements de fertilisation sont les doses croissantes d'engrais de l'élément à l'essai et sont détaillés à la section 1.4. Les rendements de référence de la culture (ligne jaune) sont une moyenne des rendements à l'hectare du Québec pour les années 2013 à 2017 (min.: 20 900, max.: 26 200 kg/ha; Statistique Canada, 2021).

1.6 Aspects additionnels pour l'interprétation des résultats

1.6.1 Variété culturale

Les essais ont été réalisés exclusivement avec des variétés de betterave potagère, lesquelles reflètent les variétés utilisées en conditions commerciales. La variété Red Ace, une variété de betterave rouge reconnue pour être hautement productive (Norseco, 2021), a été la plus utilisée dans les essais (55 % dans N et 60 % dans P et K). Une variété de betterave jaune orangé, la Touchstone Gold, a été utilisée à deux sites (5 à 10 % des données, selon les essais). Les variétés et leurs proportions respectives dans chaque essai sont détaillées au Tableau 6.

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

Variété	Proportion des essais sur lesquels était testée chaque variété (%)			Type de betterave	Rendement vendable moyen (kg/ha)
	N	P	K		
Red Ace	55 ¹	60	60	Rouge	40 850
Camaro	10	10	10	Rouge	31 032
Touchstone Gold	10	5	5	Jaune	52 379
Détroit	5	5	5	Rouge	18 647
Zeppo	5	5	5	Rouge	20 661
Inconnue	15	15	15	Inconnu	22 900
Total	100 %	100 %	100 %		

¹ Par exemple, 55 % des essais N de la betterave ont utilisé la variété Red Ace, une betterave rouge pour laquelle le rendement moyen - essais N, P et K confondus - a été de 40 850 kg/ha.

1.6.2 Précédent cultural

Les essais de betterave ont suivi des cultures de soya à cinq sites (25 % des données) et de maïs-grain à quatre sites (18 % des données). Dans des proportions plus faibles (≈ 5 à 10 % des données pour chacune), les essais ont suivi des cultures de rutabaga, de brocoli, de carotte, de betterave, de gazon en plaques ou de panais. Pour 10 % des données, l'essai suivait une jachère.

1.6.3 Irrigation

Parmi les essais de betterave, 85 % rapportaient explicitement une absence d'irrigation. Les autres sites présentaient des informations manquantes ou incomplètes. Ce facteur n'a donc pas été retenu 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 une exclusion de données. Lors de la réalisation des essais, lorsque nécessaire, certaines parcelles ont été abandonnées par l'équipe de terrain pour des raisons diverses, dont la sécheresse, le mauvais établissement de la culture dû à la fonte des semis, la présence de maladie foliaire, etc. Dans le cadre du traitement des données, une analyse exploratoire a été également réalisée minutieusement, ce qui a permis entre autres de détecter la présence de données aberrantes ou influentes, et de vérifier la représentativité des données de rendements en comparaison à ce qui est obtenu en contexte de production commerciale sur la même période. Dans le cadre de cette procédure, les statistiques descriptives sur les rendements et la densité de la population ont été analysées, notamment les coefficients de variation associés aux données de chacun des sites. Par la suite, une attention plus particulière a été portée sur les sites présentant une variation de rendements et de densité de population supérieure à 30 % et à 15 %, respectivement. 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).

Le bilan de la validation des données est présenté au Tableau 7. À l'issue de l'analyse exploratoire, 73 % (78, 69 et 73 % des essais N, P et K respectivement) du jeu de données initial a été validé et conservé pour la suite de l'analyse. La liste des données exclues lors de la validation est présentée à l'Annexe I.

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

Essai	Jeu de données initial		Jeu de données final		Validation
	Nb sites	Nb obs.	Nb sites	Nb obs.	(%)
N	20	300	16	234	78
P	20	300	16	206	69
K	20	300	16	219	73

1.8 Calculs et analyses statistiques

La méthodologie générale employée pour le calcul des VSRF et les analyses statistiques préconisées sont similaires pour toutes les cultures traitées dans le MIRVRF. Lorsque des ajustements spécifiques à une culture ont été requis, ceux-ci sont décrits dans la présente section ou directement dans les chapitres des éléments (N, P ou K) requérant ces ajustements. En complément des calculs et analyses, tout au long de la démarche d'établissement des VSRF, divers intervenants du milieu ont été contactés (ex.: conseillers du MAPAQ et de Club conseil en agroenvironnement, producteurs, professionnels de centres de recherche appliquée). Les échanges avec ces spécialistes ont permis de comparer les conditions des essais avec les pratiques culturales en vigueur, afin de valider l'adéquation avec les recommandations (VSRF). Dans les cas où les essais ont été conduits différemment des pratiques en vigueur, ces différences sont mises en évidence dans les notes de bas de tableau et dans les éléments de réflexion amenés par l'IRDA. Dans le cas spécifique de la betterave, 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 ($Rendement_{Témoin}$) par le rendement vendable maximal ($Rendement_{Maximal}$) parmi tous les traitements du bloc, incluant le témoin (Éq. 2). Dans le cas où une unité expérimentale est écartée à l'analyse exploratoire, le rendement maximal du bloc concerné est considéré impossible à déterminer et aucun RRel n'est déterminé.

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

Un RRel inférieur à 100 % indique une réponse positive de la culture à la fertilisation. À l'opposé, si le rendement maximal est atteint dans la parcelle témoin, le RRel est égal à 100 %, indiquant que le potentiel de rendement de la culture a été atteint sans l'apport du fertilisant testé. La considération des rendements sur une base relative

permet, entre autres, d'atténuer les effets de sites et des conditions météorologiques annuelles sur la productivité.

Le nuage de points obtenu avec les RRel de tous les blocs de tous les essais est ensuite analysé avec la procédure de partition Cate-Nelson. Celle-ci vise à établir un seuil de l'indicateur de fertilité de sol testé à partir duquel la culture ne répond plus à la fertilisation. Le nuage de points se retrouve ainsi divisé en quatre quadrants selon un axe vertical correspondant à la valeur critique de l'indicateur de fertilité du sol, et un axe horizontal correspondant au rendement relatif optimal de la partition. Ces axes sont placés de façon à maximiser le nombre de points dans les quadrants des vrais négatifs et positifs, tout en minimisant ceux dans les quadrants des faux négatifs et positifs (Figure 4).

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

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

Afin de s'assurer de la performance des seuils déterminés avec le test de Cate-Nelson, les valeurs du P de Fisher des partitions ainsi que les mesures de précision, sensibilité et spécificité sont calculées et maximisées (Parent et al., 2013) :

Sensitivité : Probabilité pour qu'une réponse de la culture à la fertilisation soit correctement diagnostiquée dans un sol ayant une caractérisation située en dessous du seuil critique considéré. Ce critère est calculé à partir des nombres d'observations des quadrants suivants (Figure 4) : $VP/(VP+FN)$.

Spécificité : Probabilité pour qu'une non-réponse de la culture à la fertilisation (plateau de l'augmentation des rendements) soit correctement diagnostiquée dans un sol ayant une caractérisation située au-dessus du seuil critique considéré. Ce critère est calculé à partir des nombres d'observations des quadrants suivants (Figure 4) : $VN/(VN+FP)$.

Précision : Probabilité pour que la réponse ou la non-réponse de la culture à la fertilisation soit correctement diagnostiquée pour une analyse de sol donnée. Elle est calculée à partir des nombres d'observations des quadrants suivants (Figure 4) : $(VN+VP)/(VN+FN+VP+FP)$.

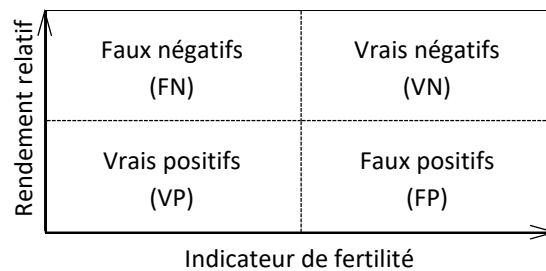


Figure 4. Définitions des quadrants d'un test de partition binaire de Cate-Nelson (1979).

1.8.2 Détermination des doses optimales de fertilisants

Les doses optimales de fertilisants pour chaque classe de fertilité de sol sont calculées par analyses de variances (ANOVA). Ainsi, les ANOVA sont effectuées séparément pour les sols se trouvant de part et d'autre des seuils agronomiques de réponse déterminés avec la procédure expliquée précédemment à la section 1.8.1.

L'effet de l'apport des doses croissantes de fertilisants est étudié en tenant compte du rapport de rendements (ROM, Éq. 3). L'utilisation du ROM permet d'éviter les biais causés par les grandes variations qui pourraient être observées entre les rendements produits en grandes surfaces en contexte de production et ceux obtenus en parcelles de recherche. Comme expliqué précédemment pour le rendement relatif, l'utilisation du ROM permet également d'atténuer les effets des sites et des conditions météorologiques annuelles sur la productivité. Le ROM est calculé pour chaque parcelle fertilisée d'un bloc, en utilisant l'équation suivante (Éq. 3) :

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

L'ANOVA est effectuée en utilisant la procédure *mixed* de SAS® (SAS Institute Inc., 2013) et en considérant les blocs et les sites comme des effets aléatoires. Lorsque l'ANOVA indique un effet significatif ($P < 0,05$) ou une tendance ($P < 0,12$) à un effet de la dose sur le ROM, des tests de Student (test t) sont réalisés afin de faire les comparaisons multiples des moyennes des traitements permettant de déterminer les doses agronomiques optimales menant aux meilleurs rendements. Il est important de souligner qu'en raison de la considération des rendements sur une base relative (ROM), le test de Student permet de faire une comparaison multiple des moyennes des traitements entre elles sans tenir compte de l'effet de la fertilisation par rapport au témoin. Ainsi, l'absence de différence significative entre les traitements ne traduit pas nécessairement une absence de différence par rapport au témoin. Le calcul des intervalles de confiance à 90 % permet de déterminer si l'augmentation de rendement obtenue pour un traitement donné est numériquement différente en comparaison au témoin. À titre exploratoire, les ANOVA réalisées pour chaque site pris séparément ont également été consultées dans le cadre de la détermination des VSRF.

Puisque les doses testées dans les divers essais varient (voir section 1.4), les doses similaires ont dû être regroupées afin d'équilibrer les jeux de données et d'augmenter la puissance de l'ANOVA. Ainsi, les groupes de doses ont été considérés comme des variables catégoriques plutôt que numériques continues dans le modèle statistique. Les groupes de doses sont exprimés sous cette forme dans le présent document : 1-30-60. Dans ce

cas, par exemple, il s'agit du 1^{er} groupe de doses testées (1-30-60) et les doses qui le composent vont de 30 à 60 kg/ha de l'élément testé (1-30-60). La VSRF proposée pour une catégorie de sol donnée est basée sur la répartition des doses testées à l'intérieur du groupe correspondant.

1.8.3 Diagnostic nutritionnel et quantités d'éléments nutritifs exportés

Le taux d'humidité, la concentration en éléments nutritifs (majeurs et mineurs) dans les tissus et les exportations en N, P₂O₅ et K₂O ont été calculés en considérant exclusivement les racines, soit les betteraves sans les feuilles. Ainsi, les valeurs d'exportations obtenues ne s'appliquent qu'à la régie de production qui procède à l'enlèvement des feuilles au champ lors de la récolte. Conformément à ce type de régie de production, le diagnostic nutritionnel a été effectué sur la base des rendements totaux considérant un tri des betteraves vendables vs. non-vendables en post-récolte (hors du champ).

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

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

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

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

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

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

Des analyses complémentaires ont été effectuées afin d'évaluer l'effet des traitements de fertilisation sur les pourcentages de pertes à la récolte et sur les pourcentages de pertes suivant une période d'entreposage. Des analyses de variance (modèles linéaires mixtes) ont servi à déterminer si la fertilisation affectait ces paramètres. Des tests de comparaison de moyennes ont permis de préciser les conclusions au besoin. De plus, la robustesse de l'attache à la tige a été évaluée dans le cadre des essais de fertilisation de la betterave, puisque la récolte mécanique s'effectue en tirant sur le feuillage. Ces données de nature catégorielle (indices de 1 à 3; *attache insuffisante*, *attache moyenne* et *bonne attache*) ont été analysées au moyen d'un test exact de Fisher et d'un modèle linéaire mixte généralisé pour variable multinomiale. L'effet de la fertilisation sur les calibres a été évalué par des analyses de fréquences et un test du Khi-2.

2. FERTILISATION AZOTÉE

2.1 Portrait et représentativité des données

Les résultats des analyses chimiques de la couche de sol de surface (0-20 cm) pour les essais N sont résumés au Tableau 8. À plus de la moitié des sites, le pH se situait dans l'intervalle de 6,0 à 7,0. Le pH optimal pour la culture de la betterave est établi à 6,3 au Québec (CRAAQ, 2010) et entre 6,8 à 7,8 en Ontario (MAAARO, 2011). Les trois groupes de textures (G1, G2 et G3) ont été représentés de façon équivalente dans le jeu de données. Dans les sols G1, près de la moitié des sites avait une teneur en MO comprise entre 3 et 5 %, alors que moins de 20 % d'entre eux avaient une teneur inférieure à 3 %, ce qui est non optimal pour l'évaluation de la réponse de la culture à la fertilisation azotée. Les sols faiblement pourvus en MO (entre 2 et 3 %) ont été mieux représentés dans les G2 et G3, bien que peu d'entre eux étaient très faiblement pourvus en MO (seulement 6 % des blocs avaient une MO ≤ 2 %). Dans ces mêmes groupes de textures, aucun sol n'a eu une teneur en MO comprise entre 5 et 6 %, ce qui pourrait constituer une lacune dans l'étude de la réponse à la fertilisation. Concernant la teneur en N-NO₃ (0-30 cm) au semis des sols, les blocs ont été bien repartis.

Tableau 8. Répartition des blocs des essais N de betteraves 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				
$\leq 6,0$	29	≤ 2	7	6	≤ 5	17	G1	32
6,0 – 7,0	54	2 – 3	12	38	5 – 10	29	G2	31
> 7,0	16	3 – 5	47	49	10 – 15	37	G3	38
-	-	5 – 6	14	0	> 15	16	-	-
-	-	> 6	20	8	-	-	-	-

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

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

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

⁴ 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 de sol reconnues dans la littérature scientifique peuvent influencer la réponse des cultures à la fertilisation azotée et ainsi devenir des indicateurs de prédiction de la fertilité. Le potentiel de plusieurs indicateurs à expliquer la réponse à la fertilisation a donc été testé avec le test de Cate-Nelson (1971) : la teneur en nitrate du sol (N-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 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 9). Les valeurs critiques obtenues sont ensuite utilisées pour les analyses de variance en tant que seuils de réponse agronomique.

Les apports d'azote par fertilisation peuvent avoir un effet déterminant sur les calibres de betteraves obtenus à la récolte. Or, les calibres souhaités diffèrent selon les marchés visés par les producteurs. Ainsi, deux variables

de réponse, distinguées selon le calibre des betteraves, ont été considérées lors de la détermination des seuils de réponse : i) le rendement vendable qui considère les betteraves des calibres cello et institution dont le diamètre est compris entre 3,8 et 10,2 cm, et ii) le rendement cello qui considère les betteraves ayant un diamètre compris entre 3,8 et 6,4 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 9 pour les deux variables de réponse considérées. La teneur en N-NO₃ (0-30 cm) au semis et la teneur en matière organique se sont révélés être de bons indicateurs potentiels de la réponse de la betterave à la fertilisation azotée. Lorsqu'analysé sans tenir compte du groupe de textures du sol, le seuil de MO reste le même indépendamment de la variable de réponse étudiée. À l'opposé, dans les sols G1, le seuil de réponse était plus élevé pour les betteraves de calibre cello (Tableau 9).

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

Variable de réponse	Indicateur de sol	Groupes de textures ⁴	N ⁵	Valeur critique	RRel ¹ (%)	Sensitivité	Spécificité	Précision	P
RRel vendable ^{1, 2}	N-NO ₃ au semis (ppm ; 0-30 cm)	G1, G2, G3	41	16,2	85	1,00	0,92	0,93	0,002
		G1	14	17,9	81	0,67	0,91	0,86	0,093
		G3	16	12,8	78	1,00	0,86	0,88	0,050
		G2, G3	27	13,7	75	1,00	0,92	0,93	0,003
	Matière organique (%) ³	G1, G2, G3	41	5,5	80	0,60	0,94	0,90	0,009
		G1	14	4,2	78	1,00	0,80	0,67	0,015
RRel cello ^{1, 2}	Matière organique (%) ³	G1, G2, G3	41	5,5	77	0,36	0,97	0,80	0,014
		G1	14	6,6	77	0,75	1,00	0,93	0,011
		G1, G2	25	6,6	77	0,50	1,00	0,88	0,009

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

² Vendable: betteraves dont le diamètre est entre 3,8 et 10,2 cm; Cello : betteraves dont le diamètre est entre 3,8 et 6,4 cm.

³ La matière organique a été déterminée par la méthode par perte au feu.

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

⁵ N : Nombre d'observations.

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

2.2.2.1 Rendement vendable

Comme mentionné dans la section 1.8.2, les ANOVA de l'effet de la fertilisation sur la productivité des cultures ont été effectuées en utilisant les rapports de rendements (ROM) plutôt que les rendements absolus. Sur les graphiques en forêt (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. Comme mentionné précédemment dans la section 1.8.2, des comparaisons multiples des moyennes permettent de sélectionner le meilleur traitement. De plus, en absence de différences significatives entre les traitements, les intervalles de confiances à 90 % permettent de déterminer si le rendement obtenu pour un traitement donné est numériquement différent du témoin.

En premier lieu, une ANOVA a été effectuée sans indicateur de classe de fertilité en considérant l'ensemble des observations (modèle A). En second lieu, les ANOVA ont été effectuées à l'intérieur des groupes de textures (modèle B). En troisième lieu, pour les sols de groupe de textures G1, des ANOVA ont été effectuées de part et d'autre d'un seuil de matière organique significatif déterminé par le test de Cate-Nelson (modèle C), lequel a été arrondi au dixième afin d'alléger la présentation. Pour les sols des groupes G2 et G3, puisque la détermination d'un seuil n'a pas été possible avec le test de Cate-Nelson en raison de lacunes de représentativité, une limite du jeu de données a pu être utilisée pour étudier la réponse à la fertilisation dans un intervalle donné (modèle D). Seuls les résultats des ANOVA permettant l'interprétation agronomique de la réponse de la culture à l'engrais sont présentés dans le présent rapport.

Les résultats des analyses de variance (ANOVA) des essais N de la betterave réalisés à partir des rendements vendables sont présentés à la Figure 5. Le modèle sans indicateur (A) démontre un effet fortement significatif ($P < 0,0001$; $N = 183$) des doses de N sur les ROM. Le test de comparaison des moyennes indique que la plus forte dose testée (200 kg N/ha) a mené aux gains de rendements les plus élevés, soit 60,3 % en moyenne par rapport au témoin sans azote. Cependant, aucun plafond de gain de rendement n'a été atteint. Ainsi, on ne peut exclure qu'un apport supplémentaire d'azote aurait pu augmenter davantage le rendement de la culture. De manière générale, ces résultats sont en accord avec de précédentes études réalisées en Europe et en Nouvelle-Zélande ayant démontré la propension de la betterave à répondre à la fertilisation azotée jusqu'à des doses de 120 à 225 kg N/ha (Carciu et al., 2009; Mack, 1989; Ugrinovic, 1999), voire de 320 kg/ha (Reid et al., 2020). D'autres auteurs ont toutefois démontré que la réponse à l'engrais était aussi fortement influencée par d'autres facteurs agro-climatiques (Herak Custic et al., 2007).

L'analyse des résultats par groupes de textures montre que la réponse de la culture diffère en fonction de ceux-ci (modèle B). Bien qu'une réponse à l'engrais azotée soit observée dans tous les groupes de textures, celle-ci a été d'une plus grande ampleur dans les sols de textures moyennes et grossières (sols G2-G3 combinés; $P < 0,0001$; gains moyens de 62,9 %), que dans les sols de textures fines (sols G1, $P = 0,022$; gains moyens de 23,1 %). De plus, la dose agronomique optimale a été plus faible (160 à 167 kg N/ha) dans les sols lourds que dans les sols moyens à grossiers (200 kg N/ha). Dans ces derniers, il est intéressant de constater qu'aucun plafond de rendement n'a été atteint même avec la plus forte de dose testée, traduisant qu'un apport supplémentaire de N pourrait augmenter davantage les rendements de la culture.

Dans les sols G1, l'utilisation d'un seuil agronomique de réponse (teneur en MO_{PAF}) a permis de nuancer la réponse à l'engrais observée (modèle C). La dose agronomique optimale a été de 160 à 167 kg N/ha jusqu'à une teneur de 4,2 % de MO. Au-delà de cette valeur, aucune différence entre les doses de N testée n'a été observée, suggérant que la plus petite dose testée (80 à 100 kg N/ha) était suffisante pour l'atteinte des meilleurs rendements dans cette catégorie de sols. À noter que le nombre plus faible de sites au-delà du seuil réduit la puissance statistique de l'analyse, ce qui a pu nuire à la détection de différences entre les ROM.

Dans les sols G2 et G3 (modèle D), les valeurs de MO étaient concentrées entre 2,0 et 4,5 %, ce qui a permis de bien couvrir cet intervalle. Un seul bloc se retrouvait en dessous de 2,0 % (1,2 %) et celui-ci a été intégré à l'analyse pour les sols de moins de 4,5 %. Un seul site (trois blocs) se retrouvait au-delà de la valeur de 4,5 % (site 21; MO 6,7 à 8,2 %), lequel a fait l'objet d'une analyse séparée. En raison de ces teneurs en MO réparties inégalement, le test de Cate-Nelson n'a pas permis de déterminer un seuil de réponse agronomique. Pour cette

raison, ce sont les limites du jeu de données de 4,5 et de 6,6 % qui ont été utilisées pour délimiter les classes en vue de l'ANOVA. Sous 4,5 % de MO, c'est l'apport de 200 kg N/ha qui a été optimal (gain de 79 % par rapport au témoin, $P < 0,001$). Au-delà de la valeur de 6,7 %, les traitements n'ont pas différé entre eux. Toutefois, il convient de rappeler qu'un seul site faisait l'objet de cette catégorie. Ainsi, il ne peut être exclu qu'il s'agisse là d'un effet de site et que cette conclusion ne puisse être étendue à tous, bien que des recommandations en fertilisation aient déjà été établies sur des sites uniques (Benjannet et al., 2018). Cependant, la matière organique du sol peut fournir du N par minéralisation avec plus ou moins d'intensité selon les conditions prévalant au champ (N'Dayegamiye et al., 2007). Il est donc attendu qu'un sol mieux pourvu en MO et dont la santé globale n'est pas compromise sera moins dépendant des apports azotés par fertilisation.

