



INSTITUT DE RECHERCHE
ET DE DÉVELOPPEMENT
EN AGROENVIRONNEMENT

ИИ ДСКОЕИЛИВООИИЕИИИИ
ИИ ДИ ДИЛЕГОБЬЕИИИИИИ

FERTILISATION DE LA CAROTTE EN SOL MINÉRAL

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

FASCICULE 01 : Carotte en sol minéral



Responsable du projet : Christine Landry

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

Collaborateurs : Olivier Breton-Bourgault, Lélia Anderson, Anaïs Charles, Mélissa Paradis, Alexandre Leblanc, Julie Desautels, Simon Guillemette et Anne-Mary Le Guennec.

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

Date : Décembre 2020 (publication juillet 2021)

Fertilisation de la carotte en sol minéral. Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation du Québec (2020 – 2023). Fascicule 01 : Carotte en sol minéral.

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

LE RAPPORT PEUT ÊTRE CITÉ COMME SUIT :

Landry, C., C.-A. Joseph, S. Houde, J. Forest-D. et M. Grenier. 2021. Fertilisation de la carotte en sol minéral. Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation du Québec. Fascicule 01. Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation (2020 – 2023). Présenté au ministère de l’Agriculture, des Pêcheries et de l’Alimentation. 50 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 DU PROJET : Christine Landry, agr., biologiste, Ph. D.

RESPONSABLES DES PROGRAMMES D'ANALYSES : Anaïs Charles, Ph. D.
Michèle Grenier, M. Sc.
Alexandre Leblanc, biologiste, M. Sc.
Stéphanie Houde, agr., M. Sc.

RESPONSABLES DU RAPATRIEMENT DES DONNÉES : Lélia Anderson, agr., M. Sc. B. Ing.
Olivier Breton-Bourgault, agr.

ÉTABLISSEMENT DES VALEURS SCIENTIFIQUES DE RÉFÉRENCE EN FERTILISATION :
Christine Landry, agr., biologiste, Ph. D.
Claude-Alla Joseph, Ph. D.
Stéphanie Houde, agr., M. Sc.
Julie Forest-Drolet, M. Sc.
Anaïs Charles, Ph. D.
Mélicca Paradis, biologiste, M. Sc.

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

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

PARTENAIRES

 PARTENARIAT
CANADIEN pour
l'AGRICULTURE

 Canada Québec

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

MISE EN CONTEXTE

L'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) a reçu du MAPAQ le *Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation 2020-2023* (MIRVRF). Le 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). Le second volet du Mandat 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. Pour chaque culture, la détermination des classes de sol et de leurs VSRF s'est principalement appuyée sur les données des programmes PSIH, PSEFCM et PSEF, selon le cas. Cependant, plusieurs jeux de données ont pu être bonifiés, et incidemment la BD, grâce aux travaux d'autres équipes de recherche québécoises ou par le biais des nouveaux essais au champ du MIRVRF, lesquels visaient à bonifier les jeux de données dans certaines catégories de sol. Les VSRF déterminées par l'IRDA sont soumises au MAPAQ et entérinées par le Comité scientifique (CS), afin de produire les prochaines grilles de référence en fertilisation du Québec. Lors de ces travaux, certaines modifications peuvent 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 du 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 des essais de fertilisation du PSIH et du PSEFCM. 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.

TABLE DES MATIÈRES

1.	PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES ESSAIS ET DES ANALYSES.....	9
1.1	PROVENANCE DES DONNÉES	9
1.2	LOCALISATION DES SITES	9
1.3	PROPRIÉTÉS PHYSICO-CHIMIQUES DES SOLS.....	10
1.4	DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL ET TRAITEMENTS.....	12
1.4.1	ESSAIS N.....	13
1.4.2	ESSAIS P	13
1.4.3	ESSAIS K	14
1.5	RENDEMENTS COMMERCIALISABLES	14
1.6	ASPECTS ADDITIONNELS POUR L'INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS.....	16
1.6.1	VARIÉTÉS	16
1.6.2	PRÉCÉDENTS CULTURAUX	16
1.6.3	IRRIGATION	16
1.6.4	ÉVALUATION EN ENTREPÔT	16
1.7	ANALYSE EXPLORATOIRE.....	17
1.8	CALCULS ET ANALYSES STATISTIQUES.....	17
1.8.1	DÉTERMINATION DES CLASSES DE FERTILITÉ DES SOLS	18
1.8.2	DÉTERMINATION DES DOSES OPTIMALES DE FERTILISANTS	19
1.8.3	DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL ET QUANTITÉS D'ÉLÉMENTS NUTRITIFS EXPORTÉS	20
2.	FERTILISATION AZOTÉE	22
2.1	PORTRAIT ET REPRÉSENTATIVITÉ DES DONNÉES	22
2.2	DÉTERMINATION DES DOSES AGRONOMIQUES OPTIMALES	23
2.2.1	RECHERCHE D'INDICATEURS DE FERTILITÉ DU SOL.....	23
2.2.2	EFFET DE LA DOSE D'AZOTE SUR LE RENDEMENT COMMERCIALISABLE	24
2.3	DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL ET EXPORTATIONS EN AZOTE.....	26
2.4	NITRATE RÉSIDUEL À LA RÉCOLTE.....	27
2.5	FERTILISATION AZOTÉE PROPOSÉE ET COMPARAISON AVEC LES RECOMMANDATIONS AU CANADA ET À L'ÉTRANGER.....	29
3.	FERTILISATION PHOSPHATÉE.....	32
3.1	PORTRAIT ET REPRÉSENTATIVITÉ DES DONNÉES	32
3.2	DÉTERMINATION DES DOSES AGRONOMIQUES OPTIMALES	32
3.2.1	RECHERCHE D'INDICATEURS DE FERTILITÉ DU SOL.....	32
3.2.2	EFFET DE LA DOSE DE PHOSPHORE SUR LE RENDEMENT COMMERCIALISABLE	33
3.3	DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL ET EXPORTATIONS EN PHOSPHORE	34
3.4	FERTILISATION PHOSPHATÉE PROPOSÉE ET COMPARAISON AVEC LES RECOMMANDATIONS AU CANADA ET À L'ÉTRANGER.....	35
4.	FERTILISATION POTASSIQUE	37
4.1	PORTRAIT ET REPRÉSENTATIVITÉ DES DONNÉES	37
4.2	DÉTERMINATION DES DOSES AGRONOMIQUES OPTIMALES	37
4.2.1	RECHERCHE D'INDICATEURS DE FERTILITÉ DU SOL.....	37
4.2.2	EFFET DE LA DOSE DE POTASSIUM SUR LE RENDEMENT COMMERCIALISABLE.....	38
4.3	DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL ET EXPORTATIONS EN POTASSIUM.....	41
4.4	FERTILISATION POTASSIQUE PROPOSÉE ET COMPARAISON AVEC LES RECOMMANDATIONS AU CANADA ET À L'ÉTRANGER	42