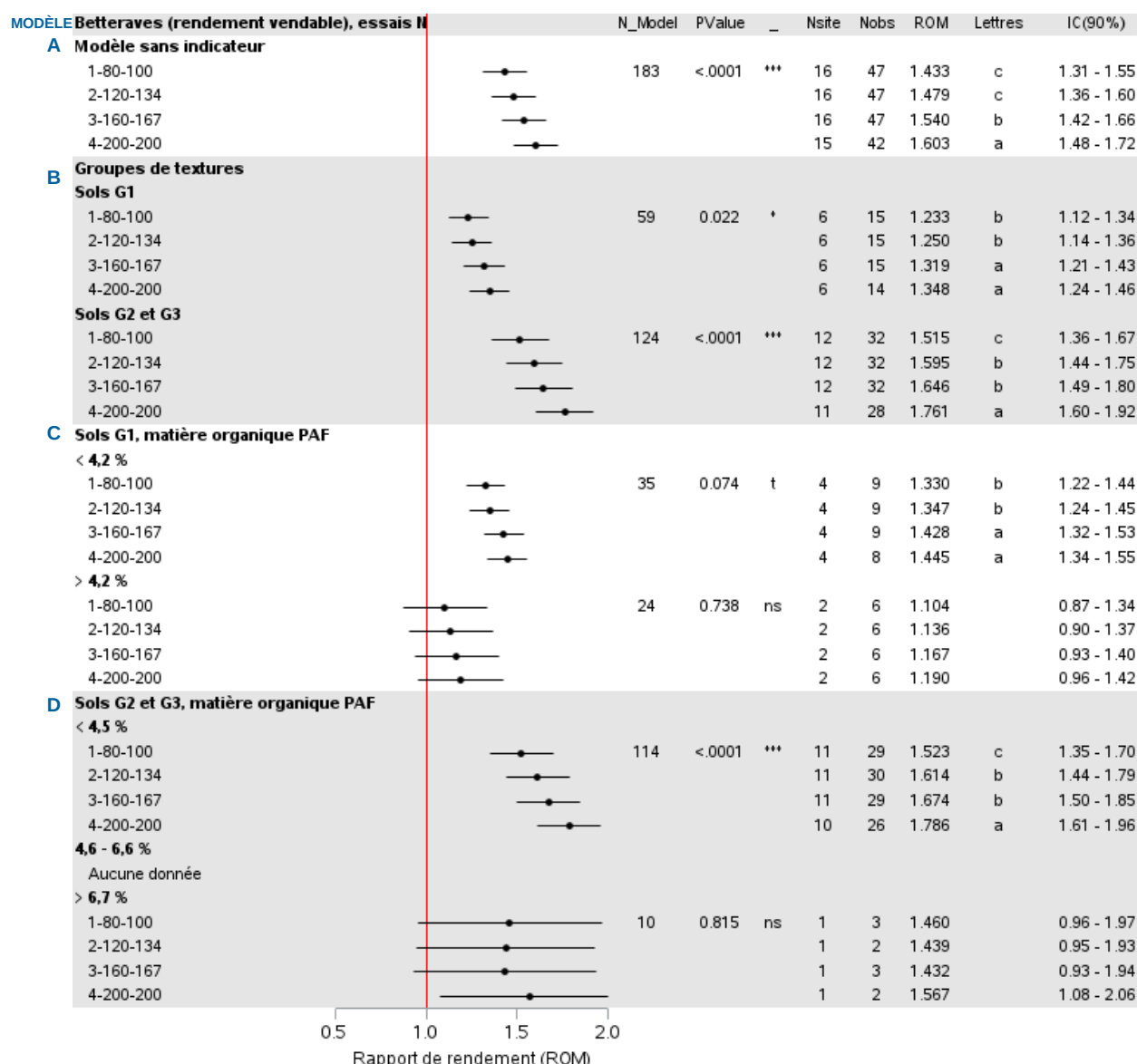


Figure 5. Résultats des analyses de variance sur la réponse de la betterave vendable (diamètre entre 3,8 et 10,2 cm) aux doses croissantes d'azote. G1 : sols à texture fine ; G2, sols à texture moyenne ; G3 : sols à texture grossière ; N_model : nombre d'observations du modèle ; Nsite : nombre de sites ; Nobs : nombre d'observations ; ROM : rapport de rendement (rendement parcelle fertilisée/rendement parcelle témoin) ; IC : Intervalle de confiance ; Les moyennes d'une même catégorie qui ne partagent pas la même lettre sont significativement différentes au seuil $P < 0,12$.

2.2.2.2 Rendement cello

Pour le rendement de calibre cello, les résultats des analyses de variance (ANOVA) des essais N de la betterave sont présentés à la Figure 6. De même que pour le rendement vendable (voir la section 2.2.2.1), seuls les résultats des ANOVA permettant l'interprétation agronomique de la réponse de la culture à l'engrais sont présentés. Contrairement à ce qui a été observé pour le rendement vendable, le modèle sans indicateur (A) ne démontre aucun effet significatif ($P = 0,263$; $N = 183$) des doses de N sur les ROM (Figure 6). Ces résultats indiquent que la plus petite dose de N testée (80 à 100 kg N/ha) a mené aux gains de rendements agronomiques optimaux. Les gains de rendement par rapport au témoin sans azote obtenus à la suite de cet apport ont varié de 12 à 32 %, avec une moyenne de 22 %. Ces résultats traduisent qu'à partir d'une dose de 80 kg/ha, l'apport supplémentaire de N ne permettrait pas d'augmenter les rendements en betteraves de calibre cello. Par conséquent, la forte réponse à la fertilisation azotée observée à la section précédente quant au rendement vendable (Figure 5) consisterait principalement en une augmentation de la proportion des betteraves de calibre institution (diamètre entre 6,4 et 10,2 cm; voir section 2.2.3.1).,

De même, lorsque les groupes de textures de sols sont analysés séparément, les résultats ne montrent aucune différence significative entre les traitements pour le rendement de la betterave de calibre cello, tant dans les sols G1 ($P = 0,586$; $N = 59$), que dans les sols G2-G3 ($P = 0,410$; $N = 124$) (Figure 6, modèle B) et ce, bien que le gain de rendement à fertiliser soit important. La dose agronomique optimale a donc été de 80 à 100 kg N/ha, pour des gains de rendement moyens de 21,2 % et de 26,4 % dans les sols G1 et G2-G3, respectivement. Dans les sols G2-G3, bien que les différences soient non statistiquement significatives entre les traitements, les résultats ont montré qu'un gain de rendement de 7,3 % a été obtenu à la suite de l'application de la dose de 120-134 kg N/ha. Ces observations sont en accord avec celles sur le rendement vendable (Figure 5) démontrant une plus grande réponse de la culture à la fertilisation azotée dans les sols G2-G3 (dose optimale de 200 kg N/ha), que dans les sols G1 (dose optimale de 160 kg N/ha).

Une ANOVA a également été réalisée en tenant compte de la teneur en MO du sol, indépendamment des groupes de textures (modèle C). Tel que présenté dans le Tableau 9, un seuil de 5,6 % de MO a été utilisé pour distinguer la réponse de la culture à la fertilisation azotée. Dans les sols ayant une teneur en MO inférieure à 1,95 %, la faible quantité de données disponibles n'a pas permis de réaliser une analyse de variance. Pour une teneur entre 1,95 % et 5,6 % MO, les résultats des analyses n'ont montré aucune différence significative entre les traitements ($P = 0,224$; $N = 59$), traduisant que la plus petite dose testée (80-100 kg N/ha) a été suffisante pour l'obtention du rendement optimal. L'application de cette dose a permis d'enregistrer un gain de rendements de 27,3 % par rapport au témoin sans engrais. Au-delà du seuil de 5,6 %, tel qu'illustré à la Figure 6, aucun gain de rendements de betteraves de calibre cello n'a été obtenu par rapport au traitement témoin. La présence de ROM inférieurs à 1 traduit que le rendement en calibre cello a été plus important dans le traitement témoin que dans les parcelles fertilisées. À partir de ces observations, il est attendu que dans les sols ayant des teneurs élevées en MO (plus de 5,6 %), un apport supplémentaire de 80 kg N/ha pourrait entraîner l'obtention de betteraves de calibre institution majoritairement au détriment de celles de calibre cello.

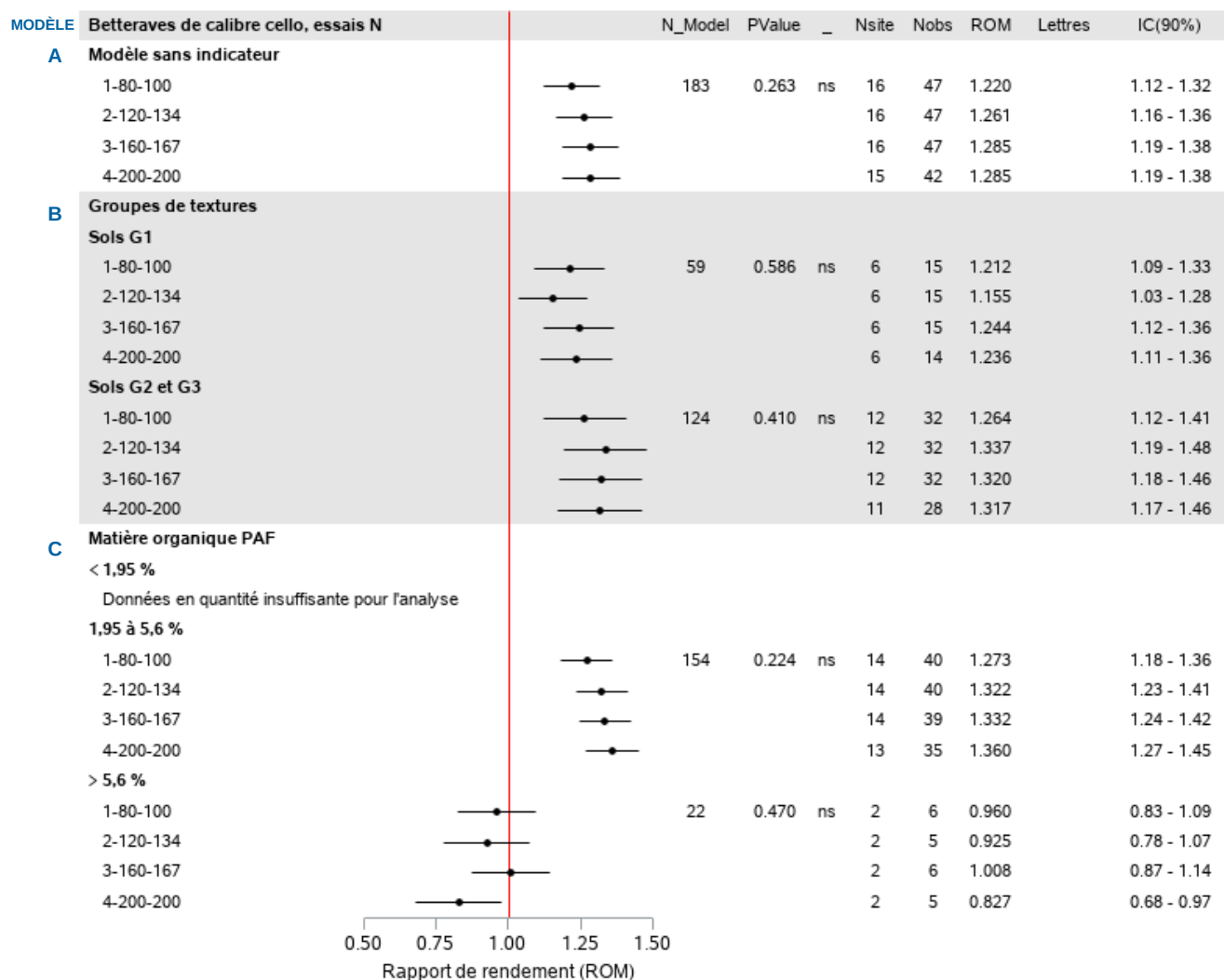


Figure 6. Résultats des analyses de variance sur la réponse de la betterave de calibre cello (diamètre entre 3,8 et 6,4 cm) aux doses croissantes d'azote. G1 : sols à texture fine ; G2, sols à texture moyenne ; G3 : sols à texture grossière ; N_model : nombre d'observations du modèle ; Nsite : nombre de sites ; Nobs : nombre d'observations ; ROM : rapport de rendement (rendement parcelle fertilisée/rendement parcelle témoin) ; IC : Intervalle de confiance ; Les moyennes d'une même catégorie qui ne partagent pas la même lettre sont significativement différentes au seuil $P < 0,12$.

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

2.2.3.1 Qualité des betteraves

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 feuillage. Comme l'azote contribue en grande partie à la croissance et au développement de la partie aérienne de la betterave, son effet sur la robustesse de l'attache à la tige est d'intérêt. Dans le cadre des présents essais, la robustesse de l'attache à la tige a été évaluée au moment de la récolte par la vérification systématique de quelques plants dans chaque unité expérimentale. Trois niveaux de robustesse pouvaient être attribués, pour des cotes de 1 (attache insuffisante) à 3 (très bonne attache). Certains biais peuvent découler de cette analyse, laquelle pouvait différer en fonction des collaborateurs aux plans de l'appréciation de la robustesse du feuillage et du nombre de plants sélectionnés dans chaque unité expérimentale. Les résultats de cette évaluation sont présentés à la Figure 7.

Le test exact de Fisher a révélé que la dose de N n'a pas eu d'effet sur la robustesse de l'attache du feuillage ($P = 0,9$), toutes textures de sol confondues. En effet, 85 % et plus des parcelles ont montré une « très bonne attache » du feuillage à la suite de l'application des doses allant de 0 à 200 kg N/ha. L'analyse par groupe de textures ne montre pas davantage d'effet significatif de la fertilisation azotée sur la robustesse de l'attache du feuillage, tant dans les sols G1 ($P = 0,993$) que dans ceux G2-G3 ($P = 1,00$). Par conséquent, aucun ajustement des VSRF n'a été effectué sur la base de ce critère. Il est toutefois intéressant de constater que les analyses par groupe de textures du sol ont révélé que l'attache du feuillage est généralement meilleure dans les sols G2-G3 en comparaison des sols G1 (Figure 7). En effet, les betteraves des essais réalisés en sols G1 ont semblé présenter davantage une attache moyenne ou insuffisante, les proportions des parcelles ayant eu ces cotes étant de 25 % environ, contre $\approx 10\%$ pour celles cultivées dans les sols G2-G3. Cette différence pourrait s'expliquer par la dureté du sol en fin de saison, les sols plus argileux retenant plus fermement les betteraves que les sols de textures moyennes à grossières, entraînant ainsi la nécessité de tirer plus fortement pour les extirper.

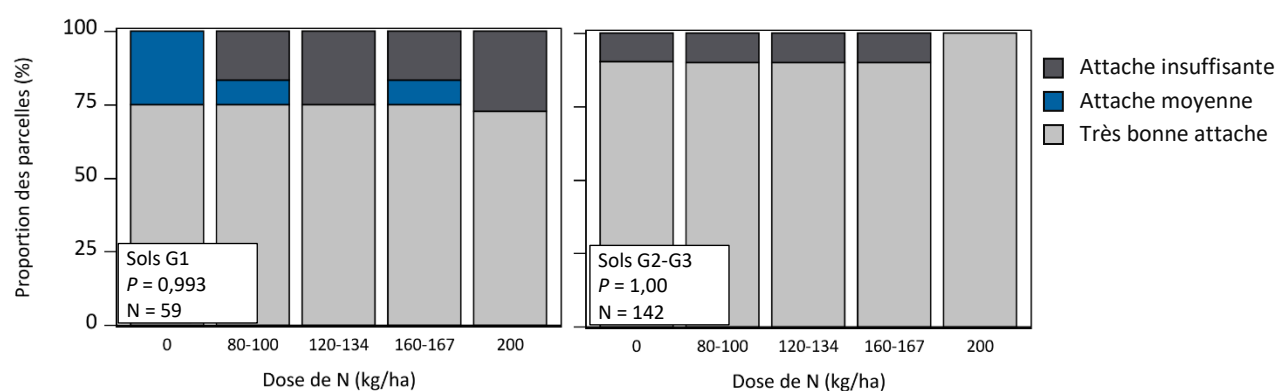


Figure 7. Évaluation de la robustesse de l'attache du feuillage selon les doses de N. N = Nombre d'observations.

Calibres à la récolte

Toutes textures de sol confondues, l'augmentation de la dose d'azote a fait augmenter significativement la proportion de betteraves de calibre institution ($P < 0,0001$). Sans apport de N, la proportion des betteraves de calibre institution était de 42,6 % du rendement vendable (11 462 sur 26 888 kg/ha), contre 49,2 (19 359 sur 39 323 kg/ha) à 51,0 % (20 774 sur 40 737 kg/ha) suivant des apports de 160-167 kg N/ha et de 200 kg N/ha, respectivement. Considérant l'augmentation du rendement vendable suivant l'augmentation des doses de N, cette augmentation de la proportion du plus gros calibre était attendue. La tendance est similaire dans les groupes de textures G1 vs. G2-G3. Dans les sols du groupe G1, la proportion de betteraves de gros calibres (institution) a augmenté significativement jusqu'à l'application de la dose de 160-167 kg N/ha ($P = 0,017$), alors que dans les sols des groupes G2 et G3, elle a augmenté continuellement jusqu'à la plus forte dose de N testée ($P < 0,0001$; Figure 8). Ces résultats sont en accord avec les doses agronomiques optimales énoncées à la section 2.2.2. Concernant les betteraves de calibre cello, l'analyse des données montre également un effet de la fertilisation azotée dans les deux types groupes de textures de sols (G1 : $P = 0,0019$ et G2-G3 : $P < 0,0001$), avec une dose optimale de 80-100 kg N/ha, soit la plus petite dose testée. Ainsi, dans tous les types de sols, au-delà de l'application de 80-100 kg N/ha, le choix de la dose menant aux meilleurs rendements entraînera une augmentation de la prévalence du calibre institution. Or, dans le cadre de la production pour le marché frais, le calibre cello est le plus recherché. À l'opposé, le plus gros calibre (institution) est le plus prisé pour le marché de la transformation.

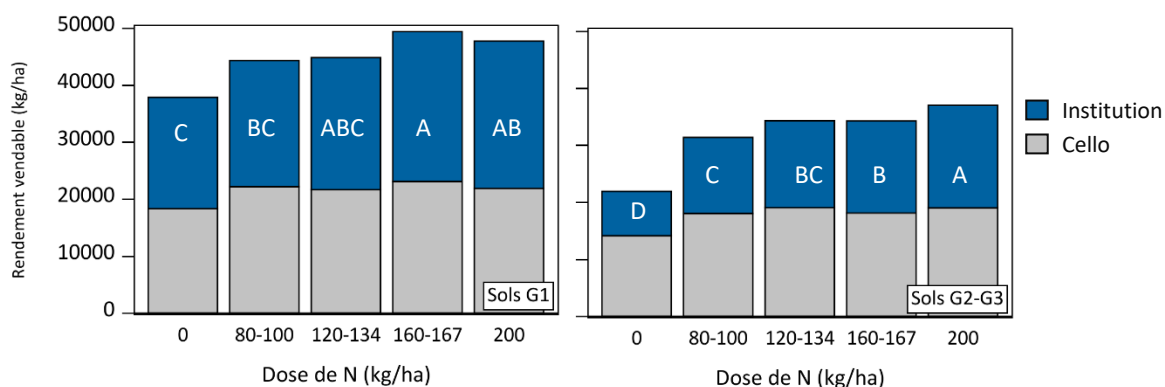


Figure 8. Calibres des betteraves à la récolte selon les doses de N. Les lettres indiquent les différences significatives (LSD, $P < 0,1$) entre les proportions du calibre institution pour les différents traitements de fertilisation. Les diamètres des calibres étaient : Cello : 3,8 à 6,4 cm; Institution : 6,4 à 10,2 cm.

2.2.3.2 Pertes à la récolte

Une fertilisation inadéquate pourrait 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 les pertes à la récolte. Toutes textures de sol confondues, les pertes ont varié en moyenne entre 10,4 et 13,9 %, pour les doses respectives de 200 et 0 kg N/ha (Figure 9). Les résultats de l'analyse des données montrent que la fertilisation azotée a un effet statistiquement significatif ($P < 0,001$) sur les pertes de rendements mesurés à la récolte. Les pertes ont été inversement proportionnelles aux doses de N.

Toutefois, selon les résultats obtenus, l'application de la plus petite dose de N testée (80 à 100 kg N/ha) était suffisante pour minimiser les pertes, les autres traitements n'ayant pas statistiquement différé entre eux.

L'analyse des données en tenant compte des groupes de textures séparés (G1 vs. G2-G3) a montré que les pertes de rendements ont été plus importantes dans la parcelle témoin seulement dans les sols de textures moyennes à grossières ($P < 0,001$), les pertes dans les sols de textures fines (G1) n'ayant pas été affectées significativement par la fertilisation azotée. Toutefois, bien que statistiquement non significatif dans les sols G1, une différence numérique a été également observée entre les traitements témoins et ceux fertilisés pour ces sols (Figure 9). Les pertes de rendements ont également été plus élevées dans les sols G1 que dans les sols G2-G3. D'autres études de la littérature scientifique ont également rapporté un effet de la fertilisation sur les pourcentages de pertes de rendements mesurés à la récolte de la betterave. Par exemple, selon Ugrinovic (1999), les pertes seraient principalement attribuables à l'effet de la fertilisation azotée sur les calibres, les parcelles ayant reçu de faibles doses de N étant plus sujettes à produire des betteraves trop petites pour être commercialisées.

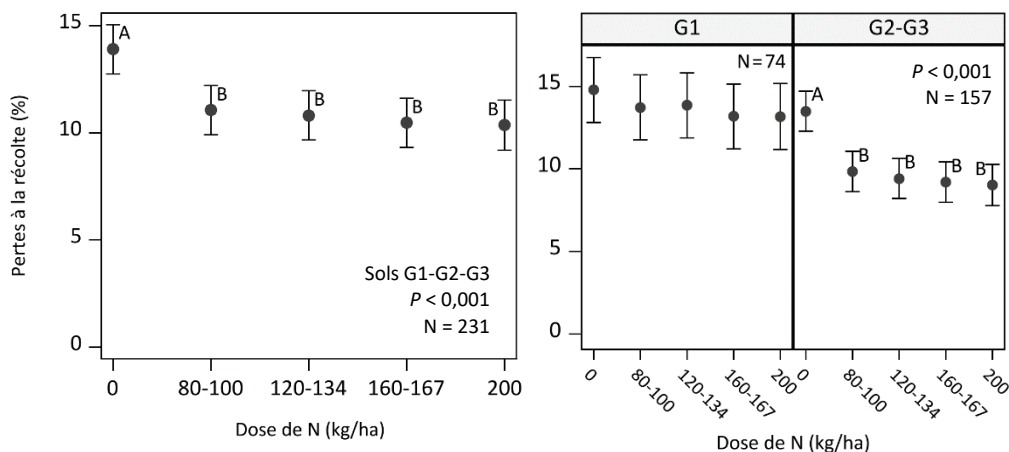


Figure 9. Pertes de rendements à la récolte en fonction des traitements de fertilisation azotée toutes textures confondues et dans les groupes G1 vs. G2-G3. Les moyennes présentées sont les valeurs estimées du modèle statistique. Les moyennes suivies d'une même lettre ne diffèrent pas statistiquement (LSD, $P < 0,1$). Les barres représentent les erreurs-types. N : Nombre d'observations.

La Figure 10 permet de préciser les principales causes de déclassement des betteraves à la récolte. Dans les deux groupes de textures de sol, les betteraves immatures ont prédominé dans les parcelles témoin (0 N), ce après quoi leur proportion a diminué. À l'opposé, les betteraves trop grosses, quant à elles, ont été observées dans les parcelles fertilisées, dans des proportions similaires entre les traitements. Indépendamment de la fertilisation en N, la Figure 10 montre que les sols à textures fines ont semblé plus propices à produire une grande proportion de betteraves ayant un diamètre trop gros que ceux à textures moyennes et grossières, même dans les parcelles témoin. Cette observation pourrait en partie expliquer l'absence d'effet significatif de la fertilisation azotée sur les pertes de rendements dans les sols G1. Il convient toutefois de noter que les données étaient deux fois plus nombreuses dans les sols G2- G3, ce qui pourrait être à l'origine de l'effet non-significatif dans les sols du groupe G1.