5.	FERTILISATION DE LA CAROTTE EN SOL MINÉRAL – VALEURS SCIENTIFIQUES DE RÉFÉRENCE EN FERTILISATION	45
6.	CONCLUSION	46
	REMERCIEMENTS.....	46
7.	RÉFÉRENCES	47
	ANNEXE 1.....	50

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1. DESCRIPTION SOMMAIRE DES SITES DES ESSAIS DE FERTILISATION DE LA CAROTTE EN SOL MINÉRAL	11
TABLEAU 2. DESCRIPTION DES TRAITEMENTS DES ESSAIS DE FERTILISATION AZOTÉE	13
TABLEAU 3. DESCRIPTION DES TRAITEMENTS DES ESSAIS DE FERTILISATION PHOSPHATÉE	13
TABLEAU 4. DESCRIPTION DES TRAITEMENTS DES ESSAIS DE FERTILISATION POTASSIQUE	14
TABLEAU 5. BILAN DE LA VALIDATION DES DONNÉES À L'ISSUE DE L'ANALYSE EXPLORATOIRE	17
TABLEAU 6. RÉPARTITION DES BLOCS DES ESSAIS N SELON DIFFÉRENTES CLASSES DE PROPRIÉTÉS DE SOL APRÈS LA VALIDATION DES DONNÉES.....	22
TABLEAU 7. VALEURS CRITIQUES DES INDICATEURS POTENTIELS DE SOLS SIGNIFICATIFS SELON LES TESTS DE CATE-NELSON POUR LES ESSAIS N.....	23
TABLEAU 8. CONCENTRATIONS ET EXPORTATIONS D'AZOTE DE LA CAROTTE SELON LE DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL	27
TABLEAU 9. FERTILISATION AZOTÉE DE LA CAROTTE CULTIVÉE EN SOL MINÉRAL – VALEURS SCIENTIFIQUES DE RÉFÉRENCE EN FERTILISATION	30
TABLEAU 10. COMPARAISON DES RECOMMANDATIONS EN AZOTE POUR LA PRODUCTION DE CAROTTE EN SOL MINÉRAL AU CANADA ET À L'ÉTRANGER	30
TABLEAU 11. RÉPARTITION DES BLOCS DES ESSAIS P SELON DIFFÉRENTES CLASSES DE PROPRIÉTÉS DE SOL APRÈS VALIDATION DES DONNÉES	32
TABLEAU 12. VALEURS CRITIQUES DES INDICATEURS POTENTIELS DE SOLS SIGNIFICATIFS SELON LES TESTS DE CATE-NELSON POUR LES ESSAIS P	33
TABLEAU 13. CONCENTRATIONS ET EXPORTATIONS DE PHOSPHORE DE LA CAROTTE SELON LE DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL	34
TABLEAU 14. FERTILISATION PHOSPHATÉE DE LA CAROTTE CULTIVÉE EN SOL MINÉRAL – VALEURS SCIENTIFIQUES DE RÉFÉRENCE EN FERTILISATION	35
TABLEAU 15. COMPARAISON DES RECOMMANDATIONS EN P ₂ O ₅ POUR LA PRODUCTION DE CAROTTE EN SOL MINÉRAL AU CANADA ET À L'ÉTRANGER	36
TABLEAU 16. RÉPARTITION DES BLOCS DES ESSAIS K SELON DIFFÉRENTES CLASSES DE PROPRIÉTÉS DE SOL APRÈS LA VALIDATION DES DONNÉES	37
TABLEAU 17. VALEURS CRITIQUES DES INDICATEURS POTENTIELS DE SOLS SIGNIFICATIFS SELON LES TESTS DE CATE-NELSON POUR LES ESSAIS K	38
TABLEAU 18. CONCENTRATIONS ET EXPORTATIONS DE POTASSIUM DE LA CAROTTE SELON LE DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL.....	41
TABLEAU 19. FERTILISATION POTASSIQUE DE LA CAROTTE CULTIVÉE EN SOL MINÉRAL – VALEURS SCIENTIFIQUES DE RÉFÉRENCE EN FERTILISATION..	43
TABLEAU 20. COMPARAISON DES RECOMMANDATIONS EN K ₂ O POUR LA PRODUCTION DE CAROTTE EN SOL MINÉRAL AU CANADA ET À L'ÉTRANGER	44

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1. RÉPARTITION GÉOGRAPHIQUE APPROXIMATIVE DES SITES DES ESSAIS DE LA CAROTTE.	9
FIGURE 2. DISTRIBUTION DES BLOCS DES ESSAIS CAROTTE DANS LE TRIANGLE DES TEXTURES.	12
FIGURE 3. RENDEMENTS COMMERCIALISABLES SELON L'ÉLÉMENT TESTÉ, LES SITES ET LES DOSES CROISSANTES D'ENGRAIS.....	15
FIGURE 4. DÉFINITIONS DES QUADRANTS D'UN TEST DE PARTITION BINAIRE DE CATE-NELSON (1979).....	19
FIGURE 5. RÉSULTATS DES ANALYSES DE VARIANCE SUR LA RÉPONSE DE LA CULTURE AUX DOSES CROISSANTES D'AZOTE.	25
FIGURE 6. EXPORTATIONS D'AZOTE EN FONCTION DES RENDEMENTS DE LA CAROTTE, EXPRIMÉS SELON LES VARIÉTÉS (A) ET SELON LE DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL (B).	27
FIGURE 7. NITRATE RÉSIDUEL (N-NO ₃) À LA RÉCOLTE DANS LES COUCHES DE SOL 0-30 CM (A) ET 30-60 CM (B) EN FONCTION DES DOSES D'AZOTE ET DES GROUPES DE TEXTURES POUR LA CAROTTE.	28
FIGURE 8. RÉSULTATS DES ANALYSES DE VARIANCE SUR LA RÉPONSE DE LA CULTURE AUX DOSES CROISSANTES DE PHOSPHORE.....	33
FIGURE 9. EXPORTATIONS DE PHOSPHORE EN FONCTION DES RENDEMENTS DE LA CAROTTE, EXPRIMÉS SELON LES VARIÉTÉS (A) ET SELON LE DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL (B).	34
FIGURE 10. RÉSULTATS DES ANALYSES DE VARIANCE SUR LA RÉPONSE DE LA CULTURE AUX DOSES CROISSANTES DE POTASSIUM.	40
FIGURE 11. EXPORTATIONS DE POTASSIUM EN FONCTION DES RENDEMENTS DE LA CAROTTE, EXPRIMÉS SELON LES VARIÉTÉS (A) ET SELON LE DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL (B).	41

1. PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES ESSAIS ET DES ANALYSES

1.1 Provenance des données

Dans le cadre du MIRVRF, les valeurs scientifiques de référence en fertilisation (VSRF) de la carotte ont été calculées exclusivement à partir des données des essais de fertilisation du PSIH (2004-2008) et du PSEFCM (2008-2012). Une recherche de données supplémentaires a été menée auprès d'autres équipes de recherche québécoises et dans la littérature scientifique afin de bonifier le jeu de données et de valoriser de potentiels essais de fertilisation antérieurs, mais aucune n'a été retrouvée.

1.2 Localisation des sites

Les 16 essais expérimentaux (PSEFCM et PSIH) ont été réalisés entre 2005 et 2010 dans les régions administratives de Lanaudière, de la Capitale-Nationale et du Saguenay–Lac-Saint-Jean (Figure 1 ; Tableau 1). Plusieurs essais menés dans le cadre du PSIH dataient de plus de 15 ans (en 2005 et 2006), ainsi certaines informations n'ont pas pu être retracées. Conséquemment, seulement 30 % des coordonnées GPS sont disponibles pour ces essais, ce qui ne permet pas de statuer sur la représentativité des unités pédologiques (Figure 1).

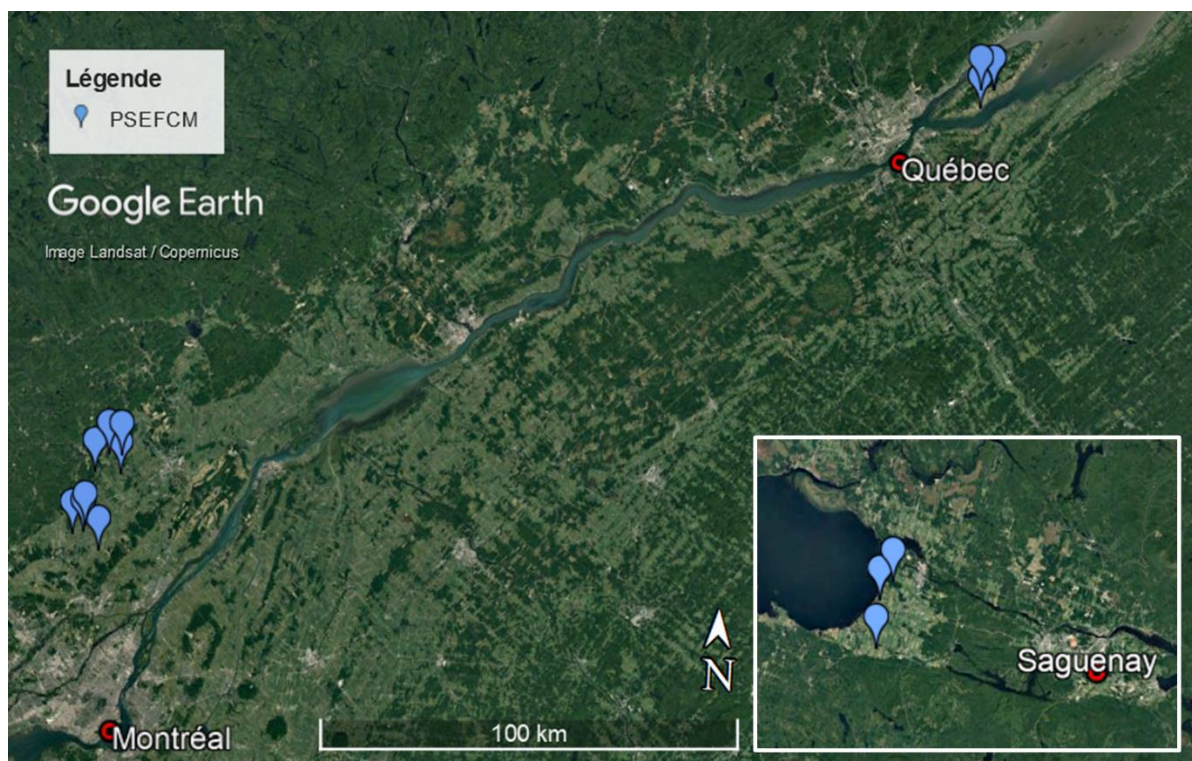


Figure 1. Répartition géographique approximative des sites des essais de la carotte. L'emplacement des repères est approximatif et vise seulement à représenter la répartition géographique des sites sur le territoire du Québec.