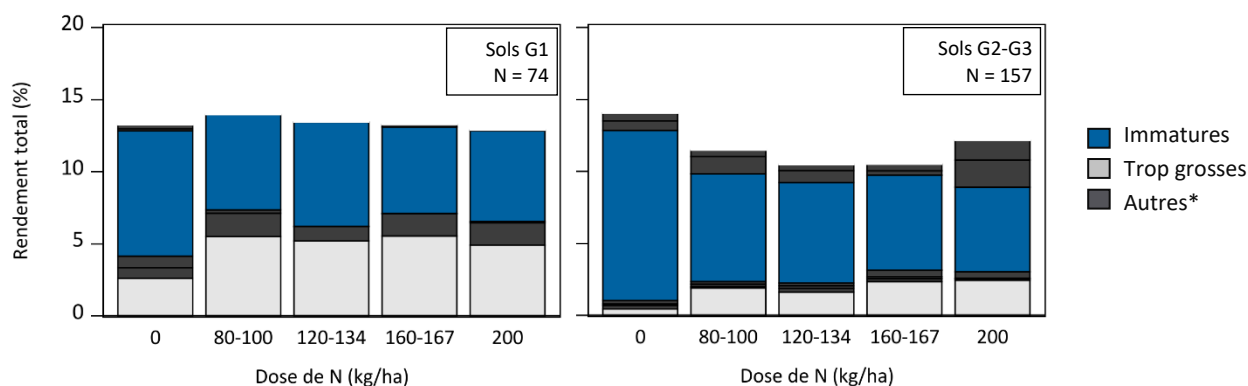


Figure 10. Pertes de betteraves à la récolte par rapport au rendement total en fonction des traitements de fertilisation dans les groupes de textures G1 vs. G2-G3. Seules les catégories non-vendables sont illustrées sur la figure. *: Afin de simplifier la présentation du graphique, les causes de déclassement autres que l'immaturité et le gros calibre ont été illustrées en gris foncé. Ces causes regroupent les pourritures du collet et de la racine, les malformations, etc. N = Nombre d'observations.

2.2.3.3 Pertes suivant l'entreposage

Dans le cadre des essais de fertilisation, les betteraves ont été entreposées suivant la récolte et lorsque possible, dans les mêmes conditions que celles du producteur chez qui l'essai a été réalisé. Lorsque les essais étaient réalisés en station de recherche, des conditions similaires aux conditions commerciales ont été reproduites. Cependant, suivant l'analyse exploratoire, seulement 32 % de l'ensemble des données validées des essais N ont également eu des données d'entreposage validées. Parmi les données d'entreposage exclues, certains étaient inexistantes ou ont été écartées lors de l'analyse en raison de conditions inadéquates ayant mené à des déclassements hors-normes. (ex.: plus de 80 % des betteraves pourries sur un site). L'entreposage a été réalisé soit dans un caveau (20 %) ou dans un endroit réfrigéré (80 %). La température a varié entre 1 et 1,5°C, alors que l'information était manquante dans 20 % des cas. L'information concernant l'humidité relative des structures d'entreposage était manquante pour la totalité des sites. L'humidité relative est un paramètre plus important que la température pour le succès de l'entreposage de la betterave dans l'intervalle de température mentionné (Henze et Baumann, 1979). L'entreposage a duré en moyenne 117 jours, mais a varié entre 111 et 124 jours.

Vu le haut taux de déclassement des données, les conclusions de l'analyse statistique doivent être considérées avec prudence. Les résultats ont démontré que les pourcentages de pertes suivant l'entreposage n'ont pas été significativement affectés par les traitements de fertilisation azotée ($P = 0,47$). Indépendamment de la texture du sol, les pertes de rendement enregistrées après l'entreposage ont varié entre 13,8 % (80-100 kg N/ha) et 19,1 % (200 kg N/ha) (Figure 11). Cependant, dans la littérature scientifique, Bundiniene et al. (2009) ont observé un effet positif de la fertilisation azotée sur le rendement commercialisable des betteraves suivant une période d'entreposage. De plus, bien qu'aucune différence significative ne soit détectée entre les traitements, le patron d'évolution des pourcentages de perte a montré des valeurs croissantes à mesure que les doses de N augmentaient (Figure 11). Toutefois, lorsque les données sont analysées séparément en fonction des groupes de textures de sol (G1 vs. G2-G3), l'effet de la fertilisation azotée sur les pertes suivant l'entreposage est non-significatif dans les deux cas ($P = 0,322$ pour les G1; $P = 0,584$ pour les G2-G3). Seules des pertes supérieures ont été enregistrées dans les sols G2-G3, comparativement à celles enregistrées dans les sols G1, indépendamment

des traitements de fertilisation azotée. Par conséquent, aucun ajustement des VSRF n'a été effectué sur la base du pourcentage de pertes mesuré à l'entreposage.

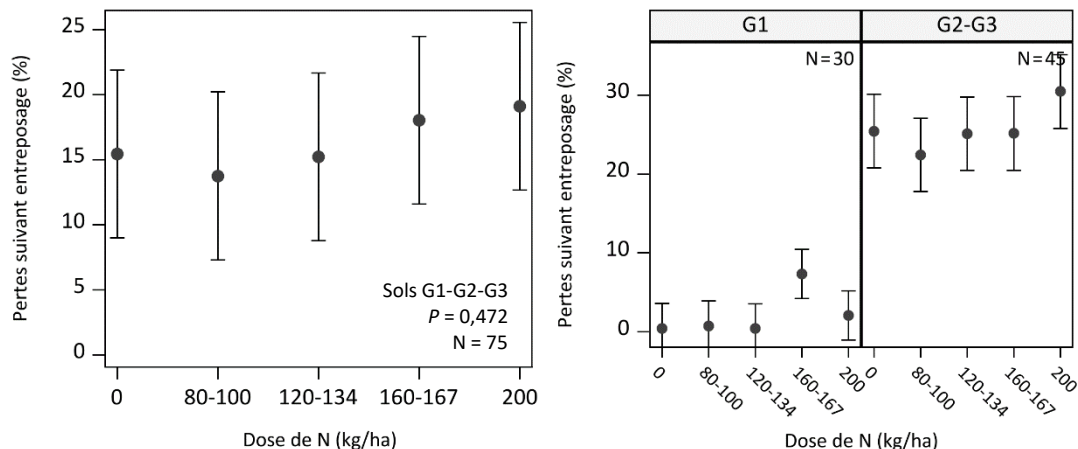


Figure 11. Pourcentages de pertes suivant une période d'entreposage en fonction des groupes de textures de sol. Les moyennes présentées sont les valeurs estimées du modèle statistique. Les moyennes suivies d'une même lettre ne diffèrent pas statistiquement (LSD, $P < 0,1$). Les barres représentent les erreurs-types. N : Nombre d'observations.

Les principales causes expliquant les pertes enregistrées à l'entreposage de la betterave sont présentées à la Figure 12. Dans les sols à texture fine (G1), les pertes suivant l'entreposage ont été dues en majorité à la sclérotiniose et elles sont survenues en proportion plus importante à la dose 160-167 kg N/ha. Dans les sols G2 et G3, deux causes principales ont mené au déclassement des légumes, soit la rhizoctonie et le manque de fermeté. Le manque de fermeté pourrait être attribuable à des conditions d'entreposage inadéquates, comme une humidité relative trop faible, alors que celle-ci devrait avoisiner 95 % (Henze et Baumann, 1979). De faibles proportions des déclassements sont également attribuables à la sclérotiniose et à d'autres types de pourritures.

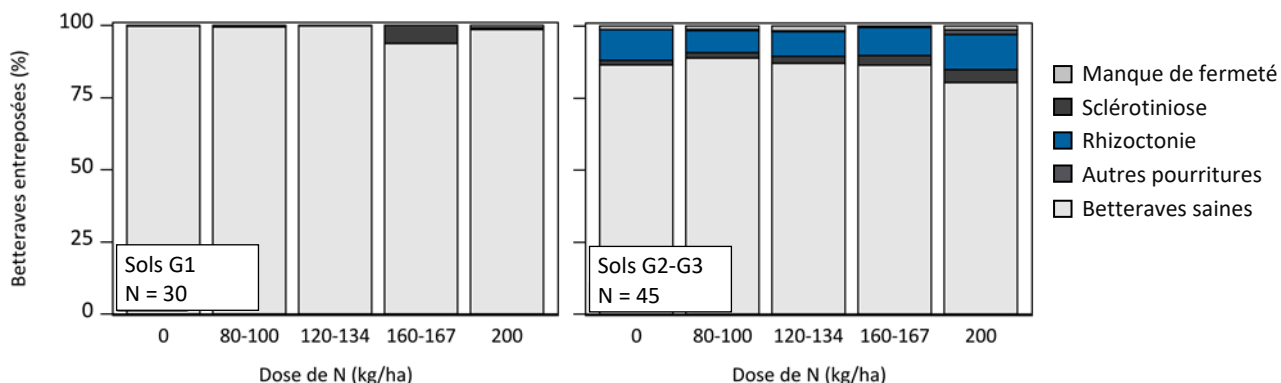


Figure 12. Proportion des betteraves entreposées dans chaque catégorie en fonction des traitements de fertilisation azotée selon les groupes de textures de sol. N : Nombre d'observations.

2.3 Diagnostic nutritionnel et exportations en azote

Les concentrations et les exportations de N dans les betteraves en fonction du diagnostic nutritionnel sont présentées au Tableau 10. Toutes les valeurs présentées dans cette section considèrent les racines seulement et ne tiennent pas compte du feuillage.

La population de tête (groupe d'individus à haut rendement et à l'équilibre nutritionnel) a eu une concentration moyenne d'azote de $1,14 \pm 0,37$ kg/t humide (Tableau 10). Au Michigan, Warncke et al. (2004) rapporte une concentration en N de 1,59 kg N/t pour la betterave, une valeur assez proche de celle obtenue dans cette étude. Considérant un rendement de 57 958 kg/ha, les exportations de la population de tête varient de 61 à 184 kg N/ha, avec une moyenne de 128 kg N/ha. Cette grande variation observée au niveau des exportations de la culture serait probablement attribuable aux différences variétales, considérant qu'entre les variétés, la concentration en N a varié entre 0,96 et 1,74 kg par tonne humide, pour un coefficient de variation de 27 %. Il est toutefois important de souligner que les rendements obtenus pour la population de tête dans le cadre de cette étude sont élevés comparativement aux valeurs de références en contexte de production commerciale, soit entre 20 900 et 26 200 kg/ha (Statistique Canada, 2021). Or, les exportations de la culture varient directement en fonction du rendement obtenu. Par exemple, dans cette même étude, si l'on considère la population à faible rendement et en équilibre nutritionnel, les exportations diminuent à 49 kg N/ha pour un rendement moyen de 17 732 kg/ha (Tableau 10). Bien que non-évalué dans le cadre de cette étude, l'exportation des feuilles de la betterave augmentera les quantités d'éléments nutritifs exportés par la culture. En effet, une étude réalisée en Suisse a évalué que pour la culture de la betterave et pour un rendement de 23 600 kg/ha (de betteraves), les exportations en N par les feuilles sont de 49 kg N (Gunnarson et al., 2011).

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 2,7 kg N/tonne humide, lorsque rapportée à 86 % d'humidité. Cependant, ces valeurs tirées de Fink et al. (1999) sont issues d'essais historiques et les résultats de la présente étude montrent que les concentrations en N peuvent varier selon les variétés qui elles varient au fil des ans. Des études plus récentes effectuées en Croatie, font état de quantités de N par tonne humide également plus élevées variant de 1,98 à 2,56 (Straus et al., 2012) et de 2,14 à 2,43 (Petek et al., 2012). D'une part, les différences peuvent s'expliquer par des effets variétaux, une variabilité de 27 % entre les variétés ayant été retrouvée dans les présents essais. Les deux variétés les plus représentées étaient la Red Ace (1,04 kg N/t humide; 10 sites) et la Touchstone Gold (0,95 kg N/t humide; 3 sites), une variété de betterave jaune. Les exportations présentées en fonction des rendements, par variété, à la Figure 13, soutiennent que les exportations ont varié principalement en fonction des rendements, mais que des effets de variétés peuvent également influencer ces exportations. Par exemple, pour un même rendement, des variétés moins concentrées en N comme la Touchstone Gold présentera une plus faible exportation d'azote. D'autre part, le calibre des betteraves sélectionnées pour l'analyse de la biomasse pourrait également expliquer les différences observées, car seule la représentativité était considérée dans la composition du sous-échantillon. Aussi, tel que démontré précédemment, la fertilisation azotée a augmenté considérablement le rendement vendable par le biais du calibre institution. Il est donc probable qu'une grande partie de betteraves de calibre institution aient constitué les échantillons destinés à l'analyse de biomasse, ce qui a pu entraîner un effet de dilution de l'azote dans les tissus. En effet, Ugrinovic (1999) a observé que l'augmentation de la dose de N causait une diminution de la teneur en matière sèche des

betteraves, laquelle peut causer une dilution des éléments minéraux. Enfin, ces différences pourraient également être dues à d'autres facteurs agro-climatiques comme, entre autres, les précipitations, la localisation des essais ou le type de sol, pouvant affecter les prélèvements par la plante, et par conséquent, diminuer les concentrations de l'azote dans les tissus de la betterave.

La betterave, à l'instar d'autres légumes de la famille des Chénopodiacées comme l'épinard ou la bette à carde, tend à faire de la consommation de luxe (prélever et accumuler du N sans que cela ne se traduise par une augmentation de rendement) et par le fait même, à accumuler les nitrates dans ses tissus (Reid et al., 2019). Ce nitrate peut poser un enjeu pour la santé humaine, lorsque retrouvé en trop grande concentration. Il a été démontré dans la littérature scientifique que l'apport supplémentaire de N, et spécialement sous la forme de nitrate, augmentait la teneur en NO₃ dans les racines (Cantliffe, 1973; Gunnarson et al., 2011; Ugrinovic, 1999; Ugrinovic et al., 2012). Ugrinovic (1999) a toutefois observé qu'à une dose de N de 225 kg/ha, le seuil de tolérance mentionné de 3 000 mg N-NO₃/kg n'avait pas été atteint. De même, dans le cadre des présents essais, même avec les fortes doses de N, les concentrations en N dans les tissus étaient faibles.

Tableau 10. Concentrations et exportations en N des betteraves, 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 »)	86	1,14	0,37	128	127	61	184
Faible rendement et équilibre nutritionnel	86	1,58	0,67	49	49	24	75
Faible rendement et déséquilibre nutritionnel	86	1,58	0,90	54	55	20	99
Haut rendement et déséquilibre nutritionnel	85	1,02	0,41	115	111	57	166

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.

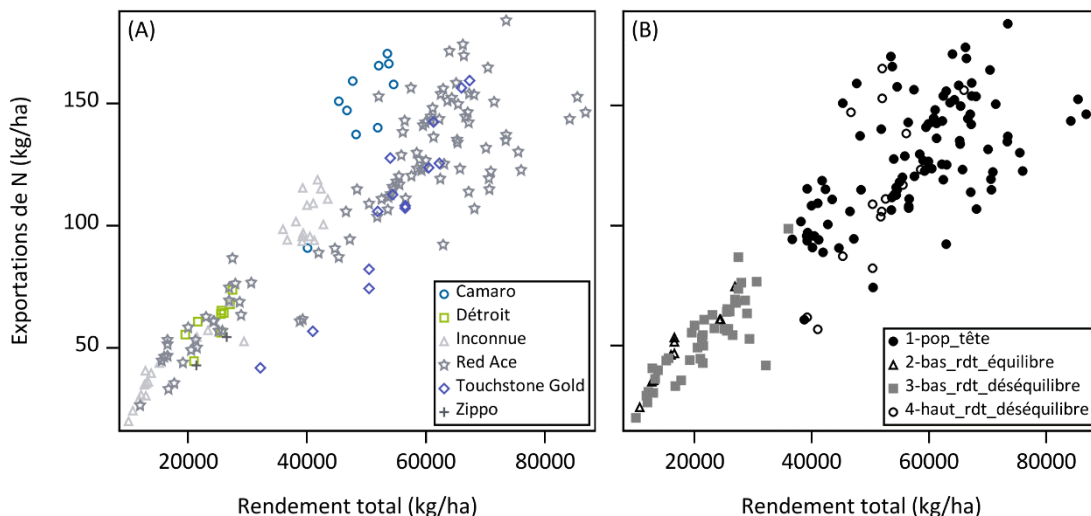


Figure 13. Exportations d'azote de la betterave en fonction des rendements totaux selon les variétés (A) et le diagnostic nutritionnel (B). Les exportations ont été calculées sur les racines seulement et ne tiennent pas compte du feuillage.

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-NO_3) résiduel a été mesuré sur deux profondeurs (0-30 et 30-60 cm) immédiatement après la récolte. Les concentrations en N-NO_3 des différents traitements ont été analysées en tant qu'« indice nitrate ». Cet indice s'obtient en divisant la teneur en N-NO_3 du traitement fertilisé par la teneur en N-NO_3 de la parcelle témoin. Ainsi, un indice nitrate de 1 signifie qu'il n'y a pas de hausse du nitrate dans les parcelles fertilisées, en comparaison au témoin.

Les augmentations de nitrate résiduel dans le sol à la suite des essais N et par rapport au témoin sont présentées à la Figure 14. La fertilisation azotée a entraîné une hausse des teneurs en nitrate variable selon la profondeur et le groupe de textures considéré (Figure 14). En surface (0-30 cm), l'effet est similaire mais davantage significatif pour les G2-G3. Dans les sols G1, seule la dose de 200 kg N/ha a causé une augmentation significative ($P < 0,05$) du N-NO_3 résiduel en surface. À l'opposé, dans les sols G2-G3, des augmentations significatives étaient observables même suivant l'application des plus petites doses de N testée (80 à 100 kg N/ha) et celles-ci croissaient avec les doses. En profondeur (30-60 cm), cette même augmentation de l'indice nitrate avec les doses de N est observée dans les sols G2-G3, alors qu'aucun effet n'est observé remarque dans les sols G1.

Ces résultats, dans les sols G2-G3, démontrent que malgré la réponse importante à l'engrais azoté dans les sols G2 et G3 (rendement vendable) jusqu'à la dose de 200 kg N/ha, une partie de celui-ci demeure non prélevé et à risque de perte par lessivage. Dans ces sols propices au lessivage, en vue d'atténuer le risque environnemental, le fractionnement en plusieurs apports serait à préconiser, de même que la synchronisation des apports avec les

besoins de la culture (Reid et al., 2020). Toutefois, il convient de noter que les quantités de N-NO₃ ont été faibles : 1,45 à 3,24 ppm, toutes textures et profondeurs confondues. En effet, la betterave potagère peut s'enraciner très profondément. Des études danoises effectuées avec des systèmes de minirhizotrons rapportent des profondeurs d'enracinement de 0,7 à 1,8 m de profondeur (Christiansen et al., 2006; Kristensen et Thorup-Kristensen, 2007). Bien que ce type d'installation ait pu surestimer la profondeur d'enracinement, le fait que la betterave potagère explore le sol en profondeur pourrait être à l'origine des faibles quantités résiduelles de N-NO₃. Toutefois, il est à noter que les coefficients d'utilisation apparents des betteraves (racines seulement; données non-présentées) ont été d'environ 34 % seulement pour les doses élevées (> 160 kg/ha). Ces faibles coefficients d'utilisation de l'azote seront à considérer dans l'éventualité où, en raison de l'absence d'un plateau dans la réponse de la betterave à l'azote, des doses supérieures aux doses testées seraient envisagées.

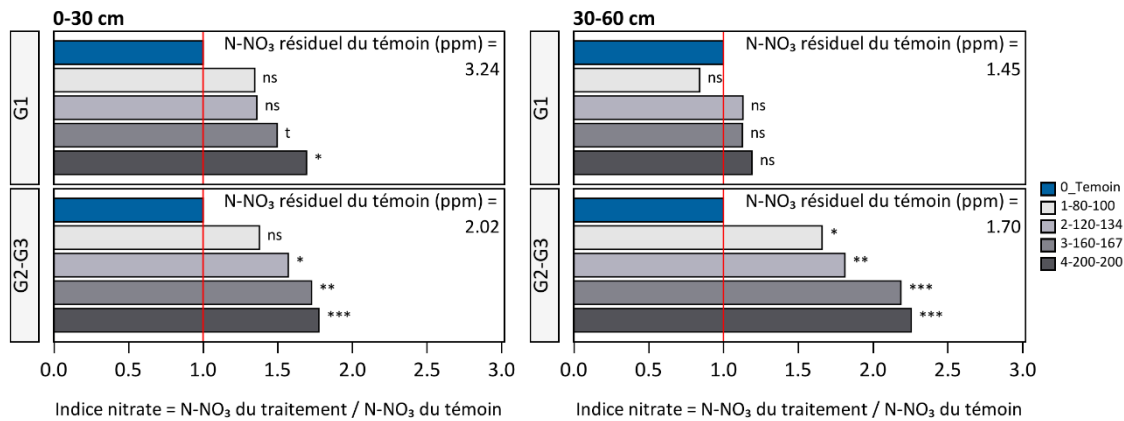


Figure 14. Indices nitrate des traitements d'azote de la betterave aux profondeurs 0-30 et 30-60 cm dans les sols G1 vs G2-G3, au moment de la récolte. La statistique présentée à droite des barres horizontales indique si le traitement est différent du témoin 0 N. NS : non significatif ; t : tendance à $P < 0,12$; * : P entre 0,05 et 0,01 ; ** : P entre 0,01 et 0,001 ; *** : $P < 0,001$.

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

La fertilisation azotée proposée pour la culture de la betterave potagère au Québec est présentée au Tableau 11. Différents niveaux d'information ont été considérés afin de structurer la recommandation, soit (i) les calibres visés en fonction des marchés, (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 le cas du rendement vendable (somme des calibres cello et institution), des classes de fertilité ont été établies selon la teneur en matière organique du sol (Tableau 11). Dans les sols G1, un seuil en MO de 4,2 % a été retenu. Lorsque la teneur en MO est inférieure à 4,2 %, un apport de 160 kg N/ha est proposé. Au-delà de ce seuil, la dose proposée diminue de moitié, soit à 80 kg N/ha. Dans les sols G2 et G3, les teneurs en MO de 4,5 et

6,6 % délimitent les classes de fertilité. Dans les sols de moins de 4,5 % de MO, où une grande réponse à la fertilisation azotée est observée, la dose de N proposée est de 200 kg/ha. Pour les sols de plus de 6,7 % de MO, la dose de 80 kg N/ha est recommandée, bien qu'elle ait été établie sur la base d'un seul site. Entre 4,6 et 6,6 % de MO, en absence de données, la dose intermédiaire de 120 kg N/ha est proposée. Le choix de cette dose est appuyé sur le fait qu'elle constitue le niveau de dose subséquent à celui recommandé dans la classe de fertilité suivante. De surcroît, la dose de 120 kg N/ha est l'apport le plus près des quantités de N exportés par la culture. 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 mesurée dans le sol après les récoltes (voir section 2.4), le nitrate résiduel étant associé à un risque accru de lessivage. À l'instar de ce qui a été testé dans les essais, les VSRF sont proposées en deux fractionnements, soit 60 % au semis et 40 % au stade 6 feuilles, en vue d'optimiser les prélèvements par la plante afin de diminuer les risques de pertes de N dans l'agroenvironnement.

Dans le cas du rendement en betteraves de calibre cello (diamètre entre 3,8 et 6,4 cm), il est apparu que les doses croissantes de N n'augmentaient pas le rendement qui demeurerait similaire pour toutes les doses testées, bien que chaque dose ait entraîné des gains importants par rapport au témoin. De surcroît, indépendamment du groupe de textures de sol, l'apport de doses croissantes de N augmente spécifiquement la prévalence de betteraves de plus gros calibres (institution) au détriment de celles de calibres plus petits (cello) (voir la section 2.2.2). Tout considéré, trois classes de fertilité des sols ont ainsi été déterminées pour les VSRF de betteraves cellos. Dans la première classe regroupant les sols de moins de 2,0 % de MO, aucune VSRF n'a pu être calculée en raison du manque de données sous ce seuil. Un apport de 120 kg N/ha est donc proposé en absence de données pour cette catégorie de sol. Cette proposition représente la dose testée subséquente à celle optimale pour la classe de fertilité suivante (2,1 % - 5,6 % de MO). Cette dose est également très similaire à la valeur des exportations, soit 127 kg N/ha. Lorsque la teneur en MO du sol est comprise entre 2,0 et 5,6 %, la dose agronomique optimale de 80 kg N/ha est proposée. Finalement, au-delà de 5,6 % de MO, les résultats montrent que l'apport de la plus petite dose testée (80 kg N/ha) entraîne déjà l'obtention majoritairement de betteraves de calibre institution, au détriment des betteraves cellos. De ce fait, une dose plus faible de 65 kg N/ha est proposée, soit la moitié des exportations en N de la culture. Cette dose devrait être adéquate pour répondre aux besoins de la culture, tout en évitant une croissance excessive occasionnant l'obtention de betteraves hors calibre (trop grosses).

D'autres paramètres tels que la robustesse de l'attache du feuillage, les pertes à la récolte et à l'entreposage, et les teneurs en nitrates résiduels du sol ont été également étudiés dans le cadre de la détermination des VSRF. Les résultats des présentes analyses n'ont pas permis d'observer un effet significatif de la fertilisation azotée sur la robustesse de l'attache des feuilles de la betterave à la tige (voir la section 2.2.3.1). De même, les doses de N testées n'ont pas influencé significativement les pourcentages de pertes à l'entreposage. Les conditions d'entreposage, très variables et non optimales dans certains cas, ont semblé influencer davantage les pertes 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 brutes demeuraient très faibles dans les sols. Toutefois, la prise en compte de la teneur en matière organique en vue de moduler les doses apportées contribuera certainement à diminuer le risque environnemental.

Comparativement aux recommandations actuellement utilisées au Québec (CRAAQ, 2010), les propositions de la présente étude sont inférieures, similaires ou supérieures (Tableau 12). En effet, pour les productions visant le calibre cello, les recommandations sont similaires aux recommandations actuelles (CRAAQ 2010) dans les sols peu pourvus en MO ($\leq 2\%$). Dans les sols au-delà de cette teneur, la dose recommandée diminue de 30 à 40 %. Lorsque la production de betteraves de plus gros calibres est visée, des augmentations des doses de l'ordre de 45 à 80 % sont proposées dans les catégories de sols les moins pourvues en MO, en fonction du groupe de textures des sols. Pour les sols au-delà des seuils, la dose suggérée diminue d'environ 30 %.

Par ailleurs, globalement, ces nouvelles valeurs sont comparables à celles des États-Unis dans les états du Mid-Atlantic, du Michigan et de la Nouvelle-Angleterre, mais supérieures à celles de l'Ontario et de l'Alberta. Ces doses plus élevées s'apparentent également à celles proposées en Nouvelle-Zélande, révisées en 2019, bien que les bornes inférieures de leurs recommandations soient plus faibles que celles proposées dans la présente étude. En effet, les présentes VSRF et celles de la Nouvelle-Zélande, plus élevées que les autres, sont les seules à considérer le potentiel du sol à fournir de l'azote.

Tableau 11. Fertilisation azotée de la betterave potagère – Valeurs scientifiques de référence en fertilisation

Calibres visés ¹	Groupe de textures ²	Classe de fertilité MO _{PAF} (%) ^{3,4,5}	Période d'application ⁶	Fractionnement ⁷ (kg N/ha)	VSRF ⁸ (kg N/ha)
Cello et Institution	G1	≤ 4,2	Au semis	100	160 ^{9,10}
			Au stade 6 feuilles	60	
		> 4,2	Au semis	50	80 ⁹
			Au stade 6 feuilles	30	
	G2, G3	(≤ 4,5)	Au semis	120	200 ^{9,10}
			Au stade 6 feuilles	80	
		(4,5 – 6,6)	Au semis	70	(120) ¹¹
			Au stade 6 feuilles	50	
		> 6,6)	Au semis	50	(80) ¹²
			Au stade 6 feuilles	30	
Cello	G1, G2, G3	(≤ 2,0)	Au semis	70	(120) ¹¹
			Au stade 6 feuilles	50	
		(2,1) – 5,6	Au semis	50	80 ⁹
			Au stade 6 feuilles	30	
		> 5,6	Au semis	(65)	(65) ¹³
			Au stade 6 feuilles	(0)	

¹ Cello : diamètre de 3,8 à 6,4 cm; Institution : diamètre de 6,5 à 10,2 cm.

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

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

⁴ Le seuil de 4,5 % de MO_{PAF} résulte d'une contrainte du jeu de données, considérant la répartition inégale des données au-delà de cette valeur.

⁵ Le seuil de 2,0 % de MO_{PAF} représente la borne inférieure du jeu de données.

⁶ Dans le cadre des essais, la première application des engrais a été effectuée après la levée (une à deux semaines après le semis) pour des raisons techniques.

⁷ Les fractionnements sont présentés tels que testés. Dans le cas où la VSRF n'est pas une dose testée, les fractionnements sont grisés et sont présentés dans les mêmes proportions que pour les doses testées similaires.

⁸ VSRF : Valeur scientifique de référence en fertilisation.

⁹ Dose agronomique optimale dans cette catégorie de sols.

¹⁰ Dans le but d'amoindrir les risques de salinité au semis, dans le cas où des fortes doses de N+K₂O sont appliquées, une part des engrais peut être appliquée en bande, tandis que l'excédent peut être appliqué à la volée en pré semis, incorporé.

¹¹ En absence de données en quantité suffisante pour cette catégorie de sols, le niveau de dose subséquent à la dose de la catégorie suivante est proposé. Celui-ci correspond à la dose la plus près des exportations de la culture.

¹² En absence de données en quantité suffisante dans cette catégorie de sols, cette VSRF est basée sur la dose agronomique optimale d'un seul site présentant des teneurs en MO_{PAF} variant de 6,7 à 8,2 %.

¹³ En absence de données en quantité suffisante pour cette catégorie de sols, l'apport de la moitié des exportations en N est proposé. Cette dose n'a pas été testée.



Fractionnement des fortes doses de N

Le fractionnement des doses d'azote est proposé tel que testé dans les essais. Or, les apports totaux de 200 et 160 kg N/ha proposent de très fortes doses au semis, lesquelles pourraient se retrouver combinées aux fortes doses de K dans le cas de sols pauvres en MO et en K_{M3} . Ainsi, dans le but d'amoindrir les risques de salinité causés par les engrais azotés et potassiques, une portion pourrait être appliquée en bande, tandis que l'excédent pourrait être appliqué à la volée en pré-semis et incorporé.

Application en bande des engrais

Les VSRF proposées dans le cadre de cette étude ont été calculées à partir d'essais réalisés en plein champ où l'azote a été appliqué en bande et fractionné en deux apports afin de garantir une bonne utilisation par la plante. Dans l'éventualité où le mode d'apport serait différent, un suivi est recommandé puisqu'un ajustement des doses pourrait être requis.

Tableau 12. Comparaison des recommandations en N pour la production de betterave potagère au Canada et à l'étranger

Provinces/États	Mode et période d'application	Fractionnement	Indicateurs		Dose N (kg/ha)	Source
			Fertilité du sol	Autres		
Québec (CAN)	À la volée avant le semis	-	-	-	110	CRAAQ (2010)
Ontario (CAN)	À la volée avant le semis et incorporé	Oui			65	MAAARO (2011)
	En bande en post-levée				45	
	Dose totale				110	
Alberta (CAN)	À la volée avant le semis et incorporé	Oui (si nécessaire)	-	-	39-72	Alberta Agriculture and Rural Développement (2014)
	En saison (si nécessaire)				24-36	
Michigan (É-U)	En bande au semis/à la volée avant le semis et incorporé	Oui	-	-	34-45	Warncke et al. (2004)
	En post levée				56	
	Dose totale				90-101	
Mid-Atlantic (É-U)	À la volée avant le semis et incorporé	Oui	-	-	56	Virginia Cooperative Extension (2018)
	En bande 4-6 semaines après la plantation				28-56	
	Dose totale				84-112	
Nouvelle Angleterre (É-U)	À la volée avant le semis et incorporé	Non	-	-	84-112	University of Massachusetts Amherst (2021)
Nouvelle-Zélande	Au semis et la balance en plusieurs apports, après le stade 2 feuilles	Oui (3 applications ou plus)	N disponible	Rdt visé (t/ha)		Reid et Morton (2019)
				40	10-130	
				60	10-185	
				80	30-240	

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 13. Le pH des sols était situé dans l'intervalle allant de 6,0 à 7,0 pour environ la moitié des blocs (55 %), alors que 34 % de ces sols avaient un pH inférieur. Le pH optimal pour la culture de la betterave potagère est de 6,3 (CRAAQ, 2010). Les sols du groupe G1 ont représenté 40 % des blocs des essais, tandis que les groupes G2 et G3 ont représenté la balance à parts égales. Parmi les sols G1, seulement une petite proportion (5 %) était faiblement saturée en P ($ISP_1 \leq 3,8$ %), alors que les catégories suivantes étaient bien représentées. Les ISP_1 des sols G1 ont variés entre 3,6 et 15,8 %. Dans les groupes G2 et G3, les sols très faiblement saturés en P ($ISP_1 \leq 3,8$ %) étaient également en quantité insuffisante pour une étude adéquate de la réponse de la culture à la fertilisation phosphatée. De plus, aucun sol G2 ne faisait partie de cette catégorie, tandis que 48 % des sols G3 se retrouvaient sous ce seuil. À noter que ces 48 % de sols G3 sont constitués de deux sites seulement auxquels les ISP_1 moyens étaient de 0,56 et 3,16 %, deux valeurs trop éloignées pour la constitution d'une classe de fertilité adéquate. Le regroupement des sols G2 et G3 conduit à une bonne représentativité des sols ayant un ISP_1 supérieur à 3,8 %, bien que les sols très saturés en P (> 20 % d' ISP_1) étaient fortement représentés. Dans l'ensemble et pour ces deux groupes, les ISP_1 variaient largement entre 0,4 et 69,5 %. Enfin, toutes textures confondues, 52 % des sols avaient une teneur en P_{M3} inférieure à 100 ppm (ou 224 kg/ha).

Tableau 13. Répartition des blocs des essais P de la betterave selon différentes classes de propriétés de sol après la validation des données

pHeau ¹	Bloc (%)	ISP ₁ (%) ²	Blocs (%)	ISP ₁ (%) ²	Blocs (%)		P _{M3} (ppm)	Bloc (%)	Groupe de textures ³	Bloc (%)
			G1		G2	G3				
≤ 6,0	34	≤ 3,8	5	≤ 3,8	0	48	≤ 50	38	G1	40
> 6,0 – 7,0	55	> 3,8 – 7,6	46	> 3,8 – 6,5	18	0	> 50 – 100	14	G2	30
> 7,0	11	> 7,6 – 15,2	37	> 6,5 – 13,1	29	24	> 100 – 200	28	G3	30
-	-	> 15,2	12	> 13,1 - 20	13	0	> 200 – 300	7	-	-
-	-	-	-	> 20	40	8	> 300 – 400	0	-	-
-	-	-	-	nd	0	19	> 400	7	-	-
-	-	-	-	-	-	-	nd	6	-	-

¹ Le pH optimal pour la culture de la betterave potagère est défini à 6,3 au Québec (CRAAQ, 2010), alors que l'Ontario l'établit entre 6,8 et 7,8 (MAAARO, 2011).

² ISP_1 : indice de saturation en phosphore = $[P_{M3} \text{ (ppm)} / Al_{M3} \text{ (ppm)}] \times 100$, 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 de sol permettent de prédire la biodisponibilité du P du sol et la réponse à la fertilisation phosphatée des cultures (Khiari et Parent, 2005 ; Menon et Chien, 1995 ; Parent *et al.*, 2002). Parmi ceux-ci, le P_{M3} , l' ISP_1 , le pH_{eau} et la teneur en argile ont été vérifiés avec le test de Cate-Nelson (1971). Lorsque possible, ces indicateurs ont été testés à l'intérieur des groupes de textures G1, G2 et G3.

Dans le but d'alléger la présentation des résultats, seuls les paramètres statistiques des principaux indicateurs sont présentés (Tableau 14). Parmi tous les indicateurs de fertilité testés, la teneur en P_{M3} et l'indice de saturation en P ont été les plus performants afin de prédire la réponse à la fertilisation de la betterave potagère. Toutefois, en raison du fait que certaines teneurs en P et certains ISP_1 étaient non-représentés dans certains groupes de textures, il est probable que ces seuils de réponse agronomiques s'avèrent finalement peu performants aux étapes subséquentes, spécialement si les analyses sont effectuées par groupe de textures de sol.

Toutes textures confondues, le test de Cate-Nelson a permis de dégager un seuil de réponse à 13,8 % d' ISP_1 . Ce seuil est probablement haussé en raison de la prédominance des sols de textures moyennes et grossières, par rapport aux sols de textures fines. Pris individuellement, aucun seuil n'a pu être déterminé dans les sols du groupe G1. Dans les sols des groupes G2 et G3, un seuil potentiel a été établi par la procédure de Cate-Nelson, à 13,0 % d' ISP_1 . Dans les mêmes groupes de textures, des seuils de P_{M3} ont également été déterminés, mais en raison du niveau de signification inférieur et du fait que l' ISP_1 est reconnu comme un meilleur indicateur de la biodisponibilité du P que le P_{M3} seul (Khiari et al., 2000), l' ISP_1 a été retenu pour la suite des analyses.

Dans le présent chapitre traitant des essais P, seuls les seuils obtenus pour le rendement vendable (calibres cello et institution) sont présentés et feront l'objet des analyses. En effet, la fertilisation en P n'a pas ou peu affecté les calibres et les rendements des betteraves (les résultats sont présentés aux sections suivantes). Conséquemment, les résultats sont considérés valables et applicables peu importe le calibre visé.

Tableau 14. Valeurs critiques des indicateurs potentiels de sols significatifs selon les tests de Cate-Nelson pour les essais P de la betterave

Variable réponse	Indicateur de sol	Groupes de textures ³	N ⁴	Valeur critique	RRel ⁵ (%)	Sensitivité	Spécificité	Précision	P
RR _{vendable} ¹	ISP_1 ²	G1, G2, G3	30	13,8 %	85	0,53	1,00	0,73	0,003
		G2, G3	16	13,0 %	85	0,50	1,00	0,75	0,077
	$P_{Mehlich-3}$	G1, G2, G3	30	101,9 ppm	80	0,58	0,73	0,63	0,142
		G2, G3	16	137,5 ppm	85	0,50	1,00	0,75	0,077

¹ Vendable : betteraves dont le diamètre est entre 3,8 et 10,2 cm.

² ISP_1 : indice de saturation en phosphore = $[P_{M3} \text{ (ppm)} / Al_{M3} \text{ (ppm)}] \times 100$, éléments extraits au Mehlich-3 (1984).

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

⁴ N : Nombre d'observations.

⁵ RRel : Rendement relatif ($100 \times \text{rendement du témoin} / \text{rendement maximum par bloc}$).

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

3.2.2.1 Rendement vendable

Comme mentionné précédemment, seules les analyses sur le rendement vendable (calibres cello et institution combinés) sont présentées dans cette section. Les résultats des ANOVA sont illustrés à la Figure 15 (pour plus d'explication concernant l'interprétation de la figure, consulter la section 2.2.2). Quatre modèles sont présentés : un modèle sans indicateur (A) ; selon les groupes de textures (B) ; selon l' ISP_1 dans l'ensemble des groupes de textures (C) et selon l' ISP_1 suivant une procédure de Cope-Rouse (D).

Les analyses de variance réalisées sur l'ensemble du jeu de données (modèle A, sans indicateur, $N = 159$) n'ont révélé aucune différence entre les traitements de fertilisation phosphatée ($P = 0,911$). Par rapport au témoin, les gains moyens ont été d'environ 8,0 %, indépendamment de la dose de P_2O_5 appliquée.

L'analyse des données en fonction des groupes de textures (modèle B) n'a pas permis non plus de détecter des différences significatives entre les traitements de fertilisation, et ce, pour tous les groupes de textures de sol, indiquant que dans tous les cas, la plus petite dose testée a été suffisante pour l'obtention du rendement agronomique optimal. Les gains moyens par groupe de textures ont été 9,6; 3,6 et 13,5 % dans les sols G1, G2 et G3, respectivement (modèle B). Les gains de rendements plus importants obtenus dans les sols des groupes G3 et G1, en comparaison à ceux du groupe G2 pourraient entre autres s'expliquer par le haut niveau de saturation des sites G2 en comparaison aux sites des deux autres groupes de texture de sol. En effet, les ISP_1 moyens des sites sont de 7,1 % dans les sols G3, de 9,0 % dans les sols G1 et de 25,3 % (12,5 % en excluant un site ayant un ISP_1 moyen de 65,3 %) dans les sols G2.

Le seuil de réponse agronomique des groupes G2 et G3 déterminé par le test de Cate-Nelson n'a pas permis de préciser la réponse à la fertilisation, probablement en raison des lacunes dans la représentativité des saturations en P. De ce fait, un modèle de réponse ne tenant pas compte de la texture du sol a été préconisé (modèle C). Celui-ci est valide pour les sols ayant un ISP_1 supérieur ou égal à 3,0 %, étant donné l'absence de données en quantité suffisante sous ce seuil. Ainsi, dans les sols de 3,0 à 13,8 % d' ISP_1 (seuil agronomique de réponse considérant les trois groupes de textures), aucune différence significative n'a été détectée entre les différents groupes de doses ($P = 0,817$, $N = 101$, Figure 15). Cependant, en raison du manque de données (2 sites et 4 observations) pour la plus petite dose testées (17-20 kg P_2O_5 /ha), l'apport de la dose suivante est jugée plus sécuritaire. Par conséquent, la dose agronomique retenue est de 40 kg P_2O_5 /ha, pour un gain de rendement moyen de 17,2 % par rapport aux parcelles témoin. De plus, il est également important de noter qu'en dessous de 6,9 % d' ISP_1 , la dose de 17-20 kg P_2O_5 /ha n'a jamais été testée. Par conséquent, le choix de ce groupe de doses comme optimal ne serait pas sécuritaire dans cette catégorie de sol. Au-dessus du seuil, des pertes de rendement ont été observées pour toutes les doses de P_2O_5 appliquées par rapport au témoin, traduisant que l'apport de P nuit à la productivité de la culture.

Dans le cas du modèle D, les ANOVA ont été réalisées en tenant compte des seuils déterminés selon la procédure de Cope et Rouse (1973). Les résultats de ce modèle montrent que l'ampleur de réponse de la culture à la fertilisation est similaire pour les deux premières classes de fertilité de sol (< 6,9 % et entre 6,9 et 13,8 %). Pour sols G1 ayant un ISP_1 compris entre 6,9 et 13,8 %, il est important de noter que l'analyse détaillée du jeu de données ne montre aucune réponse à la fertilisation phosphatée, traduisant que l'apport de P par fertilisation est non nécessaire (données non présentées). Le gain de rendement observé dans cette catégorie de sol est donc principalement attribuable aux sols G3. Au-delà du seuil de 13,8 %, les apports de P_2O_5 n'ont pas eu d'effet sur le rendement vendable des betteraves. De plus, les traitements de fertilisation ont généralement sous-performé par rapport au témoin dans cette catégorie de sols, les gains variant de -13 à 7 %. Ces résultats suggèrent donc qu'un apport nul serait à propos dans les sols saturés en P.

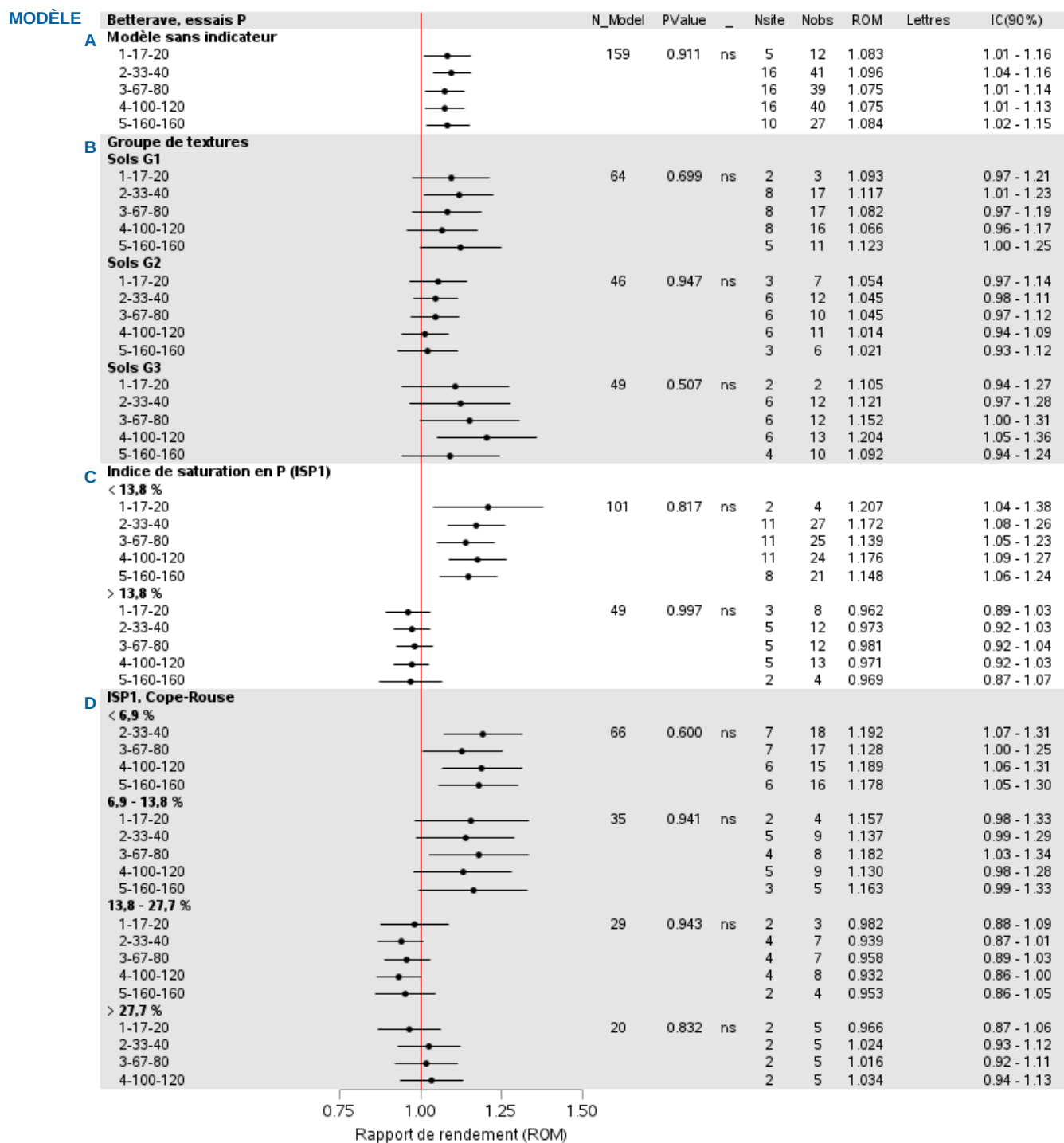


Figure 15. Résultats des analyses de variance sur la réponse aux doses croissantes de P_2O_5 . G1 : sols à texture fine ; G2 : sols à texture moyenne ; G3 : sols à texture grossière ; N_model : nombre d'observations du modèle ; Nsite : nombre de sites ; Nobs : nombre d'observations ; ROM : rapport de rendement (rendement parcelle fertilisée/rendement parcelle témoin) ; IC : Intervalle de confiance ; Lettres : résultats du test de comparaison des moyennes.