1.3 Propriétés physico-chimiques des sols

La description sommaire des sites est présentée au Tableau 1. Une analyse plus spécifique de certaines propriétés de sols jugées importantes dans l'établissement des VSRF est également présentée par essai dans les sections correspondantes. Globalement, 25 % des sols avaient un pH_{eau} proche de la valeur optimale de 6,3 recommandée pour cette culture (CRAAQ, 2010). Les autres sites avaient des pH_{eau} majoritairement neutres (69 %) ou faiblement alcalins (6 %). Les analyses de matière organique (MO) du sol étaient disponibles pour seulement la moitié des sites et variaient de 3,1 à 8,6 % (Tableau 1). Les concentrations en P et en K extraits par Mehlich-3 (respectivement P_{M3} et K_{M3}) variaient respectivement de 67 à 1 170 kg P_{M3} /ha et de 206 à 1 245 kg K_{M3} /ha (Tableau 1). Seulement quatre sites sur 16 avaient une teneur en P_{M3} inférieure à 200 kg P_{M3} /ha (sites faibles ; Tableau 1), lesquels sont plus susceptibles de répondre aux apports de P, ce qui n'est pas optimal pour la réalisation d'une grille complète devant comporter des VSRF pour des classes de sols peu pourvus en P. Il aurait donc été souhaitable de disposer d'une plus grande proportion de sites ayant un plus grand potentiel de réponse à la fertilisation phosphatée. Quant aux essais K, 67 % des sites avaient une teneur en K_{M3} inférieure à 400 kg/ha, ce qui est adéquat pour tester la réponse à la fertilisation. Les différentes textures de sol étaient bien représentées pour tous les éléments nutritifs étudiés (Figure 2).

Tableau 1. Description sommaire des sites des essais de fertilisation de la carotte en sol minéral

No. Site	Série de sol, texture ¹	Essais NPK					Essais N		Essais P			Essais K	
		Date de semis	Date de récolte	Lat.	Long.	Argile %	MO ² Moy. %	Rendement Commercialisable ³ Moy. kg/ha	Teneur en P du sol ³ P _{M3} kg/ha	Rendement Commercialisable ⁴ Moy. kg/ha	Teneur en K du sol ³ K _{M3} kg/ha	Rendement Commercialisable ⁴ Moy. kg/ha	
1	nd	16/05	02/10	nd	nd	17	4,9	85 206	285	84 494	364	83 884	
2	nd	16/05	02/10	nd	nd	16	8,2	86 120	98	85 871	1 245	85 998	
3	nd	28/05	10/10	nd	nd	41	8,6	77 791	67	77 081	206	74 689	
4	nd	nd	nd	nd	nd	38	4,4	54 570	105	55 318	210	54 398	
5	Sainte-Rosalie, LSA	26/05	06/10	45,86	-73,72	26	6,2	38 327	339	37 571	280	37 231	
6	nd	11/06	29/10	nd	nd	9	3,1	56 588	542	55 060	309	54 335	
7	Joliette, S	27/05	17/10	46,01	-73,59	6	3,3	45 648	346	43 939	269	48 545	
8	Achigan, S à LS	31/05	27/10	46,01	-73,59	5	2,5	56 824	1170	49 582	557	48 882	
9	Achigan, S à LS	29/05	17/10	46,00	-73,58	7	3,9	28 175	295	29 212	222	28 597	
10	nd	12/05	19/09	nd	nd	18	4,8	41 012	280	41 198	815	43 337	
11	Sainte-Rosalie, A à LA	27/05	14/10	45,88	-73,68	34	4,2	59 711	125	59 215	254	58 731	
12	nd	07/06	27/09	nd	nd	23	4,3	28 975	255	31 845	503	37 030	
13	nd	nd	nd	nd	nd	21	3,7	48 097	366	47 435	397	49 159	
14	nd	20/05	13/10	nd	nd	38	4,6	89 924	341	95 205	380	95 515	
15	nd	19/05	21/10	nd	nd	27	5,2	66 195	391	56 984	400	61 585	
16	nd	13/05	09/10	nd	nd	18	4,2	41 219	304	43 334	442	42 576	
Tous les sites						22	4,8	56 524	332	55 834	428	56 531	

¹ Information théorique tirée de la banque des sols de l'IRDA/MAPAQ (1945-2005).

² MO : matière organique analysée par perte au feu ; A : argile ; LA : loam argileux ; LS : loam sableux ; LSA : loam sableux argileux ; S : sable ; nd : non disponible.

³ En sol minéral, les seuils de richesse en P_{M3} et en K_{M3} préétablis au protocole étaient respectivement de 200 kg P_{M3}/ha et de 400 kg K_{M3}/ha.

⁴ Le rendement commercialisable de la carotte de 2005 à 2010 au Québec était de 29 700 à 37 800 kg/ha (Statistique Canada, 2020).