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

3.2.3.1 Qualité des betteraves

Robustesse de l'attache du feuillage

La robustesse de l'attache du feuillage a été évaluée dans le cadre des essais de fertilisation. Davantage de détails sur cette évaluation ont été fournis à la section 2.2.3.1. Les résultats sont présentés à la Figure 16. Les résultats ont montré que l'attache du feuillage a été bonne dans la majorité des parcelles et qu'elle n'a pas été affectée par la dose de P ($P = 0,93$; Figure 16). En général, de 12 à 18 % des attaches ont été jugées « *insuffisantes* », à l'exception de celles des parcelles ayant reçu les doses 17-20 kg P_2O_5 /ha où la proportion est plus grande (30 %). Cela peut s'expliquer par le faible nombre d'observations disponibles pour ces doses (10 observations, contre 25 à 37 pour les autres groupes de doses), ce qui diminue l'exactitude de la moyenne de l'échantillon. En somme, le choix de la VSRF final du P ne devrait pas avoir d'effet sur la robustesse de l'attache à la tige.

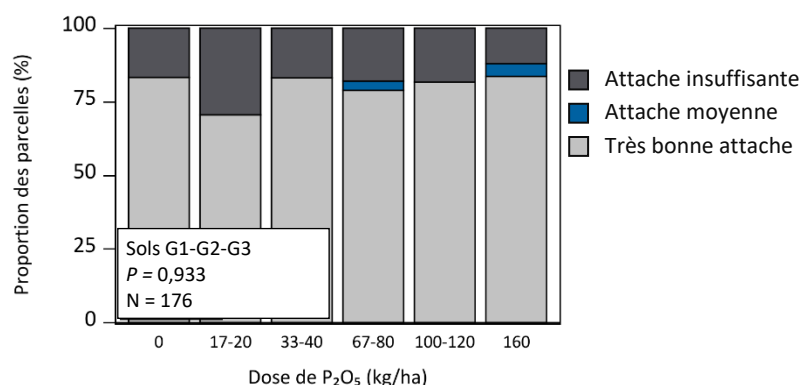


Figure 16. Robustesse de l'attache du feuillage selon la dose de phosphore. N : nombre d'observations.

Calibres à la récolte

La fertilisation en P_2O_5 a influencé légèrement la distribution du rendement vendable entre les calibres cello et institution ($P = 0,102$). Toutefois, cette tendance significative est à considérer avec prudence, puisqu'elle est due à des différences avec le traitement 17-20 kg P_2O_5 , lequel a compté deux à trois fois moins d'observations que les autres traitements, induisant un déséquilibre dans le jeu de données. En effet, avec l'application des doses 17-20 kg/ha, la proportion du calibre cello était de 47 %, alors qu'elle variait de 54 à 58 % pour les autres traitements.

Les apports en phosphore n'ont pas eu d'effet ($P = 0,38$; Figure 17) sur les rendements absolus en betteraves de catégorie institution considérés seuls, ni sur les rendements absolus en betteraves de catégorie cello considérés seuls ($P = 0,56$; Figure 17). En raison de cette absence d'effet, les VSRF ont été déterminées uniquement sur la base des rendements en betteraves de calibre vendable, soit la somme des calibres cello et institution.

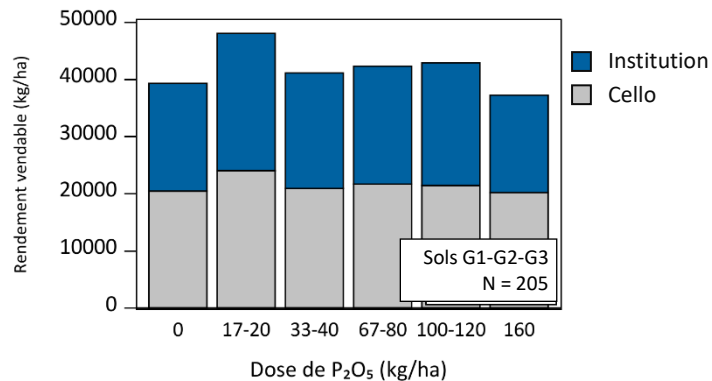


Figure 17. Calibres à la récolte selon les doses de phosphore. Les diamètres des calibres étaient : Cello : 3,8 à 6,4 cm ; Institution : 6,4 à 10,2 cm. N : Nombre d'observations.

3.2.3.2 Pertes à la récolte

Dans le cadre de cette étude, les causes entraînant le déclassement des betteraves à la récolte étaient les suivantes: un calibre trop petit ou trop gros (diamètre inférieur ou égal à 3,8 cm ou supérieur à 10,2 cm), la pourriture du collet, la pourriture racinaire, les malformations, la présence de taches ou le manque de fermeté.

Tel qu'illustré sur la Figure 18, la fertilisation phosphatée n'a pas eu d'effet significatif ($P = 0,79$) sur les pourcentages de pertes à la récolte, ces dernières variant de 10 à 12 % de la masse totale récoltée. Les rejets étaient causés principalement par des betteraves immatures (60 %) ou de trop gros calibre (25 %), alors qu'une faible proportion a été rejetée à cause d'une maladie (Figure 19).

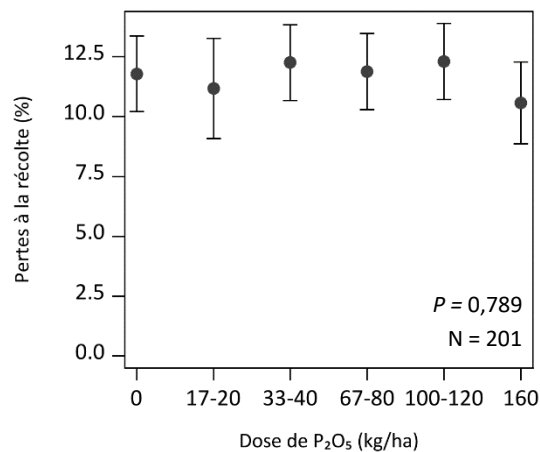


Figure 18. Pertes à la récolte en fonction des doses croissantes de phosphore. Les moyennes présentées sont les valeurs estimées du modèle statistique (LSD, $P < 0,1$). Les barres représentent les erreurs-types. N : Nombre d'observations.

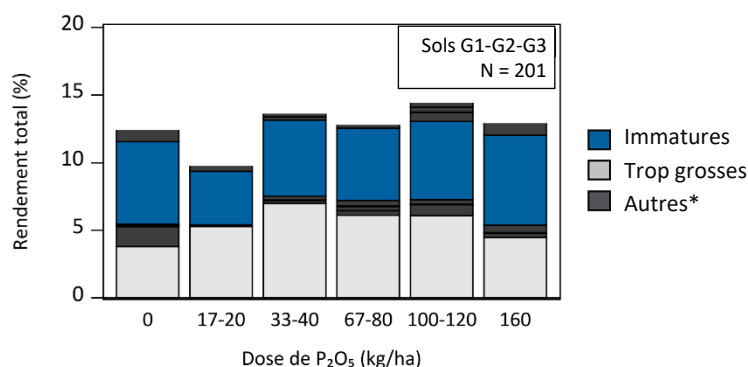


Figure 19. Catégories de betteraves pertes par rapport au rendement total en fonction des traitements de fertilisation Seules les catégories non-vendables sont illustrées sur la figure. *: Afin de simplifier la présentation du graphique, les causes de déclassement autres que l’immaturité et un trop gros calibre ont été illustrées en gris foncé sur le graphique. Ces causes sont la pourriture du collet de la racine, les malformations, etc. N : nombre d’observations.

3.2.3.3 Pertes suivant l’entreposage

Suivant l’analyse exploratoire, les données d’entreposage de seulement le quart des essais P validés ont pu être exploitées pour l’analyse en entreposage. Cela s’explique par le fait que le tiers de ces sites présentaient des données d’entreposage considérées aberrantes (ex. conditions inadéquates menant à des déclassements hors-normes, ex. : > 80 % des betteraves pourries), tandis que 42 % n’avaient pas de données de conservation en entrepôt en raison de la non-disponibilité de structures de stockage sur le site. Ainsi, les conclusions tirées s’appuient sur un nombre très réduit d’observations et les conclusions doivent être considérées avec circonspection. Les conditions d’entreposage ont alterné entre le caveau (29 %) et la réfrigération (71 %). La température a été 1 ou 1,5°C, bien que l’information soit manquante dans 23 % des cas. L’entreposage a duré en moyenne 117 jours, mais a varié entre 111 et 124 jours. À leur sortie, elles étaient classées en plusieurs catégories vendables et non-vendables (pertes).

Dans les essais P où un essai en entrepôt a eu lieu, aucun effet de la dose de P₂O₅ n’a été observé sur les pourcentages de pertes ($P = 0,20$). L’incapacité à détecter un effet (ou une absence d’effet avec une valeur de P plus élevée) pourrait être attribuable à un jeu de données insuffisant, celui-ci ne comportant que 52 observations, issues de quatre sites. Toutes doses et textures confondues, le manque de fermeté a compté pour 40 % des pertes à l’entreposage alors que la sclérotiniose a causé 29 % des celles-ci et la rhizoctonie, 32 % (moyennes arrondies, données non présentées). Le manque de fermeté a probablement été causé par une humidité relative insuffisante qui aurait provoqué une déshydratation de la racine (Kuhar et al., 2020).

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 15. Toutes les valeurs présentées considèrent les racines seulement et ne tiennent pas compte du feuillage.

La population de tête, présentant des hauts rendements et à l'équilibre nutritionnel, a eu $0,87 \pm 0,18$ kg P_2O_5 par tonne humide de rendement. Cette concentration en P_2O_5 a résulté en une exportation, à l'hectare, de 50 kg P_2O_5 pour un rendement humide et total de 57 958 kg. Les exportations ont varié entre 20 et 69 kg P_2O_5 /ha. Pour de plus faibles rendements (sous-groupe d'individus à faible rendement et à l'équilibre nutritionnel; $\approx 17\ 000$ kg), les exportations diminuent à 15 kg/ha de P_2O_5 . La concentration mesurée dans la présente étude est comparable, bien que légèrement inférieure, à celle de 1,08 kg P_2O_5 /tonne humide (rapportée à 86 % d'humidité) présentée dans l'actuel guide de référence en fertilisation du CRAAQ (2010). Elle est également similaire à la valeur de 1,0 kg/tonne humide rapportée par Warncke et al. (2004) au Michigan pour la culture de la betterave. En Nouvelle-Zélande, les concentrations estimées, basées sur les valeurs du département de l'agriculture aux États-Unis (USDA), sont plutôt de 0,92 kg P_2O_5 (0,4 kg P)/tonne humide (Reid et Morton, 2019). Ces valeurs sont toutefois plus faibles que celles variant de 4,3 à 6,2 kg/tonne humide rapportées par Herak Custic et al. (2007) en Croatie et celles variant entre 2,47 et 2,98 kg/t humide rapportées par Petek et al. (2008), toutes pour le cultivar Bikor.

Tableau 15. Concentrations et exportations en P_2O_5 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 »)	86	0,87	0,18	50	50	20	69
Faible rendement et équilibre nutritionnel	86	0,90	0,20	15	15	9	19
Faible rendement et déséquilibre nutritionnel	86	0,81	0,24	17	15	10	39
Haut rendement et déséquilibre nutritionnel	85	0,77	0,35	39	43	15	68

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.

L'analyse des données montre que les cultivars (Tableau 6), ainsi que d'autres facteurs agro-climatiques pourraient influencer la concentration du P dans les tissus de la betterave. Dans les présents essais, le coefficient de variation inter-variétés, indépendamment du diagnostic nutritionnel, a été de 21 %. La variété Red Ace, la plus représentée dans les essais, a eu une concentration de 0,78 kg P_2O_5 /tonne humide. La variété ayant enregistré la plus faible concentration est la variété Zeppo (0,56 kg/t) et des variétés inconnues ont eu la moyenne la plus élevée (1,05 kg/t). Ces variations de concentrations entre les variétés, de même que les grands écarts de rendements enregistrés entre les différents essais, peuvent être à l'origine des écarts d'exportations mesurés, soit entre 20 et 69 kg P_2O_5 /ha pour la population de tête, et à partir de 9 kg P_2O_5 /ha indépendamment du diagnostic nutritionnel. Une grande variabilité des teneurs en P_2O_5 de la betterave s'observe aussi dans la littérature. Selon Reid et Morton (2019), cette grande variabilité est probablement due à la capacité de la plante à accumuler plus de nutriments qu'il n'en faut pour fournir un rendement ou une qualité maximale. À cela s'ajoutent les autres facteurs de variabilité comme les différents cultivars utilisés et les différentes conditions agroclimatiques rencontrées. Notons que les quantités de N appliqué influencent également la concentration des éléments emmagasinés dans les racines. En effet, Ugrinovic (1999) a rapporté qu'une augmentation de la dose de N a engendré une dilution de plusieurs nutriments de la betterave potagère, dont le P. Ce dernier a diminué de 37 % entre le témoin (0 kg N/ha) et la dose de 225 kg N/ha (Ugrinovic, 1999).

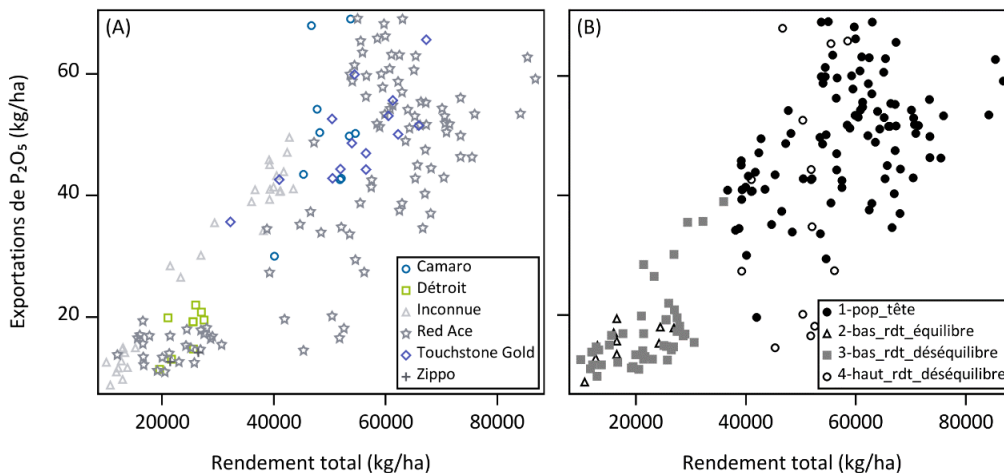


Figure 20. Exportations de phosphore de la betterave potagère en fonction des rendements totaux selon les variétés (A) et le diagnostic nutritionnel (B) Les exportations ont été calculées sur les racines seulement et ne tiennent pas compte du feuillage.

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

Les VSRF de P_2O_5 proposées pour la culture de la betterave potagère sont présentées au Tableau 16. En raison de l'absence d'effet de la fertilisation phosphatée sur la répartition des calibres par rapport au rendement vendable, les VSRF sont considérées adéquates et sécuritaires indépendamment du marché visé (cello ou institution). Dans l'ensemble, les analyses complémentaires montrent que la fertilisation phosphatée n'influait pas la robustesse de l'attache du feuillage, les pertes à la récolte et les pertes à l'entreposage. Par conséquent, aucun ajustement n'a été fait selon ces paramètres. Les VSRF s'appuient donc sur l'effet des doses de P_2O_5 sur les rendements et sur les calculs d'exportations. Ces VSRF considèrent la saturation en P du sol (ISP_1), un indicateur agroenvironnemental plus fiable et plus performant que la considération du P_{M3} seul, afin d'évaluer la disponibilité du P (Khiari et al., 2000). Afin de favoriser la protection de l'environnement et de minimiser les pertes de P, les classes de fertilité ont tenu compte des seuils agroenvironnementaux du REA (MDDEP, 2010). Le modèle utilisé pour l'élaboration des VSRF est basé sur l'indice de saturation en phosphore des sols (ISP_1) uniquement, sans distinction des groupes de textures. La distinction G1 vs. G2-G3 présentée au Tableau 16 résulte plutôt des seuils agroenvironnementaux du REA, lesquels diffèrent en fonction de la texture des sols.

Dans la première classe de fertilité regroupant les sols ayant un ISP_1 inférieur à 3,0 %, aucune VSRF n'a pu être déterminée en raison de l'absence de données en quantité suffisante. Pour cette catégorie de sol, la VSRF proposée est équivalente aux exportations de la culture, soit 50 kg P_2O_5 /ha. En effet, dans le cas des sols pauvres en P, un apport de P par fertilisation pourrait être nécessaire afin de réduire les risques de perte de rendement et de baisse à court terme de la fertilité du sol. Par exemple, une étude menée dans l'état de New York (États-Unis) souligne dans un sol pauvre en P (< 30 kg P_{Morgan} /ha) rapporte qu'un apport de 70 kg P/ha (160 kg P_2O_5 /ha) a augmenté le rendement en betteraves (Peck et MacDonald, 1981). L'apport d'une dose équivalente aux

exportations de la culture viserait l'adoption d'un bilan équilibré du P sur les sols, ce qui permettra d'éviter une baisse à court terme du P disponible des sols 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 teneur en P et surtout le P disponible en solution du sol dont 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 3,0 % et le seuil agroenvironnemental du REA (7,6 et 13,1 % de, respectivement, G1 et G2-G3), la dose agronomique optimale de 40 kg P₂O₅/ha est recommandée. Tel qu'expliqué à la section 3.2.2.1, cette dose a été jugée plus optimale et sécuritaire que les doses 17 à 20 kg P₂O₅, testées sur un nombre de sites particulièrement réduit (la plus petite dose testée étant habituellement favorisée en l'absence de différence significative entre les doses de P₂O₅). Au-delà des seuils agroenvironnementaux, un apport nul a été retenu, considérant que les résultats des analyses de variance démontrent une absence de gains, voire des pertes de rendement, suivant des apports d'engrais dans les sols saturés en P.

L'intervalle des VSRF proposées dans le cadre de cette étude, soit de 0 à 50 kg/ha de P₂O₅, est largement inférieur à celui utilisé actuellement au Québec (CRAAQ, 2010), lequel varie de 30 à 155 kg/ha (Tableau 16). En effet, pour les sols faiblement saturés en P (< 3 %, considérant une teneur moyenne en aluminium de 1100 ppm) la dose recommandée subit une baisse de 62 à 70 %. De plus, les présentes VSRF suggèrent un apport nul dans les sols saturés en P (au-delà des seuils de 7,6 et 13,1 % dans respectivement G1 et G2-G3), alors que la grille de l'actuel Guide de fertilisation (CRAAQ, 2010) suggère un apport minimal de 30 kg/ha de P₂O₅, même dans les sols de 401 kg P_{M3}/ha et plus. Comparativement aux grilles de fertilisation étrangères présentées dans le Tableau 17, les présentes VSRF sont également inférieures. Toutefois, à l'exception de la grille albertaine, toutes intègrent également un apport nul pour les sols les mieux pourvus en P, à l'instar des présentes VSRF. La grille albertaine propose une fertilisation phosphatée particulièrement élevée, sa borne inférieure (277 kg P₂O₅) étant supérieure à toutes les doses maximales proposées dans les autres grilles.

La diminution importante des doses proposées pourrait résulter en partie du mode d'application des engrais, laquelle a été faite en bande pour les présents essais de fertilisation, tandis que la pratique courante au Québec repose principalement sur l'application à la volée, mode également proposé dans toutes les grilles externes actuelles. Ainsi, l'efficacité des engrais appliqués proche des plantules (CRAAQ, 2010) en comparaison à une application faite à la volée et non incorporé, pourrait expliquer les meilleurs rendements atteints dès l'application des faibles doses. De plus, cette efficacité des engrais en bande peut être exacerbée par le fait que la betterave potagère a un système racinaire réduit, lui conférant une moins bonne efficacité à prélever le phosphore, élément non mobile. Aussi, il est pertinent de noter que les engrais ont été appliqués après la levée sur des cultures établies; leur incidence sur la germination des semences n'a donc pas pu être observée.

Tableau 16. Fertilisation phosphatée de la betterave potagère – Valeurs scientifiques de référence en fertilisation

Calibres visés ¹	Groupe de textures ²	Classe de fertilité ISP ₁ (%) ^{3,4}	Période d'application ⁵	VSRF ⁶ (kg P ₂ O ₅ /ha)
Cello et Institution	G1	(≤ 3,0)	Au semis	(50) ⁷
		3,1 – 7,6		40 ⁸
		> 7,6		0 ⁹
	G2, G3	(≤ 3,0)	Au semis	(50) ⁷
		3,1 – 13,1		40 ⁸
		> 13,1		0 ⁹

¹ Cello : diamètre de 3,8 à 6,4 cm; Institution : diamètre de 6,5 à 10,2 cm.

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

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

⁴ Les catégories ont été déterminées en tenant compte des seuils environnementaux du REA (*Règlement sur les Exploitations Agricoles*; MDDEP, 2010).

⁵ Dans le cadre des essais, la première application des engrais a été effectuée après la levée (1 à 2 semaines visées) pour des raisons techniques.

⁶ VSRF : Valeurs scientifiques de référence en fertilisation.

⁷ Dose proposée, basée sur les exportations en P₂O₅ des cultures, en vue de limiter les risques de perte de rendements et de diminution rapide de la fertilité phosphatée des sols faiblement saturés et fixateurs en P.

⁸ Dose agronomique optimale pour cette catégorie de sols.

⁹ Dose nulle considérant l'absence de gain par la fertilisation dans cette catégorie de sols.

Diminution des doses et mode d'apport des engrais :

Le choix des VSRF reflète la faible réponse à la fertilisation phosphatée mesurée dans les essais. Il s'agit d'une diminution marquée en comparaison aux recommandations actuelles de la grille du CRAAQ (2010). Toutefois, il ne faut pas négliger le fait que les engrais phosphatés des présents essais ont été appliqués en bande et que leur efficacité pourrait ainsi être inférieure si l'application était faite à la volée, spécialement en considérant la faible mobilité du phosphore et le système racinaire peu étendu de la betterave.