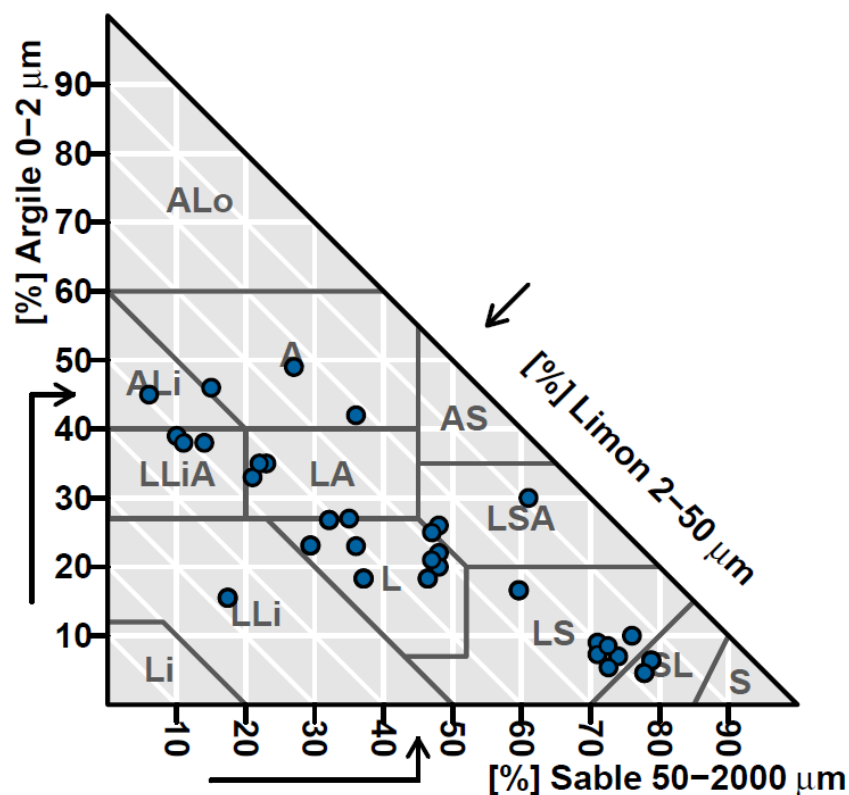


Figure 2. Distribution des blocs des essais carotte dans le triangle des textures. ALo : Argile lourde ; ALi : Argile limoneuse ; A : Argile ; LLiA : Loam limono-argileux ; LA : Loam argileux ; AS : Argile sableuse ; L : Loam ; LLi : Loam limoneux ; LSA : Loam sablo-argileux ; LS : Loam sableux ; SL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

1.4 Dispositif expérimental et traitements

La réponse de la carotte aux apports d'engrais N, P et K a été testée en plein champ par des essais de fertilisation réalisés chez des producteurs agricoles. Les divers traitements testés (doses d'engrais) étaient disposés selon un plan en tiroirs (*split-plot*) comportant trois blocs complètement aléatoires (trois répétitions). Chaque bloc du dispositif était constitué de trois parcelles principales représentant chacune un élément nutritif à l'essai (N, P et K), à l'intérieur desquelles se trouvaient quatre sous-parcelles où les doses de N (T1 à T4), de P (T5 à T8) et de K (T9 à T12) étaient testées. Les semis ont eu lieu du 11 mai au 7 juin et la durée moyenne des essais a été de 141 jours.

Hormis pour le N, les traitements ont été choisis en fonction de la fertilité du sol pour l'élément testé (section 1.3). Des doses plus élevées de P_2O_5 et de K_2O ont été testées dans les sols dits à « faibles teneurs ». Ces doses ont été modifiées dans les protocoles au fil des années (tableaux 2, 3 et 4). Toutefois, l'analyse des sols étant réalisée *a posteriori* de l'implantation des essais, 25 % des sites d'essais P et 37,5 % des sites d'essais K ont été mal classés de part et d'autre des seuils présumés de non-réponse de la culture (200 kg P_{M3} /ha, 400 kg K_{M3} /ha). Les sites mal classés n'ont pas reçu les doses de fertilisants prévues au protocole (ex. : doses élevées appliquées par erreur sur un site très bien pourvu en P ou en K). Ceci pourrait faire en sorte que la

réponse de la culture à la fertilisation ne puisse 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 éléments complémentaires étaient fixés au troisième niveau de traitement de chaque élément afin qu'ils ne soient pas limitants (ex. : doses constantes de P₂O₅ et de K₂O dans les essais N, correspondant aux doses T7 et T11 de P et K, respectivement ; Tableau 3, Tableau 4).

1.4.1 Essais N

Les doses de N testées sont présentées au Tableau 2. Les modifications des traitements du PSIH et du PSEFCM survenues au fil des ans concernent principalement le fractionnement des doses et le mode d'apport des engrais. D'une part, l'application du N à la volée a été remplacée par une application en bande à partir de 2008. D'autre part, la répartition du fractionnement du T2 a été révisée afin d'apporter 10 kg N/ha supplémentaires au stade 6-10 feuilles (Tableau 2).

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
2005-2006	8	À la volée avant semis	0	35	70	105
		En bande au stade 6-10 feuilles	0	15	30	45
		Apport total	0	50	100	150
2008-2010	8	En bande au semis	0	25	70	105
		En bande au stade 6-10 feuilles	0	25	30	45
		Apport total	0	50	100	150

1.4.2 Essais P

Les doses de P₂O₅ testées dans les essais P sont présentées au Tableau 3. Pour tous les essais P, la dose prévue était appliquée en totalité à la volée avant le semis, sans fractionnement. Pour les sites ayant une teneur élevée en P, les doses ont été modifiées à la baisse à partir de 2008 (Tableau 3).