Sols de moins de 3,0 % d'ISP₁ :

Un seul site (site 14, ISP₁ moyen de 0,6 %) se situait dans cette catégorie, ce qui ne permet pas d'établir une dose agronomique optimale. La VSRF a donc été fixée à la valeur médiane des exportations, soit 50 kg P₂O₅/ha, en vue d'éviter de diminuer la teneur en P disponible par un bilan négatif puisque la plus petite dose testée était de 40 P₂O₅/ha. Cependant, les sols faiblement saturés en P fixent plus rapidement et avec plus d'intensité le P apporté par la fertilisation, ce qui abaisse le P inorganique disponible à la culture dans la solution du sol (Benjannet et al., 2018; Giroux et al., 2002). Ainsi, considérant que :

- la dose de 50 kg P₂O₅/ha ne présente qu'un écart de 10 kg P₂O₅/ha par rapport à la classe suivante;
- et que la valeur supérieure de l'intervalle des quantités de P₂O₅ exportées hors du site de production est de 69 kg P₂O₅/ha;

il est proposé d'utiliser soit la dose de 70 kg P₂O₅/ha qui assure de couvrir les exportations de la culture jusqu'à leur valeur la plus élevée ou la dose de 80 kg P₂O₅/ha qui correspond au niveau de dose subséquent de fertilisation. Le choix de ces doses viserait l'adoption d'un bilan équilibré du P sur les sols, ce qui permettra d'éviter une baisse à court terme du P disponible des sols à la suite de la transformation du P dans le sol et des exportations par la plante.



Tableau 17. Comparaison des recommandations en P_2O_5 pour la production de betterave potagère au Canada et à l'étranger

Provinces/États	Mode et période d'application	Fractionnement	Fertilité du sol	Dose P_2O_5 (kg/ha)	Source
Québec (CAN)		-	0-22 ppm P_{M3}	155	CRAAQ (2010)
			23-45	135	
			46-67	115	
			68-89	105	
			90-134	80	
			135-179	50	
			180 et +	30	
Ontario (CAN)	À la volée avant le semis et incorporé	Non	P du sol (Olsen)	0-180	MAAARO (2011)
Alberta (CAN)	À la volée avant le semis et incorporé	Non	P du sol	277-366	Alberta Agriculture and Rural Development (2014)
Michigan (É-U)	À la volée avant le semis et incorporé, ou en bande au semis	Non	P du sol (Bray-Kurtz ou Olsen)	0-196	Warncke et al. (2004)
Mid-Atlantic (É-U)	À la volée et incorporé	Non	P du sol (Mehlich-3)	0-168	Virginia Cooperative Extension (2018)
Nouvelle Angleterre (É-U)	À la volée et incorporé	Non	P du sol	0-168	University of Massachusetts Amherst (2021)
Nouvelle- Zélande	En bande au semis et la balance à la volée, incorporé	Oui	P du sol (Olsen) et type de sol	Appliquer entre 7 et 37 kg P_2O_5 par unité de P_{Olsen} de moins de 35 µg/mL	Reid et Morton (2019)

4. FERTILISATION POTASSIQUE

4.1 Portrait et représentativité des données

La répartition des blocs des essais K de la betterave potagère selon différentes classes de propriétés de sol (0-20 cm) est présentée au Tableau 18. Le pH optimal de cette culture est de 6,3 au Québec (CRAAQ, 2010). Dans le cadre des essais, le pH des sols était en majorité (55 %) dans l'intervalle 6,0 à 7,0, alors que 32 % de ces sols avaient un pH inférieur à 6,0. La représentativité des trois groupes texturaux (G1, G2, G3) étaient adéquates. Pour les sols à textures fines (G1), les teneurs en K_{M3} s'étendaient de 61 à 193 ppm. Dans ce groupe de textures, environ le tiers des blocs étaient sur des sols de moins de 100 ppm de K_{M3} et les deux tiers se trouvaient dans l'intervalle 100 à 200 ppm K_{M3} . Pour les sols à textures moyennes à grossières (G2 et G3), les teneurs en K_{M3} s'élevaient de 49 à 278 ppm, avec une majorité (81 %) des blocs qui avaient moins de 200 ppm K_{M3} . Cette forte proportion de sols peu pourvus en K_{M3} est propice à la détection d'une réponse de la betterave à la fertilisation potassique dans les différents groupes de textures de sol. Cependant, au-delà de 200 ppm K_{M3} , peu de données étaient disponibles, limitant l'étude dans les sols mieux pourvus.

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

pH _{eau} ¹	Blocs (%)	Teneur en K_{M3} (ppm)	Blocs (%)		Groupe de textures ²	Blocs (%)	Teneur en argile (%)	Blocs (%)
			G1	G2-G3				
< 6,0	32	≤ 100	36	38	G1	36	≤ 30	73
6,0 – 7,0	55	> 100 – 200	64	43	G2	36	> 30 – 60	27
> 7,0	12	> 200 – 300	0	10	G3	29	> 60	0
-	-	> 300	0	0	-	-	nd	0
-	-	nd	0	10	-	-	-	-

¹ Le pH adéquat pour la culture de la betterave potagère est de 6,3 (CRAAQ, 2010).

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

nd : non disponible.

4.2 Détermination des doses agronomiques optimales

4.2.1 Recherche d'indicateurs de fertilité du sol

Plusieurs facteurs peuvent influencer la biodisponibilité du K dans le sol et par conséquent, influencer la réponse de la betterave 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). Pour alléger la présentation des résultats, seuls les résultats des tests de l'indicateur retenu sont présentés au Tableau 19.

Les calibres de betteraves obtenus à la récolte peuvent être influencés par les apports en K_2O (Peck et MacDonald, 1981). Ainsi, deux variables de réponse ont été considérées lors de la détermination des seuils de réponse : i) le rendement vendable, soit la somme des rendements des calibres cello et institution et ii) le

rendement de calibre cello. La teneur du sol en K_{M3} s'est avérée être le meilleur indicateur de fertilité pour prédire la réponse à la fertilisation potassique, indépendamment du groupe de textures. Aussi, le seuil de K_{M3} déterminé pour le rendement cello (92,6 ppm) étant similaire à celui du rendement vendable (97,4 ppm), ce dernier a été utilisé pour les deux catégories de rendements. Par ailleurs, bien que non significatif ($P = 0,274$), le seuil de 143 ppm K_{M3} du rendement vendable a été retenu compte tenu de sa précision et de sa spécificité. L'utilisation conjointe de ces deux seuils (97,4 et 143 ppm K_{M3}) a permis d'uniformiser les seuils des VSRF pour les deux marchés visés, sans nuire à la détermination des doses menant au meilleur rendement.

Tableau 19. Valeurs critiques des indicateurs de sols significatifs selon les tests de Cate-Nelson pour les essais K dans la betterave potagère

Variable de réponse	Indicateur de sol	Groupe de textures ²	N ³	Valeur critique (ppm)	RRel (%) ⁴	Sensitivité	Spécificité	Précision	P
RRel vendable ¹	K Mehlich-3	G1, G2, G3	31	97,4	79	0,80	0,55	0,71	0,106
				143,0	80	0,47	0,75	0,58	0,274
RRel cello ¹	K Mehlich-3	G1, G2, G3	31	92,6	79	0,78	0,50	0,82	0,185

¹ Vendable : betteraves dont le diamètre est entre 3,8 et 10,2 cm; Cello : betteraves dont le diamètre est entre 3,8 et 6,4 cm.

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

³ Nombre d'observations.

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

4.2.2 Effet de la dose de potassium sur le rendement

Dépendamment du marché visé, les mêmes calibres ne sont pas recherchés. Certains producteurs commercialisent les deux calibres (rendement vendable; cello et institution), tandis que d'autres commercialisent seulement la betterave de calibre cello. Par conséquent, comme les doses agronomiques optimales de K_2O dépendent des calibres visés, des analyses de variance ont été produites sur les rendements vendables (section 4.2.2.1), puis, dans un deuxième temps, sur les betteraves cellos uniquement (section 4.2.2.2).

4.2.2.1 Rendement vendable

Les résultats des ANOVA des essais K sur le rendement vendable sont présentés à la Figure 21 (voir la section 2.2.2 pour les explications sur l'interprétation de la figure et des résultats). Parmi les modèles envisagés, seuls ceux permettant l'interprétation agronomique de la réponse à la fertilisation sont présentés.

D'abord, une ANOVA a été effectuée sans tenir compte des indicateurs de fertilité des sols afin de visualiser globalement l'effet de la fertilisation sur le rapport de rendements (ROM) de la culture (Figure 21A). Ce modèle (A) a démontré un effet significatif de la fertilisation potassique sur le ROM ($P = 0,019$, $N = 170$). L'interprétation des résultats pose un défi puisque l'augmentation des rendements de la culture suivant la fertilisation est irrégulière. Considérant les résultats de ce modèle, l'apport de 35 kg/ha de K_2O serait suffisant pour l'obtention du rendement optimal, et permettrait d'obtenir un gain de rendements variant de 4 à 22 %, avec une moyenne de 13 %. Ce résultat est questionnable et pourrait probablement découler du déséquilibre du jeu de données affectant l'estimation des moyennes obtenues pour les doses de 35 et de 105 kg K_2O /ha, en raison du faible nombre d'observations disponibles pour ces deux doses en comparaisons aux autres.

Une ANOVA a également été effectuée selon les groupes de textures (G1 vs. G2-G3, Figure 21B) indépendamment de la richesse du sol en K. Aucune différence statistiquement significative n'a été obtenue entre les traitements, suggérant que la plus petite dose testée (35 kg K₂O/ha) serait suffisante pour l'obtention des meilleurs rendements tant dans les sols lourds (sols G1; $P = 0,155$; $N = 62$), que les sols moyens et légers (sols G2 et G3; $P = 0,397$; $N = 108$). De plus, les courbes de réponse relative à la fertilisation potassique étaient similaires entre les différents groupes de textures de sols. Selon ce modèle, les gains de rendements moyens obtenus suivant la fertilisation ont varié de 4,3 à 17,0 % dans les G1 et de 9,0 à 17,6 % dans les G2-G3.

Le troisième modèle (Figure 21C) permet de constater l'importance de la teneur du sol en K dans l'ampleur de la réponse de la culture à l'engrais. Les valeurs critiques déterminées par le test de Cate-Nelson (Tableau 19) ont été utilisées comme seuils de richesse, tandis que la plus faible valeur du jeu de données (49 ppm K_{M3}) a servi comme limite minimale pour laquelle une VSRF peut être produite. Ainsi, pour une teneur du sol entre 49 et 97,4 ppm K_{M3}, les doses comprises entre 117 et 140 kg K₂O/ha ont mené au rendement optimal ($P = 0,066$; $N = 52$), avec des gains moyens de 53,9 % par rapport au témoin sans engrais. Dans les sols contenant entre 97,4 et 143,0 ppm K_{M3}, aucune différence significative n'a pu être détectée entre les traitements ($P = 0,268$; $N = 41$). Dans cette catégorie de sols, les observations uniques pour les doses 35 et 105 kg/ha ont engendré des intervalles de confiance très larges. En effet, ces données uniques résultent d'une erreur par rapport à ce qui a été établi au protocole, selon laquelle, les doses de 35 et 105 kg K₂O/ha devaient être testées sur les sites dits riches en K uniquement (K_{M3} > 179 ppm). Étant donné l'incertitude associée à la plus petite dose testée, le choix de la VSRF s'est arrêté au groupe de doses suivant, soit dans l'intervalle 50 à 70 kg K₂O/ha. Ce choix est appuyé par la forte réponse de la culture aux apports de K et les quantités considérables de K exportées par la betterave (Tableau 20). Enfin, pour les sols ayant plus de 143 ppm K_{M3}, les apports potassiques ont été profitables à la culture en comparaison au témoin sans engrais (gains de rendement moyens de 14 %). Ainsi, bien que les sols étaient déjà bien pourvus en K, la plus petite dose testée (35 kg K₂O/ha) a été retenue. Cette dernière a mené à des gains moyens de rendement comparables aux parcelles recevant les doses plus élevées ($P = 0,111$; $N = 66$).

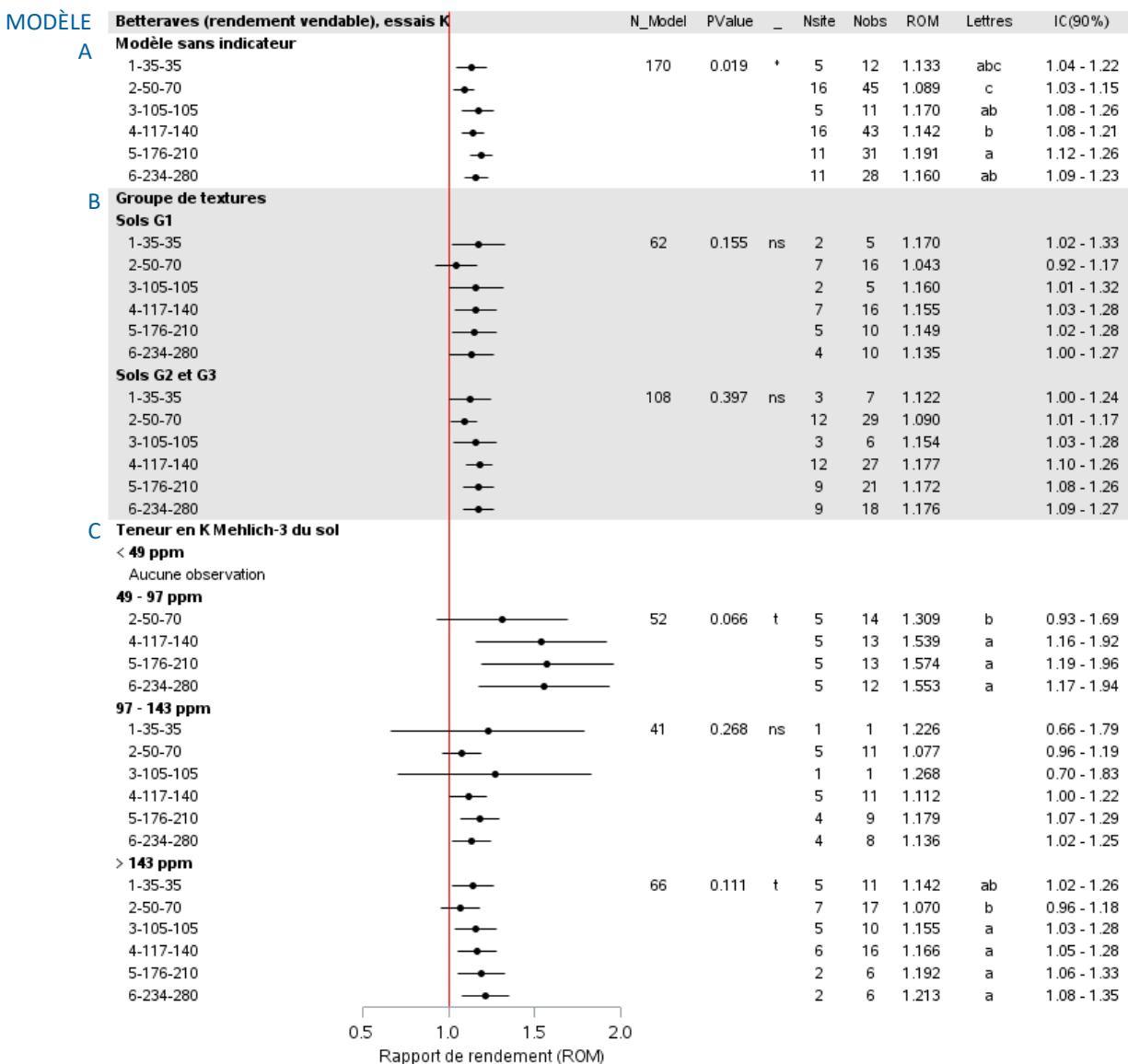


Figure 21. Résultats des analyses de variance sur la réponse de la betterave potagère aux doses croissantes de potassium. G1 : sols à texture fine ; G2 : sols à texture moyenne ; G3 : sols à texture grossière ; N_model : nombre d'observations du modèle ; Nsite : nombre de sites ; Nobs : nombre d'observations ; 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 $P < 0,12$.

4.2.2.2 Rendements cello

Les résultats des ANOVA des essais K sur le rendement en betterave cello sont présentés à la Figure 22 (voir la section 2.2.2 pour les explications sur l'interprétation de la figure et des résultats). D'abord, une ANOVA a été effectuée sans tenir compte des indicateurs de fertilité des sols afin de visualiser globalement l'effet de la fertilisation sur le rapport de rendements (ROM) de la culture (Figure 22A). Selon ce modèle (A), aucun effet significatif de la fertilisation potassique n'a pu être détecté entre les différents traitements fertilisés ($P = 0,456$; $N = 171$). De manière générale, des gains de rendements variant entre -2 % à 6 % ont été obtenus à la suite de

la fertilisation potassique. Le modèle suivant (Figure 22B) compare la réponse à la fertilisation potassique selon les groupes de textures (G1 vs G2-G3), sans tenir compte de la richesse du sol en K. Comme vu précédemment pour le rendement vendable (cello et institution), l'augmentation de la dose n'a pas engendré d'augmentation des rendements tant dans les sols G1 ($P = 0,952$) que dans ceux G2-G3 ($P = 0,791$), lorsqu'aucun indicateur supplémentaire n'est retenu. Dans les sols G1, les parcelles fertilisées ont engendré des rendements en betteraves cello similaires au témoin (ROM moyen de 0,96 à 1,03), tandis que dans les sols G2-G3, une faible augmentation des rendements est perceptible. Dans les sols G2-G3, les gains de rendement diminuent avec l'application de doses croissantes de K_2O (ROM moyens de 0,99 à 1,08).

Enfin, le dernier modèle évalue la réponse de la betterave cello en fonction de la teneur en K du sol (Figure 22C). Comme pour le rendement vendable (section 4.2.2.1), la valeur de 49 ppm est la limite minimale du jeu de données pour laquelle une VSRF a pu être produite. Pour les classes suivantes (49 – 97 et 97 – 143 ppm), les analyses ont été conduites séparément. Cependant, la différence entre les traitements étant non-significative ($P = 0,31$ et $0,70$; données non présentées) dans les deux classes, celles-ci ont été regroupées en un intervalle de 49 – 143 ppm et analysées ensemble pour obtenir davantage de puissance statistique. Malgré ce regroupement, les doses croissantes de K_2O n'ont pas eu davantage d'effet significatif ($P = 0,358$; $N = 94$) sur le rendement en cello par rapport à celui d'une parcelle non-fertilisée. De plus, comme pour le rendement vendable, l'observation unique pour la dose 35 kg K_2O/ha résulte d'une erreur par rapport aux doses qui ont été établies au protocole pour les sites ayant moins de 179 ppm K_{M3} , engendrant de très larges intervalles de confiance (incertitude importante découlant de la grande variabilité de la réponse estimée). Par conséquent, le groupe de doses suivant (50-70 kg K_2O/ha) a été privilégié comme dose agronomique optimale. À noter que pour certains sites, les rendements en betterave cello ont légèrement décliné avec l'augmentation des doses de K alors qu'ils ont engendré une augmentation du rendement du calibre institution (données non présentées), traduisant l'augmentation du diamètre de la betterave avec l'augmentation de la dose de K_2O . Dans les sols ayant plus de 143 ppm K_{M3} , en l'absence de différences significatives entre les traitements ($P = 0,692$; $N = 66$), la plus petite dose testée dans cette catégorie de sol (35 kg K_2O/ha) serait adoptée comme dose agronomique optimale. Des gains de rendements de l'ordre de 3 à 11 % y sont d'ailleurs mesurés.

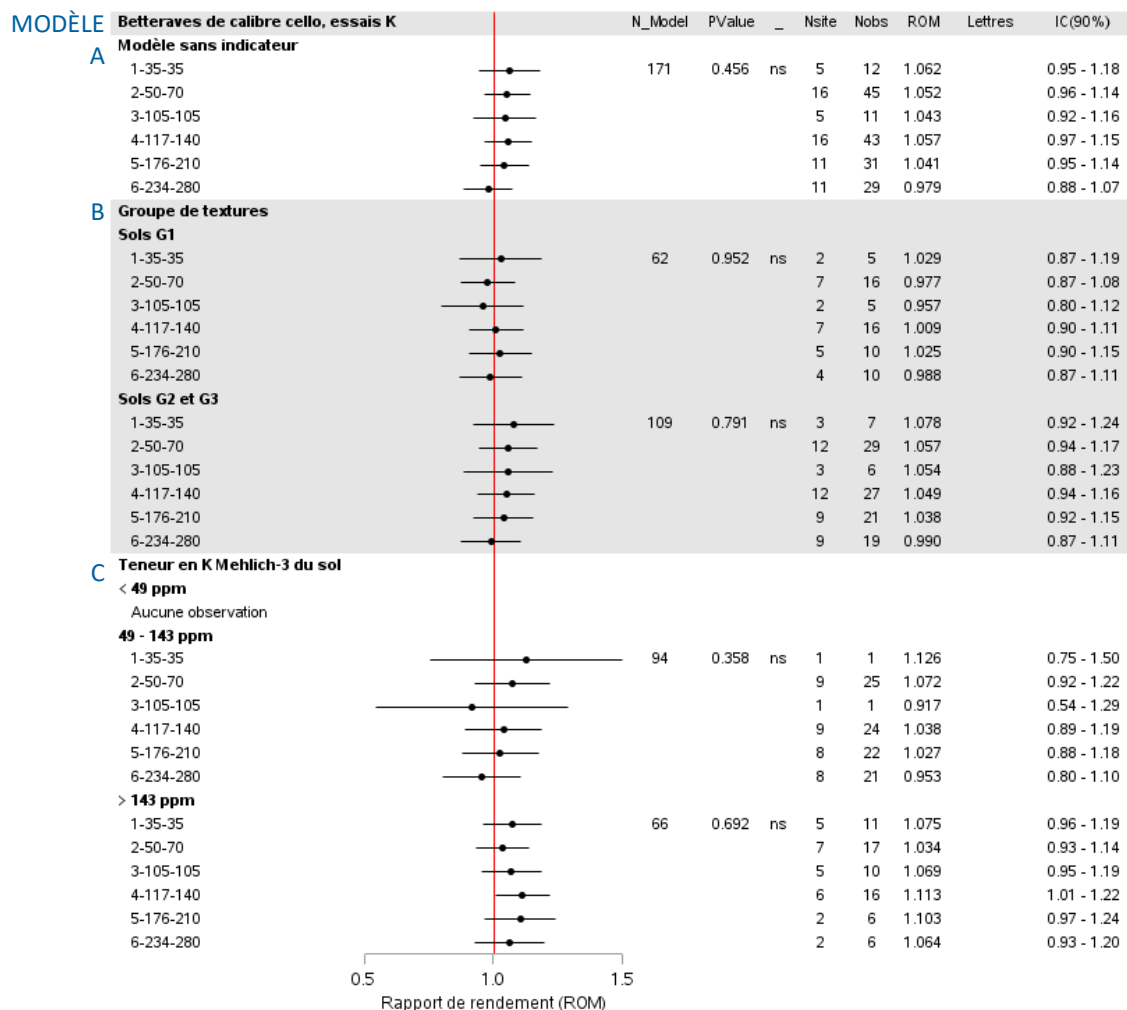


Figure 22. Résultats des analyses de variance sur la réponse de la betterave potagère de calibre cello aux doses croissantes de potassium. G1 : sols à texture fine ; G2 : sols à texture moyenne ; G3 : sols à texture grossière ; N_model : nombre d'observations du modèle ; Nsite : nombre de sites ; Nobs : nombre d'observations ; ROM : rapport de rendement (rendement parcelle fertilisée/rendement parcelle témoin) ; IC : Intervalle de confiance ; Les moyennes d'une même catégorie qui ne partagent pas la même lettre sont significativement différentes au seuil $P < 0,12$.

4.2.3 Effet de la dose de potassium sur la qualité, les calibres, les pertes à la récolte et les pertes à l'entreposage

4.2.3.1 Qualité des betteraves

Robustesse de l'attache du feuillage

La robustesse de l'attache du feuillage a été évaluée avant la récolte par l'attribution d'une cote entre 1 (*attache insuffisante*) et 3 (*très bonne attache*). Pour plus d'explication concernant cette évaluation, voir la section 2.2.3.1.