Tableau 3. Description des traitements des essais de fertilisation phosphatée

Essais P				Dose de P ₂ O (kg/ha)			
Années	Nombre de sites	Teneur en P du sol	Mode et période d'application	T5	T6	T7	T8
2005-2006	1	≤ 200 kg P _{M3} /ha	À la volée avant semis (apport total)	0	60	120	180
	7	> 200 kg P _{M3} /ha	À la volée avant semis (apport total)	0	40	80	120
2008-2010	3	≤ 200 kg P _{M3} /ha	À la volée avant semis (apport total)	0	60	120	180
	5	> 200 kg P _{M3} /ha	À la volée avant semis (apport total)	0	30	60	90

1.4.3 Essais K

Les doses de K₂O testées dans les essais K sont présentées au Tableau 4. Les traitements ont varié considérablement au fil des ans, tant pour les doses que pour le mode et la période d'application. En 2005, 2006 et 2008, les doses ont été apportées en entier à la volée avant le semis. À partir de 2009, les doses ont été fractionnées en trois apports : à la volée avant le semis, en bande au semis et en bande au stade 6-10 feuilles. À partir de 2006, les doses de K₂O ont été révisées à la hausse (Tableau 4).

Tableau 4. Description des traitements des essais de fertilisation potassique

Essais K				Dose de K ₂ O (kg/ha)			
Années	Nombre de sites	Teneur en K du sol	Mode et période d'application	T9	T10	T11	T12
2005	1	≤ 400 kg K _{M3} /ha	À la volée avant semis (apport total)	0	75	150	225
	2	> 400 kg K _{M3} /ha	À la volée avant semis (apport total)	0	40	80	120
2006-2008	2	≤ 400 kg K _{M3} /ha	À la volée avant semis (apport total)	0	100	200	300
	6	> 400 kg K _{M3} /ha	À la volée avant semis (apport total)	0	50	100	150
2009-2010	4	≤ 400 kg K _{M3} /ha	À la volée avant le semis	0	0	100	200
			En bande au semis	0	40	40	40
			En bande au stade 6-10 feuilles	0	60	60	60
			Apport total	0	100	200	300
	1	> 400 kg K _{M3} /ha	À la volée avant le semis	0	0	0	50
			En bande au semis	0	40	40	40
			En bande au stade 6-10 feuilles	0	10	60	60
Apport total	0	50	100	150			

1.5 Rendements commercialisables

Les rendements commercialisables mesurés dans les 16 essais sont présentés à la Figure 3. Les rendements obtenus sont similaires ou supérieurs aux rendements moyens de référence du Québec pour la période visée pour 14 sites sur 16 (Figure 3). En fait, les rendements des essais peuvent être jusqu'à deux fois plus élevés que les rendements moyens de référence, qui varient de 29 700 à 37 800 kg/ha au Québec pour la période de 2005 à 2010 (Statistique Canada, 2020). L'analyse des résultats suggère que l'obtention de hauts rendements serait attribuable à un effet de variété, soit la variété Sun 255 qui a produit des rendements pouvant atteindre les 100 000 kg/ha (Figure 3). Les pertes de récolte, i.e. la différence entre les rendements totaux et les rendements commercialisables, ont été en moyenne de 20 %. Des variations interannuelles considérables ont été observées avec de plus fortes pertes enregistrées en 2006 et de plus faibles pertes en 2005 et 2008 (données non présentées). Ces pourcentages de perte sont en général plus élevés que ceux enregistrés par les producteurs du Québec entre 2005 et 2010, qui variaient entre 4 % (2006, 2010) et 12 % (2005) du rendement total (Statistique Canada, 2020). De plus, contrairement aux présents essais, les plus faibles pertes sont enregistrées pour les années 2006 au niveau provincial. Cette différence pourrait s'expliquer, entre autres, par des critères de tri plus sévères en contexte de recherche qu'en contexte de production à grande échelle. D'ailleurs, les rendements

annuels de référence sont basés sur des rendements déclarés pour des champs complets, tandis que pour les essais, les rendements sont mesurés sur de courtes sections de rangs, et sont par la suite convertis à l'hectare. Enfin, en contexte de production commerciale, toute la superficie cultivée reçoit généralement un apport en fertilisant (N, P et K) jugé non limitant pour une bonne croissance et une bonne productivité de la culture. Dans les dispositifs de recherche, des parcelles sans fertilisant ou sous-fertilisées sont présentes.

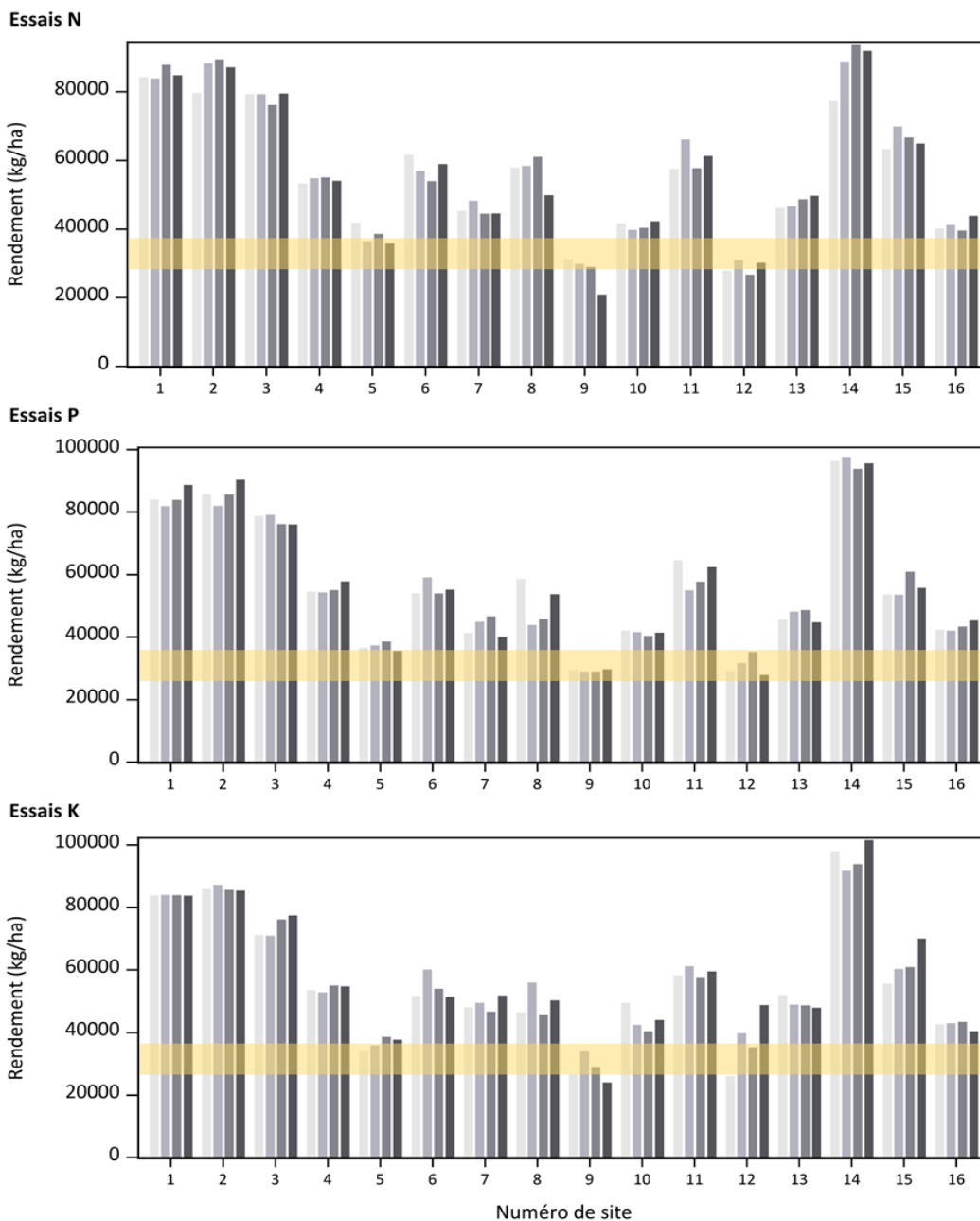


Figure 3. Rendements commercialisables selon l'élément testé, les sites et les doses croissantes d'engrais. Consulter les tableaux 2, 3 et 4 pour connaître les doses testées. La bande jaune illustre l'intervalle de rendements de référence pour la période des essais (Statistique Canada, 2020).

1.6 Aspects additionnels pour l'interprétation des résultats

1.6.1 Variétés

Au moins six variétés de carotte ont été cultivées à travers les 16 sites d'essai : Sun 255 (54 % des sites), Entreprise (13 %), Sugarsnax (9 %), Bergen (8 %), Magno (5 %) et Sunrise (5 %). L'information sur la variété est manquante dans 5 % des cas. L'analyse exploratoire des données montre que la performance de la culture varie grandement en fonction de la variété. Ainsi, la présence de la variété Sun 255 à plus de 50 % des sites a une influence sur les résultats obtenus.

1.6.2 Précédents culturaux

Les données sur les précédents culturaux sont manquantes à 40 % des sites. De plus, les précédents culturaux répertoriés ne sont généralement pas répétés à plusieurs sites. Par conséquent, il est impossible de tirer des conclusions fiables sur les précédents culturaux, car l'effet peut être confondu avec un effet de site. L'analyse globale des précédents culturaux a révélé beaucoup d'hétérogénéité entre les sites. Les essais ont été réalisés sur des retours d'avoine, de betterave, de brocoli, de chou, de maïs-grain et de courgette.

1.6.3 Irrigation

Les informations concernant l'irrigation sont manquantes à 35 % des sites. Des sites où l'information est disponible, deux ont été irrigués et huit ne l'ont pas été. Comme la carotte s'enracine relativement profondément (30-60 cm), ses besoins en irrigation sont moindres comparativement aux légumes avec des enracinements superficiels (MAAARO, 2010). La période d'élargissement de la racine est une période critique pour les besoins en eau (University of Massachusetts Amherst, 2018) et un stress durant cette période peut affecter grandement les rendements. Comme les rendements obtenus pour tous les sites sont semblables ou supérieurs aux rendements de référence, il est probable que les plants n'aient pas subi de stress hydrique.

1.6.4 Évaluation en entrepôt

Les données sur l'entreposage sont complètes pour seulement 38 % des sites. Ces données sont manquantes pour 31 % des sites et incomplètes pour 25 % des sites. Ainsi, il n'a pas été possible de faire des analyses statistiques sur cet aspect et de tirer des conclusions sur l'effet de la fertilisation sur l'incidence des maladies survenues à l'entreposage de la carotte ni sur les pertes d'humidité. Des demandes ont été faites auprès des collaborateurs de l'époque, mais aucune information supplémentaire n'a été retrouvée. L'accès à ces données aurait permis de valider cet aspect particulièrement d'intérêt pour les fertilisations en N et en K. Toutefois, selon la littérature (Bundinienè *et al.*, 2014 ; Westerveld *et al.*, 2006a ; Biegon, 1995), les fertilisations en N, P et K n'auraient pas d'effet significatif sur les pertes survenant à l'entreposage de la carotte. Ces pertes seraient davantage liées aux conditions d'entreposage non optimales, notamment une faible humidité relative de l'air et des dommages aux racines au moment de la récolte (Biegon, 1995).