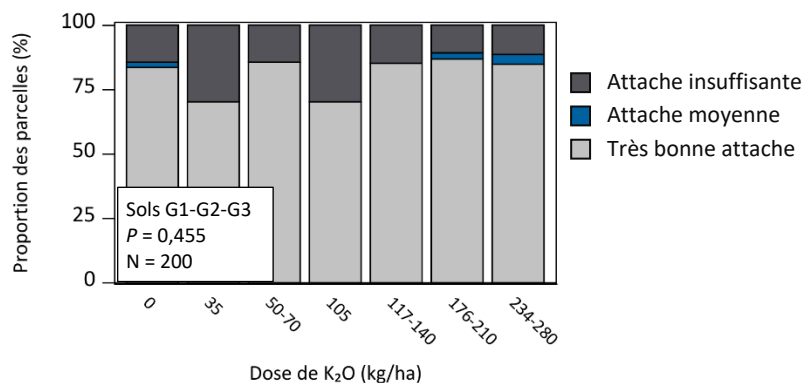


Figure 23. Évaluation de la robustesse de l'attache du feuillage selon la dose de potassium. N : nombre d'observations.

La dose de K n'a pas eu d'incidence statistiquement significative sur la robustesse de l'attache du feuillage ($P = 0,455$; Figure 23). De 9 à 15 % des attaches ont été jugées « *insuffisantes* », excepté pour les doses 35 et 105 kg K₂O/ha où la proportion est plus grande (37,5 %). Cependant, cela peut s'expliquer par le faible nombre d'observations disponibles pour ces doses ($N = 8$) comparativement aux autres groupes de doses ($N = 30$ à 41), ce qui diminue l'exactitude de la moyenne de l'échantillon. Finalement, le critère de l'attache à la tige n'a pas eu d'incidence sur le choix des VSRF de K dans la betterave.

Calibres à la récolte

À la récolte, les betteraves ont été classées selon les critères de qualité du marché. Les betteraves vendables ont été classées en deux calibres selon leur diamètre, soit cello (3,8 à 6,4 cm) ou institution (6,4 à 10,2 cm). Les betteraves trop petites ou trop grosses ont été catégorisées parmi les pertes (betteraves non vendables).

Les rendements de la betterave selon le calibre mesuré à la récolte sont présentés à la Figure 24. Toutes textures confondues, l'augmentation des apports en K ont favorisé le rendement des betteraves de calibre institution, sans toutefois faire varier le rendement des betteraves cellos ($P = 0,890$). En effet, l'augmentation des doses de K₂O a engendré des rendements en institution de 13 à 44 % supérieurs pour les doses de 35 à 234-280 kg K₂O/ha ($P < 0,0001$) par rapport au rendement en institution du témoin (15 125 kg/ha). Cette augmentation est plus marquée dans les sols des groupes G2-G3 que dans les sols du groupe G1 (données non présentées). Les apports en K₂O n'ont cependant pas influencé significativement le rendement en betteraves cellos, ce dernier étant assez stable (moyenne de $19\,135 \pm 365$ kg/ha). Ces observations sont cohérentes avec les observations de la section 4.2.2, selon lesquelles l'augmentation du rendement dépend des calibres considérés. En fonction du marché visé, la fertilisation potassique pourrait être ajustée.

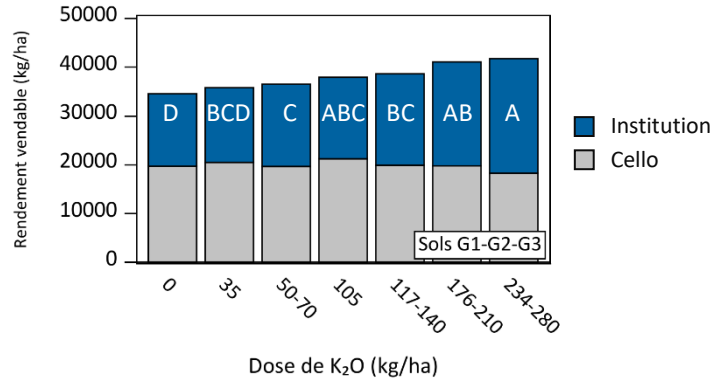


Figure 24. Calibres à la récolte selon les doses de potassium. Les lettres indiquent les différences significatives (LSD, $P < 0,1$) entre les rendements de calibre institution pour les différents traitements de fertilisation. Les diamètres des calibres étaient : Cello : 3,8 à 6,4 cm; Institution : 6,4 à 10,2 cm.

4.2.3.2 Pertes à la récolte

À la récolte, les betteraves ont été classées selon les critères de qualité du marché. Pour plus d'explication concernant cette évaluation, voir la section 2.2.3.3.

Les applications de K ont diminué les pertes à la récolte, par rapport au témoin sans engrais potassique ($P = 0,004$; Figure 25). L'effet a été observé dès l'application de la dose minimale testée de 35 kg K₂O/ha. Cette diminution des pertes s'expliquerait principalement par une diminution des betteraves rejetées pour immaturité, et dans une moindre mesure, des rejets causés par les maladies, les malformations et les autres causes (Figure 26). L'effet a été plus important dans les G2-G3 ($P = 0,041$) que dans les G1 ($P = 0,111$). Dans tous les groupes de textures de sol, les betteraves immatures ont prédominé dans les parcelles témoin (0 K₂O), ce après quoi leur proportion a diminué. En revanche, la proportion des betteraves trop grosses a varié selon le groupe de textures du sol et la dose de K. Dans les sols G1, la proportion des betteraves trop grosses a augmenté dans les parcelles fertilisées, tandis qu'aucune tendance claire n'est observée dans les G2-G3. Les autres causes de rejet n'ont représenté qu'une faible proportion du rendement total et n'ont pas semblé influencées par le niveau de fertilisation potassique.

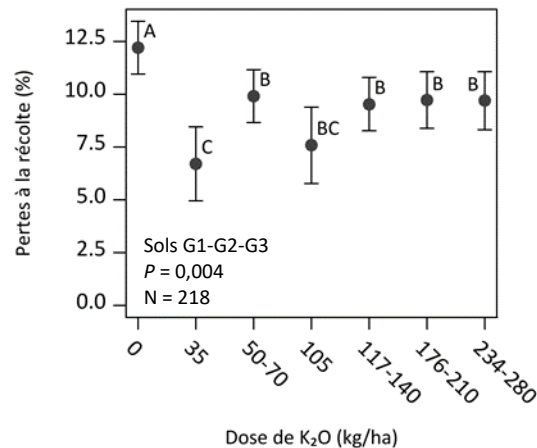


Figure 25. Pertes à la récolte en fonction des doses croissantes de potassium. Les moyennes présentées sont les valeurs estimées du modèle statistique. Les moyennes suivies d'une même lettre ne diffèrent pas statistiquement (LSD, $P < 0,1$). Les barres représentent les erreurs-types. N : nombre d'observations.

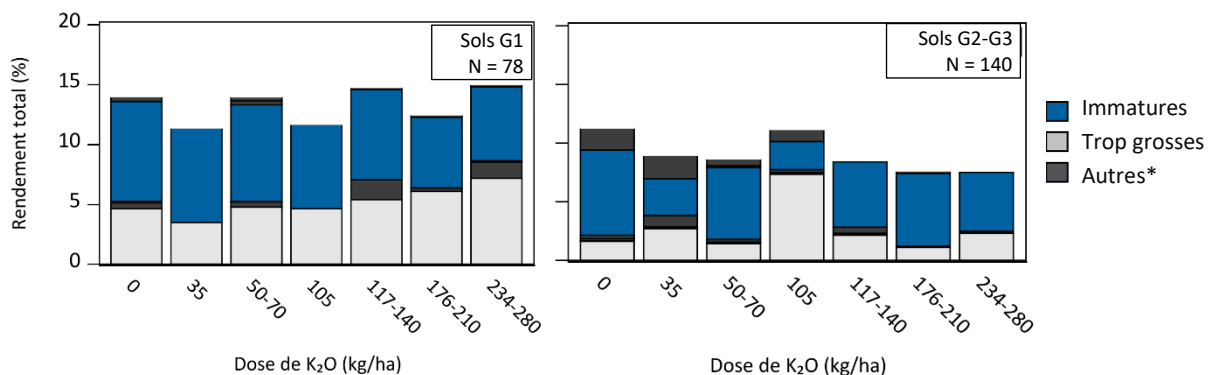


Figure 26. Pertes à la récolte par rapport au rendement total et en fonction des traitements de fertilisation dans les groupes de textures G1 vs. G2-G3. Seules les catégories non-vendables sont illustrées sur la figure. * : Afin de simplifier la présentation du graphique, les causes de déclassement autres que l'immaturité et un trop gros calibre ont été illustrées en gris foncé. Ces causes regroupent la pourriture du collet de la racine, les malformations, etc. N : nombre d'observations.

4.2.3.3 Pertes suivant l'entreposage

Lorsque possible, des betteraves commercialisables étaient entreposées dans l'entrepôt du producteur ou dans des conditions similaires. Suivant l'analyse exploratoire, seulement 37 % validées des essais K ont présenté des données d'entreposage exploitables pour l'analyse d'entreposage, 26 % avaient des données d'entreposage considérées aberrantes (ex. mauvaises conditions d'entreposage), tandis que 37 % n'ont pas été évalués pour la conservation en entrepôt en raison de la non-disponibilité de structures de stockage sur le site. Ainsi, les conclusions tirées s'appuieront sur un nombre très réduit d'observations, et les conclusions doivent être considérées avec prudence.

Parmi les données disponibles, les lieux d'entreposage étaient soit un caveau (18 %) ou un autre lieu réfrigéré (82 %). La température a varié entre 1 à 4 °C. Les betteraves ont été entreposées dans des sacs en filet durant 105 à 124 jours. À leur sortie, elles étaient classées dans différentes catégories avant d'être pesées. La proportion de pertes après entreposage correspondait à la masse de betteraves non vendables par rapport à la masse totale.

Les pertes suivant l'entreposage ont varié de 9 à 18 % (Figure 27). La dose de K n'a pas eu d'incidence significative sur les pertes de betteraves à l'entreposage ($P = 0,477$). La principale cause de rejet était le manque de fermeté (48 %), qui pourrait traduire une humidité relative trop faible des lieux d'entreposage. À noter que l'humidité relative n'a pas été mesurée à la plupart des sites. Enfin, d'autres betteraves ont été déclassées dû à la présence sur le légume de rhizoctonie (25 %), de sclérotiniose (24 %) ou pour d'autres raisons (3 %) qui n'ont pas été précisées. En absence d'effet significatif, les VSRF de K pour la betterave potagère n'ont pas été ajustées puisqu'aucune problématique liée à l'entreposage n'a pu être mise en évidence par les résultats.

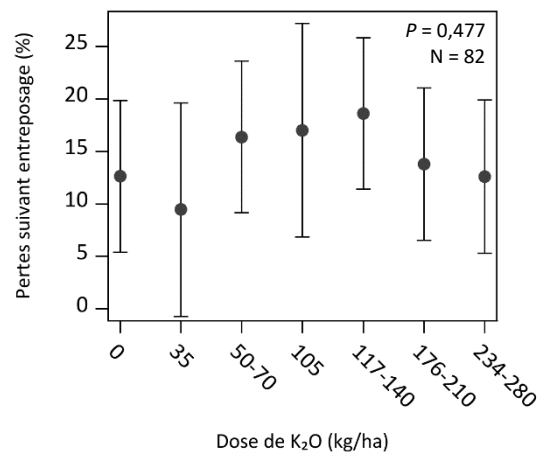


Figure 27. Pertes suivant une période d'entreposage en fonction des doses croissantes de potassium. Les moyennes présentées sont les valeurs estimées du modèle statistique. Les moyennes suivies d'une même lettre ne diffèrent pas statistiquement (LSD, $P < 0,1$). Les barres représentent les erreurs-types. N : nombre d'observations.

4.3 Diagnostic nutritionnel et exportations

À l'instar des essais précédents (N et P), le diagnostic nutritionnel basé sur les rendements et la composition des racines a été effectué sur la betterave potagère. Les résultats sont présentés au Tableau 20. Toutes les valeurs présentées dans cette section considèrent la racine seulement et ne tiennent pas compte du feuillage.

La population de tête (groupe d'individus à haut rendement et à l'équilibre nutritionnel) a eu une concentration en K₂O de $4,43 \pm 0,57$ kg/tonne humide, à un taux d'humidité de 86 % (Tableau 20). Cette valeur est équivalente à la valeur rapportée dans l'actuel guide du CRAAQ (2010) lorsqu'elle est rapportée au même taux d'humidité. La valeur obtenue est légèrement supérieure à celle issue de la base de données de l'USDA (NRCS, 2021), soit 4,1 kg K₂O/tonne humide, à un même pourcentage d'humidité.

Lorsque rapportée à l'hectare et considérant un rendement moyen de 57 958 kg, les exportations médianes de la population de tête ont été de 251 kg K₂O et ont varié de 146 à 408 kg K₂O. Les exportations en K₂O ont

augmenté plutôt linéairement avec le rendement (Figure 28). Les coefficients de variation (données non présentées) étaient faibles pour les concentrations inter-variétés. Ainsi, c'est majoritairement le rendement, plutôt que la variété, qui a influencé la quantité de K₂O exportée. La teneur en K₂O de la betterave peut toutefois varier selon les apports en N, comme l'a démontré Ugrinovic (1999). En effet, dans son étude, la teneur K₂O de la betterave tendait à diminuer suivant des apports de N de 225 kg/ha, laissant croire à une dilution du potassium dans la racine avec l'augmentation des rendements, considérant une diminution parallèle de la matière sèche.

Tableau 20. Concentrations et exportations de potassium de la betterave potagère 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 »)	86	4,43	0,57	256	251	146	408
Faible rendement et équilibre nutritionnel	86	4,83	0,94	84	92	50	106
Faible rendement et déséquilibre nutritionnel	86	4,35	0,82	93	97	53	176
Haut rendement et déséquilibre nutritionnel	85	4,23	0,56	216	209	165	297

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.

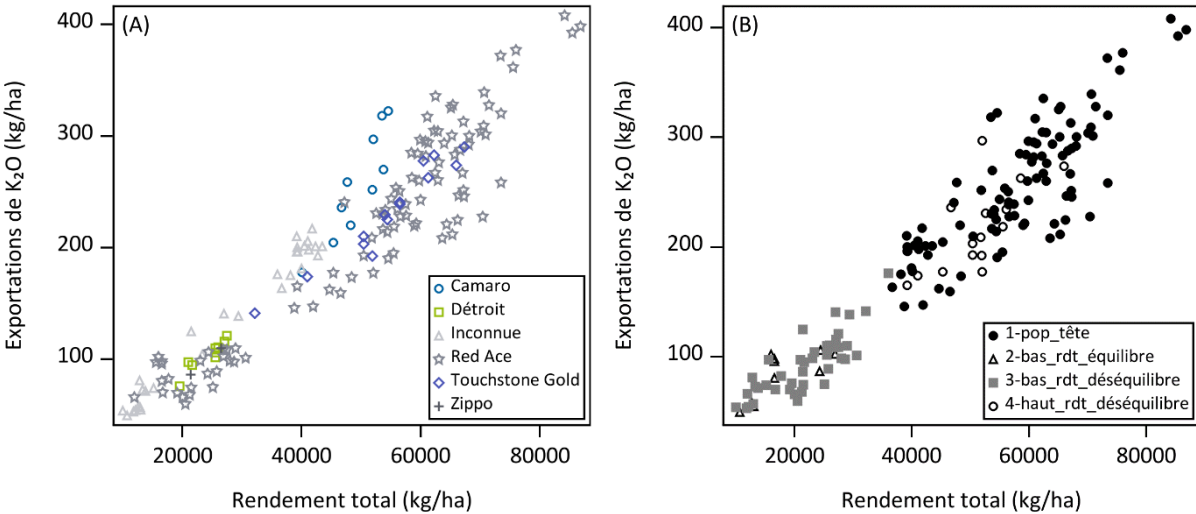


Figure 28. Exportations de K₂O en fonction des rendements de la betterave potagère exprimés selon les variétés (A) et selon le diagnostic nutritionnel (B). Les exportations de la betterave ont été calculées sur la racine seulement et ne tiennent pas compte du feuillage.

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

La fertilisation potassique proposée pour la culture de la betterave potagère au Québec est présentée au Tableau 21. Considérant l'ensemble des analyses, deux séries de VSRF ont été établies sur la base du calibre visé à la récolte et de la teneur en K_{M3} du sol. Le fractionnement proposé correspond à ce qui a été testé dans le cadre du PSEF, avec une dose plus importante en début de saison et une dose complémentaire en post-levée.

Pour le rendement vendable (diamètre de 3,8 à 10,2 cm), à partir de la teneur en K_{M3} du sol, quatre classes de fertilité potassique ont été identifiées : 1) inférieur ou égal à 48 ppm de K_{M3} , 2) entre 49 et 97 ppm de K_{M3} , 3) entre 98 et 143 ppm de K_{M3} , et 4) supérieur à 143 ppm de K_{M3} . Pour la première classe de fertilité des sols, le seuil de 48 ppm de K_{M3} n'est pas une valeur déterminée à partir du test de Cate-Nelson, mais correspond à la limite inférieure du jeu de données. En absence de données, une dose d'entretien de 250 kg K_2O /ha est proposée afin de couvrir les exportations en K_2O qui s'élèvent à 251 kg K_2O /ha. Par ailleurs, cette dose est similaire à la dose actuellement recommandée (240 kg K_2O /ha) au Québec dans la catégorie de sols la moins pourvue en K (CRAAQ, 2010). Il est important de souligner que pour les sols de cette classe, il pourrait s'avérer que selon la texture du sol et son contenu en MO, d'importants apports de N soient à appliquer, menant à une dose combinée N+ K_2O très élevée. De ce fait, si les engrais devaient être apportés en bande, une attention particulière s'avèrera nécessaire de la part de l'agronome-conseiller quant aux apports combinés de N+ K_2O afin d'éviter tout risque de salinité et de toxicité ammoniacale pouvant causer la brûlure des semis (MAAARO, 2021). D'ailleurs, afin d'éviter cette situation dans le cadre des présents essais, les plus fortes doses de K_2O ont été fractionnées en deux apports, et une partie de la dose au semis a pu être apportée à la volée (section 1.4.3). Pour les sols ayant une teneur en K_{M3} de 49 à 97 ppm et de 98 à 143 ppm, les doses optimales de 140 et de 70 kg K_2O /ha, fractionnées en deux apports, sont respectivement proposées. Enfin, au-delà du seuil de 143 ppm, un apport unique de 35 kg K_2O /ha est proposé en raison des gains de rendements variant de 7 à 21 % et la diminution des pertes à la récolte suivant un apport en K.

Dans le cas où le marché visé est spécifiquement celui de la betterave cello (diamètre de 3,8 à 6,4 cm), les mêmes seuils de réponses agronomiques déterminés pour le rendement vendable sont applicables. Toutefois, tel que présenté dans la section 4.2.2.2, de plus faibles doses sont nécessaires dans les sols pauvres en K. Pour la première classe de fertilité regroupant les sols ayant une teneur en K_{M3} inférieure ou égale à 48 ppm, en absence d'observations, une dose d'entretien de 125 kg K_2O /ha est proposée, correspondant à la moitié des exportations (250 kg K_2O /ha) de la culture. Ce choix résulte du fait que la valeur des exportations est jugée excessive par rapport à la réponse observée et que de trop gros apports risqueraient de favoriser la production de betteraves institution au détriment de la cello. Pour les sols de 49 à 143 ppm K_{M3} , la dose de 70 kg K_2O /ha fractionnée en deux apports est retenue. Enfin, au-delà du seuil de 143 ppm, un apport unique de 35 kg K_2O /ha correspondant à la plus petite dose testée est proposé.

Dans le cadre de cette étude, la fertilisation potassique a contribué à diminuer les pertes de rendements en lien avec les betteraves immatures et les rejets causés par les maladies, notamment dans les sols moyens et grossiers. Les apports en K n'ont cependant pas eu d'impact significatif sur la robustesse de l'attache du feuillage. De même, aucun effet des doses de K n'a été détecté sur la qualité de la betterave suivant l'entreposage.

De manière générale, les recommandations en K₂O de cette étude (35 à 250 kg/ha) sont similaires aux recommandations actuelles au Québec (30 à 240 kg K₂O/ha; CRAAQ, 2010). Ces nouvelles valeurs tiennent compte du calibre visé de même que de la teneur en K_{M3} du sol exprimée en ppm plutôt qu'en kg/ha. D'autre part, pour la production de betteraves de calibre cello, l'intervalle des doses recommandées (35 à 125 kg K₂O/ha) représente une diminution considérable sans nuire aux rendements ni à la qualité de la récolte. Enfin, les recommandations de la présente étude sont similaires à celles proposées ailleurs au Canada et dans le nord-est des États-Unis où les plus fortes doses recommandées atteignent 168 à 336 kg K₂O/ha (Tableau 22).

Tableau 21. Fertilisation potassique de la betterave potagère – Valeurs scientifiques de référence en fertilisation

Calibres visés ¹	Groupe de textures ²	Classe de fertilité K _{M3} (ppm) ³	Période d'application ⁴	Fractionnement ⁵ (kg K ₂ O/ha)	VSRF ⁶ (kg K ₂ O/ha)
Cello et Institution	G1, G2, G3	(≤ 48)	Au semis	(160)	(250) ^{7,9}
			En post-levée	(90)	
		49 – 97	Au semis	90	140 ^{8,9}
			En post-levée	50	
		98 – 143	Au semis	50	70 ^{8, 11}
			En post-levée	20	
		> 143	Au semis	35	35 ⁸
			En post-levée	0	
		(≤ 48)	Au semis	(75)	(125) ⁷
			En post-levée	(50)	
Cello	G1, G2, G3	49 – 143	Au semis	50	70 ^{10, 11}
			En post-levée	20	
		> 143	Au semis	35	35 ¹⁰
			En post-levée	0	

¹ Cello : diamètre de 3,8 à 6,4 cm; Institution : diamètre de 6,5 à 10,2 cm.

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

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

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

⁵ Les fractionnements sont présentés tels que testés. Dans le cas où la VSRF n'est pas une dose testée, les fractionnements sont grisés et sont présentés dans les mêmes proportions que pour les doses testées similaires.

⁶ VSRF : Valeur scientifique de référence en fertilisation.

⁷ En absence de données dans cette catégorie de sols, dose d'entretien proposée afin de couvrir la totalité ou la moitié des exportations en K₂O de la culture, lorsque les calibres visés sont respectivement tous les calibres (cello et institution) ou la cello.

⁸ Dose agronomique optimale dans cette catégorie de sols.

⁹ Dans l'éventualité où de fortes doses de N+K₂O seraient apportés en bande et non à la volée, dans le but d'amoindrir les risques de salinité au semis, une part des engrais peut être appliquée en bande, tandis que l'excédent peut être appliqué à la volée en présemis, incorporé.

¹⁰ Plus petite dose testée étant donnée le gain à fertiliser (ROM > 1) et l'absence de différence significative entre les ROM.

¹¹ Dose médiane du groupe de doses 50-70.

- Dans le cadre des essais K, aucune donnée n'était disponible pour les sols de moins de 49 ppm de K_{M3} . Ainsi, en absence de données pour cette catégorie de sol, les doses de 250 et de 125 kg K_2O /ha sont proposées, respectivement, pour le rendement vendable et le rendement vendable cello. Celles-ci correspondent à la totalité et à la moitié des exportations en K_2O de la culture (section 4.3). Alternativement, si la dose de K_2O de 250 kg/ha était jugée trop élevée, la dose testée de 210 kg/ha pourrait également être sélectionnée. Toutefois, cette dose ne s'appuie pas sur un résultat scientifique et dépend du choix *a priori* des doses à inclure dans le protocole d'essai, contrairement aux valeurs d'exportations qui sont basées sur un calcul statistique robuste de données générées par les présents essais.
- Dans le cadre des essais, la combinaison des plus hautes doses de $N+K_2O$ n'a pas été testée. Dans l'éventualité où d'importantes doses de K ou de $N+K_2O$ doivent être apportées en bande et non à la volée, une part de l'engrais potassique peut être en bande et l'autre à la volée afin d'amoindrir les risques de salinité au semis. Une autre stratégie d'application pourrait également atténuer le risque tel que le déplacement d'une certaine quantité de K en post-levée ou l'ajout d'un fractionnement.
- Il a été démontré qu'à des quantités modérées, le potassium favorise l'absorption de l'azote, mais lorsqu'il devient trop abondant, il peut entraîner une carence en azote (Bergmann, 1992; Madhava Rao et al., 2006; cités par Petek et al., 2016). Par conséquent, Dans le cas où de fortes doses de K_2O seraient nécessaires, il est hautement recommandé de demander l'avis d'un groupe d'agronomes consultants de la betterave afin de recueillir leur avis sur le risque d'effets nocifs sur la culture en présence d'un déséquilibre du ratio N:K.
- Les résultats n'ont pas permis l'établissement d'une catégorie de sol où une dose nulle serait recommandée puisque des gains de rendements par la fertilisation potassique étaient encore mesurés dans les sols bien pourvus en K (> 143 ppm, Figure 21-22). De plus, dans l'ensemble, les apports potassiques ont diminué les risques de pertes à la récolte par rapport à un témoin sans engrais (section 4.2.3.2). Néanmoins, dans le cas où une telle classe de fertilité serait souhaitée, le seuil de réponse déterminé par le Cate-Nelson de 143 ppm K_{M3} pourrait être doublé (méthode de Cope-Rouse, 1973). Le seuil obtenu de 286 ppm K_{M3} pourrait établir une limite au-delà de laquelle une dose nulle serait suggérée. Ce seuil est au-delà du site le plus riche en K (278 ppm) pour lequel une réponse a été mesurée. La nutrition potassique reposerait alors sur l'approvisionnement par le sol. À titre de comparaison, les recommandations actuelles au Québec (CRAAQ, 2010) et en Alberta ne proposent aucune dose nulle, contrairement aux recommandations de l'Ontario, du Michigan, du Mid-Atlantic et de la Nouvelle-Angleterre (Tableau 22).



Tableau 22. Comparaison des recommandations en K₂O pour la production de betterave potagère 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)			0-45 ppm K _{M3}		240	CRAAQ (2010)
			46-89		210	
			90-134		170	
			135-179		130	
			180-223		90	
			224-268		50	
			269 et +		30	
Ontario (CAN)	À la volée avant le semis et incorporé	Non	K du sol (Acétate d'ammonium)	-	0-230	MAAARO (2011)
Alberta (CAN)	À la volée avant le semis et incorporé, ou en bande au semis	Non	K du sol	-	76-198	Alberta Agriculture and Rural Developpement (2014)
Michigan (É-U)	À la volée avant le semis et incorporé	Non	K du sol (Acétate d'ammonium)	CEC du sol	0-212	Warncke et al. (2004)
Mid-Atlantic (É-U)	À la volée et incorporé	Non	K du sol (Mehlich-3)	-	0-168	Virginia Cooperative Extension (2018)
Nouvelle Angleterre (É-U)	À la volée et incorporé	Non	K du sol	-	0-336	University of Massachusetts Amherst (2021)
Nouvelle-Zélande	En bande au semis et la balance à la volée incorporée avant le semis	Oui	K du sol (Quick Test)	Type de sol, Rendement visé	0-225 ¹	Reid et Morton (2019)

¹ La valeur de 225 est une estimation calculée à partir d'un rendement visé de 60 t/ha et d'une valeur de QT K de 10.

5. CONCLUSION

Les travaux réalisés par l'IRDA dans le cadre du Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation 2020-2023 (MIRVRF) ont permis de générer de nouvelles connaissances centrales pour la fertilisation de la betterave potagère en sol minéral, en plus de mettre à jour les classes de fertilité et les doses optimales en éléments majeurs pour cette culture. Ces recommandations reposent sur l'analyse des données validées d'expérimentations scientifiques québécoises réalisées au champ, appuyée de l'expertise agronomique et de principes scientifiques reconnus dans le domaine de la nutrition des cultures. Dans l'ensemble, les doses optimales proposées ne compromettent pas la qualité, les rendements, le potentiel d'entreposage et les bonnes pratiques agricoles.

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. Pour les productions agricoles visant les marchés des betteraves de calibres cello et institution, les VSRF recommandées ont subi des hausses dans les classes de sols les moins bien pourvues en matière organique, afin de s'accorder avec les objectifs propres à ces marchés. Les productions agricoles visant les betteraves de calibre cello, particulièrement adaptées aux marchés de détail, ne sont pas en reste avec une série de VSRF spécifique évitant la sur-fertilisation et la prépondérance des calibres non écoulables dans ces marchés. De même, la fertilisation phosphatée 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 unique série de VSRF a été produite. Ces VSRF constituent des diminutions par rapport aux recommandations actuelles. Les résultats des analyses appuient ces allègements, considérant les modestes gains de rendements obtenus avec les traitements de fertilisation, lesquels étaient de surcroîts obtenus dès l'application des faibles doses. Finalement, les apports en potassium sont modulés par la teneur en potassium (K) du sol comme indicateur de fertilité. À ce propos, un biais important a été corrigé par l'usage de la concentration du sol en ppm telle que mesurée par le laboratoire, plutôt que de la valeur convertie en kg/ha obtenue par calcul avec le facteur de conversion de 2,24. Les VSRF potassiques ont été établies en deux séries distinctes afin de rendre la recommandation spécifique au calibre visé par la production agricole.

Dans le cas de tous les éléments majeurs à l'étude, les résultats des analyses complémentaires ont suggéré peu d'effet de la fertilisation sur les pertes à la récolte et à l'entreposage. Le climat, les conditions d'humidité prévalant au champ et les conditions locales d'entreposage ont été des facteurs largement plus déterminants que la fertilisation.

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

6. FERTILISATION DE LA BETTERAVE POTAGÈRE

Valeurs scientifiques de référence en fertilisation

AZOTE					
Calibres visés ¹	Groupe de textures	Classe de fertilité MO _{PAF} (%) ^{2,3}	Période d'application ⁴	Fractionnement ⁵ (kg N/ha)	VSRF (kg N/ha)
Cello et Institution	G1	≤ 4,2	Au semis	100	160 ^{6,15}
			Au stade 6 feuilles	60	
		> 4,2	Au semis	50	80 ⁶
			Au stade 6 feuilles	30	
	G2, G3	(≤ 4,5)	Au semis	120	200 ^{6,15}
			Au stade 6 feuilles	80	
		(4,6 – 6,6)	Au semis	70	(120) ⁷
			Au stade 6 feuilles	50	
Cello	G1, G2, G3	(≤ 2,0)	Au semis	70	(120) ⁷
			Au stade 6 feuilles	50	
		(2,1) – 5,6	Au semis	50	80 ⁶
			Au stade 6 feuilles	30	
		> 5,6	Au semis	(65)	(65) ⁹
			Au stade 6 feuilles	(0)	

PHOSPHORE				
Calibres visés ¹	Groupe de textures	Classe de fertilité ISP ₁ (%)	Période d'application ⁴	VSRF (kg P ₂ O ₅ /ha)
Cello et Institution	G1	(≤ 3,0)	Au semis	(50) ¹⁰
		3,1 – 7,1		40 ⁶
		> 7,1		0 ¹¹
	G2, G3	(≤ 3,0)	Au semis	(50) ¹⁰
		3,1 – 13,1		40 ⁶
		> 13,1		0 ¹¹

POTASSIUM					
Calibres visés ¹	Groupe de textures	Classe de fertilité K _{M3} (ppm)	Période d'application ⁴	Fractionnement ⁵ (kg K ₂ O/ha)	VSRF (kg K ₂ O/ha)
Cello et Institution	G1, G2, G3	(≤ 48)	Au semis	(160)	(250) ^{12,15}
			En post-levée	(90)	
		49 – 97	Au semis	90	140 ^{6,15}
			En post-levée	50	
		98 – 143	Au semis	50	70 ^{6,14}
			En post-levée	20	
Cello	G1, G2, G3	> 143	Au semis	35	35 ⁶
			En post-levée	0	
		(≤ 48)	Au semis	(75)	(125) ¹²
			En post-levée	(50)	
Cello	G1, G2, G3	49 – 143	Au semis	50	70 ^{13,14}
			En post-levée	20	
		> 143	Au semis	35	35 ¹³
			En post-levée	0	

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 Cello : diamètre entre 3,8 et 6,4 cm; Institution : diamètre entre 6,4 et 10,2 cm.

² Le seuil de 2,0 % MO_{PAF} représente la borne inférieure du jeu de données.

³ Le seuil de 4,5 % MO_{PAF} résulte d'une contrainte liée au jeu de données, considérant la répartition discontinue et l'insuffisance des données au-delà de cette valeur.

⁴ Dans le cadre des essais, la première application des engrais a été effectuée après la levée pour des raisons techniques.

⁵ Les fractionnements sont présentés tel que testés.

⁶ Dose agronomique optimale dans cette catégorie de sols.

⁷ En absence de données en quantité suffisante dans cette catégorie de sols, le niveau de dose subséquent à la dose de la catégorie suivante est proposé. Celui-ci correspond à la dose la plus près des exportations de la culture.

⁸ En absence de données en quantité suffisante dans cette catégorie de sols, cette VRSF est basée sur la dose agronomique optimale d'un seul site présentant des teneurs en MO_{PAF} variant de 6,7 à 8,2 %.

⁹ En absence de données en quantité suffisante dans cette catégorie de sols, l'apport de la moitié des exportations en N de la culture est proposé. Cette dose n'a toutefois pas été testée dans le cadre de ces essais.

¹⁰ En l'absence de données dans cette catégorie de sol, cette dose est proposée en vue de limiter les risques de perte de rendements et de diminution rapide de la fertilité phosphatée des sols faiblement saturés et fixateurs en P. Celle-ci couvre les exportations de la culture.

¹¹ Dose nulle considérant l'absence de gain par fertilisation dans cette catégorie de sols.

¹² En l'absence de données dans cette catégorie de sols, dose d'entretien proposée afin de couvrir la totalité ou la moitié des exportations en K₂O de la culture, lorsque les rendements visés sont respectivement le cello ou le vendable total (cello et institution).

¹³ Plus petite dose testée considérant le gain à fertiliser (ROM > 1) et l'absence de différence significative entre les ROM.

¹⁴ Dose médiane du groupe de doses 50-70.

¹⁵ Dans le but d'amoindrir les risques de salinité au semis, dans le cas où des fortes doses de N+K₂O sont appliquées, une part des engrais peut être appliquée en bande, tandis que l'excédent peut être appliqué à la volée en présemis, incorporé.



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

Remerciements

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

7. RÉFÉRENCES

- Alberta Agriculture and Rural 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.
- 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>
- Benjannet, R., Nyiraneza, J., Khiari, L., Fuller, K., Bizimungu, B., Savoie, D., Jiang, Y., Rodd, V. et Mills, A. (2018). An Agro-Environmental Phosphorus Model for Potato in the Canadian Maritime Provinces. *Agronomy Journal*, 110(6), 2566-2575.
- 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.
- Bundiniene, O., Kavaliauskaite, D., Starkute, R. et Bobinas, C. (2009). Influence of fertilizers with prolongation effect on productivity of root-crop vegetables. *Acta Horticulturae*, 830, 525-530.
- Cantliffe, D. J. (1973). Nitrate Accumulation in Table Beets and Spinach as Affected by Nitrogen, Phosphorus, and Potassium Nutrition and Light Intensity 1. *Agronomy Journal*, 65(4), 563-565.
- Carcu, G., Lazureanu, A., Alda, S., Manea, D., Danci, M., Monica, N., Buzatu, C. et Motroc, P. (2009). Impact of fertilization on yield in garden beet, cucumbers, celery, radish and spring onion. *Journal of Horticulture, Forestry and Biotechnology*, 13, 344-347.
- 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.
- Christiansen, J. S., Thorup-Kristensen, K. et Kristensen, H. L. (2006). Root development of beetroot, sweet corn and celeriac, and soil N content after incorporation of green manure. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 81(5), 831-838.
- 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*.
- De Bauw, P., Van Asten, P., Jassogne, L. et Merckx, R. (2016). Soil fertility gradients and production constraints for coffee and banana on volcanic mountain slopes in the East African Rift: A case study of Mt. Elgon. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 231, 166-175.
- Defra, A. (2010). Fertiliser manual (RB209). *Department of the Environment, Food and Rural Affairs, TSO (The Stationary Office), London*.
- Fink, M., Feller, C., Scharpf, H. C., Weier, U., Maync, A., Ziegler, J., Paschold, P. J. et Strohmeyer, K. (1999).

- Nitrogen, phosphorus, potassium and magnesium contents of field vegetables - Recent data for fertiliser recommendations and nutrient balances. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 162(1), 71-73.
- 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).
- Gunnarsson, A., Lindén, B. et Gertsson, U. (2011). Biodigestion of Plant Material Can Improve Nitrogen Use Efficiency in a Red Beet Crop Sequence. *HortScience*, 46(5), 765-775.
- Henze, J. et Baumann, H. (1979). Quality of red beet (*Beta vulgaris* L.) as affected by storage conditions. *Acta Horticulturae*, 93, 59-65.
- Herak Custic, M., Petek, M., Toth, N., Poljak, M. et Cosic, T. (2007). Effects of organic and mineral fertilization on NPK status in soil and plant, and yield of red beet (*Beta vulgaris* var. *conditiva*). *Cereal Research Communications*, 35(2 PART I), 449-452.
- 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.
- Kristensen, H. L. et Thorup-Kristensen, K. (2007). Effects of vertical distribution of soil inorganic nitrogen on root growth and subsequent nitrogen uptake by field vegetable crops. *Soil Use and Management*, 23(4), 338-347.
- Kuhar, T. P., 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.
- MAAARO. (2011). *Recommandations pour les cultures légumières 2010-2011, Publication 363F*. Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales.
- MAAARO. (2021). *Existe-t-il une dose sûre pour l'engrais appliqué dans la raie de semis de soya?* <http://www.omafr.gov.on.ca/french/crops/field/news/croptalk/2018/ct-1118a2.htm>
- Mack, H. J. (1989). Effects of nitrogen, boron and potassium on boron deficiency, leaf mineral concentrations, and yield of table beets (*Beta vulgaris* L.). *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 20(3-4), 291-303.
- MDDEP. (2010). *Règlement sur les exploitations agricoles (REA)*. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs. http://www.environnement.gouv.qc.ca/milieu_agri/agricole/index.htm
- Mehlich, A. (1984). Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. *Communications in soil science and plant analysis*, 15(12), 1409-1416.

- Menon, R. G. et Chien, S. H. (1995). Soil testing for available phosphorus in soils where phosphate rock-based fertilizers are used. *Fertilizer research*, 41(3), 179-187.
- Metz, F. et Nass, D. (2015). Fertilisation des grandes cultures, Guide technique. Chambre d'agriculture région Alsace. https://grandest.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/Grand-Est/Alsace_fertilisation_grandes_cultures_guide_Alsace.pdf
- Munroe, J., Brown, C., Kessel, C., Verhallen, A., Lauzon, J., O'Halloran, I., Bruulsema, T. et Cowan, D. (2017). Manuel sur la fertilité du sol. *Publication 611F*, 239.
- N'dayegamiye, A. (2007). Le travail du sol : une importante régie agricole. *Le producteur de lait québécois*, 39-42.
- 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.
- Norseco. (2021). *Catalogue - Production maraîchère*.
- NRCS. (2021). *The PLANTS Database*. National Plant Data Team, Greensboro, NC USA. <http://plants.usda.gov>
- 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>
- Peck, N. H. et MacDonald, G. E. (1981). Table Beet Responses to Residual and Band-applied Phosphorus and Potassium. *Agronomy Journal*, 73(6), 1037-1041.
- 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.
- Petek, M., Ćustić, M. H., Tath, N., Slunjski, S., Čoga, L., Pavlović, I., Karažija, T., Lazarević, B. et Cvetković, S. (2012). Nitrogen and Crude Proteins in Beetroot (*Beta vulgaris* var. Conditiva) under Different Fertilization Treatments. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 40(2), 215-219.
- Petek, M., Herak Ćustić, M., Čoga, L. et Pecina, M. (2008). Phosphorus content in soil and in fresh and cooked red beet in dependence on different fertilization. *Cereal Research Communications*, 36, 435-438.
- Petek, M., Toth, N., Pecina, M., Karažija, T. et Herak Ćustić, M. (2016). Macrominerals in red beet root under organic and mineral fertilization. *Agriculturae Conspectus Scientificus*, 81(3), 173-179.
- Reid, J. B., Hunt, A. G., Johnstone, P. R. et Searle, B. P. (2020). Beetroot (*Beta vulgaris* L.) growth and response to N supply – a case study. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 48(4), 191-212.
- Reid, J. B. et Morton, J. (2019). *Nutrient management for vegetable crops in New Zealand*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2401910>
- Reid, J. B., Searle, B. P., Hunt, A., Johnstone, P. R., Bay, H., Morton, J. et Nelson, W. (2019). *Nutrient*

management for vegetable crops in NZ – recommendations and supporting information.

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

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

Straus, S., Bavec, F., Turinek, M., Slatnar, A., Rozman, C. et Bavec, M. (2012). Nutritional value and economic feasibility of red beetroot (*Beta vulgaris* L. ssp. *vulgaris* Rote Kugel) from different production systems. *African Journal of Agricultural Research*, 7(42), 5653-5660.

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

Ugrinovic, K. (1999). Effect of nitrogen fertilization on quality and yield of red beet (*Beta vulgaris* var. *conditiva* Alef.). *Acta Horticulturae*.

Ugrinovic, K., Kmecl, V., Herak Ćustiċ, M. et Znidarcic, D. (2012). Contents of oxalic acid, nitrate and reduced nitrogen in different parts of beetroot (*Beta vulgaris* var. *conditiva* Alef.) at different rates of nitrogen fertilization. *African Journal of Agricultural Research*, 7(20), 3066-3072.

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

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	Données d'entreposage	Conditions d'entreposage inadéquates entraînant le déclassement de 70 % des betteraves.
2	Essai P : 110	Unité expérimentale établie en dehors du bloc. Rendement anormalement élevé (+63 %) par rapport au reste de l'essai.
	Essai P : 106, 206 et 309	Effet spatial non contrôlé par le dispositif ayant eu un effet délétère sur les rendements.
	Essai K : 313 et 315	Confusion avec les étiquettes : les rendements de ces parcelles ont peut-être été inversés.
	Données d'entreposage	Conditions d'entreposage inadéquates entraînant le déclassement de l'ensemble des betteraves.
3	Site entier	Le site a été établi sur une pente, laquelle était perpendiculaire au blocage. Le dispositif expérimental n'a donc pas pu contrôler cet effet du terrain. L'effet sur les rendements est détecté par l'outil de visualisation de l'emplacement des zones à forts et faibles rendements.
4	Essai P : Bloc 1, 213, 214, 313	Effet spatial non contrôlé par le dispositif expérimental et ayant eu un effet délétère sur les rendements.
	Essai K : 202, 302	Zone de mauvais rendements localisée entraînant des coefficients de variation de 44 et 70 % pour les traitements T13 et T15.
6	Essai P : 101, 201, 301	Effet spatial non contrôlé par le dispositif expérimental. Effet délétère sur les rendements. Extrémité du dispositif.
	Essai K : 209	Dommages par les mulots mentionnés par les Collaborateurs.
	Analyses de sol Mehlich-3.	Les propriétés de sol dosées par la méthode Mehlich-3 diffèrent drastiquement entre deux moitiés du site, alors que les autres analyses présentent des valeurs constantes sur tout le site. Un mélange des échantillons est soupçonné.
8	Essai P : Bloc 1	Effet spatial non contrôlé par le dispositif expérimental.
9	Essai N : 105	Parcelle présentant un rendement anormalement faible entraînant un coefficient de variation élevé (29 %) pour ce traitement.
10	Site entier	Le site présente des zones localisées de forts et de faibles rendements à deux extrémités du dispositif, suggérant un effet spatial non contrôlé par le dispositif expérimental.
11	Essai K : Bloc 3	Trois des quatre rangs des unités expérimentales de ce bloc ont été détruites par un passage du sarcler.
12	Essai N	Le site a connu des problèmes de levée, lesquels ont causé un manque d'uniformité. De plus, une baissière a causé un effet délétère sur les rendements. Enfin, le site a subi une très forte pression de mauvaises herbes.
13	Essai K : 106, 206 et 306	Les Collaborateurs ont noté que les plants de ces parcelles étaient chétifs. Les rendements ont été affectés.
	Essai P	L'essai présente des zones localisées de forts et de faibles rendements à deux extrémités de l'essai suggérant un effet spatial non contrôlé par le dispositif expérimental. Cet effet a également été noté par les Collaborateurs sur le terrain.
14	Essai K : Bloc 3	Erreur d'application dans les traitements de fertilisation sur les rangs de garde. Coefficients de variation élevés dans l'essai.
	Essai K : 101, 201 et 301	Gradient de texture de sol observé et noté dans les commentaires du site, par les Collaborateurs sur le terrain. Ce gradient semble avoir affecté les rendements, qui sont plus élevés dans ces parcelles, entraînant de hauts coefficients de variation dans les traitements concernés.
15	Site entier	Forte présence de mauvaises herbes sur tout le site, mauvaise levée, populations faibles, rendements en deçà des rendements de référence.
16	Essai N : 203, 204	Une maladie a affecté les rendements vendables de ces parcelles.
17	Essai P : 114	Parcelle présentant un rendement anormalement faible entraînant un coefficient de variation élevé (26 %) pour ce traitement.

# site	Donnée exclue	Raison justifiant l'exclusion
19	Essai P : 110 Essai K et N	Commentaires de l'équipe sur le terrain recommandant l'exclusion de ces zone de plan d'expérience. Maladie ayant affecté les rendements et absence de témoin dans l'essai N.
20	Essai P : 201 Essai P : 204 Essai N : 208 Essai K : 212 Données d'entreposage	Plants peu développés dans cette parcelle. Rendement aberrant; erreur de saisie au fichier. Les valeurs originales de 2013 n'ont pas été retrouvées. Parcelle présentant un rendement anormalement faible entraînant un coefficient de variation élevé (39 %) pour ce traitement. Parcelle présentant un rendement anormalement faible entraînant un coefficient de variation élevé (26 %) pour ce traitement. Conditions d'entreposage inadéquates menant au déclassement pour pourriture de 50 à 80 % des betteraves entreposées.
21	Essai P : Blocs 1 et 2 202 112, 201, 212	Présence d'une baissière affectant les rendements, en plus de la présence de mauvaises herbes et de maladie. Rendement aberrant; erreur de saisie au fichier. Les valeurs originales de 2015 n'ont pas été retrouvées. Les parcelles se situent dans une baissière.