1.7 Analyse exploratoire

Avant de procéder aux calculs, une analyse exploratoire est minutieusement réalisée sur l'ensemble du jeu de données. Cette étape permet 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. Pour ce faire, les courbes de rendements par bloc et la relation entre les rendements et la position spatiale des parcelles sont vérifiées pour chacun des sites. La relation entre les rendements et la densité de population des parcelles, ainsi que les photos et les commentaires notés par les équipes de réalisation et de coordination des essais sont également considérés en vue d'éviter l'utilisation de données erronées ou comportant des biais expérimentaux.

Dans le cadre de cette procédure, les statistiques descriptives sur les rendements et la densité de la population sont analysées, notamment les coefficients de variation associés aux données de chacun des sites. Par la suite, une attention plus particulière est portée sur les sites présentant une variation de rendements et de densité supérieure à 30 % et à 15 %, respectivement. Pour terminer, une régression robuste est aussi effectuée pour la détection de données aberrantes en utilisant la procédure *robustreg* et la méthode de l'estimation MM de SAS (Anderson et Schumaker, 2013 ; SAS Institute Inc. 2018).

Le bilan de la validation des données est présenté au Tableau 5. Parmi les 16 sites des essais, un seul est exclu après l'analyse exploratoire des données. L'exclusion de ce site s'explique par le mauvais blocage entraînant un patron spatial aligné sur la droite du dispositif démontrant des rendements beaucoup plus faibles que sur le reste du site, ainsi que par une grande variation au niveau de la densité de plantation. À l'issue de l'analyse exploratoire, environ 95 % des données sont validées et conservées pour les analyses statistiques et l'établissement des VSRF. La liste des données exclues lors de la validation des données est disponible en annexe.

Tableau 5. Bilan de la validation des données à l'issue de l'analyse exploratoire

Essai	Jeu de données initial		Données exclues		Jeu de données final	
	Sites	Données	Sites	Données	Sites	Données
N	16	192	1	12	15	180
P	16	192	1	12	15	180
K	16	192	1	12	15	180

1.8 Calculs et analyses statistiques

La méthodologie employée pour le calcul des VSRF et les analyses statistiques préconisées sont similaires pour toutes les cultures traitées dans le MIRVRF. Les détails des calculs sont présentés dans le document synthèse de cette série (Landry *et al.* 2023, en cours de rédaction). Lorsque des ajustements spécifiques à une culture ont été requis, ceux-ci sont décrits directement dans le fascicule de la culture concernée. 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 s'assurer que les recommandations tenaient compte des pratiques culturales en vigueur et des contraintes propres à la culture.

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. 1). Dans le cas où une unité expérimentale est écartée à l'analyse exploratoire, le rendement maximal du bloc concerné est considéré impossible à déterminer et aucun RRel n'est déterminé.

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

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

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

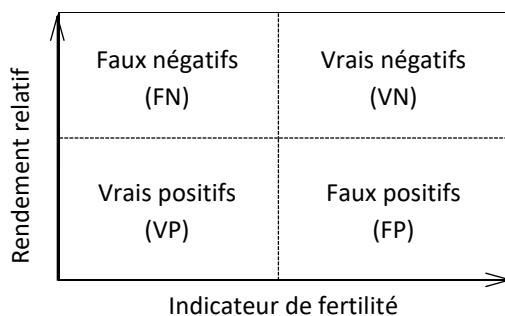


Figure 4. Définitions des quadrants d'un test de partition binaire de Cate-Nelson (1979).

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

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

Ainsi, le ROM est le rapport de rendement, le $Rendement_{Témoin}$ est le rendement commercialisable des parcelles témoins sans apport de l'élément testé (ex. N) et le $Rendement_{Fertilisé}$ est le rendement commercialisable des

parcelles ayant reçu les diverses doses de l'élément testé (ex. N), en plus des éléments complémentaires aux doses recommandées (ex. : P et K).

L'ANOVA est effectuée en utilisant la procédure *mixed* de SAS® (SAS Institute Inc., 2013) et en considérant les blocs 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. Ces tests permettent 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 confiances à 90 % permet de déterminer si l'augmentation de rendement obtenue pour un traitement donné est numériquement significative en comparaison au témoin.

Puisque les doses testées dans les divers essais varient (voir section 1.4), les doses similaires ont dû être regroupées afin d'équilibrer les jeux de données et d'augmenter la puissance de l'ANOVA. Ainsi, les groupes de doses ont été considérés comme des variables catégoriques plutôt que numériques continues dans le modèle statistique. Les groupes de doses sont exprimés sous cette forme dans le présent document : 1-30-40. Dans ce cas, par exemple, il s'agit du 1^{er} groupe de doses testées (1-30-40) et les doses qui le composent vont de 30 à 40 kg/ha de l'élément testé (1-30-40). 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 la biomasse qui quitte le champ à la récolte (feuilles, tiges, fruits, racines, etc.). Comme les présents essais portaient sur la carotte de type cello, les exportations ont été calculées sur les carottes (racines) seules, le feuillage demeurant au champ. Les rendements totaux ont été considérés (plutôt que commercialisables), car le triage des carottes se fait 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 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 pour certains éléments (prélèvement de luxe), 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.* (2001a) et Parent *et al.* (2009). Selon le CND, la composition des tissus de la plante constitue un simplexe complet Sⁿ, de dimension n+1, soit un nombre d'éléments nutritifs *n* additionné d'une valeur de remplissage (Khiari *et al.*, 2001a). 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 (Parent et Dafir, 1992 ; Khiari *et al.*, 2001 b). 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 (i.e. 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.

2. FERTILISATION AZOTÉE

2.1 Portrait et représentativité des données

La répartition des blocs des sites selon les différentes classes de fertilité de sol est présentée au Tableau 6. Étant donné que les essais se sont étalés sur plusieurs années, les protocoles d'échantillonnage et de conditionnement des échantillons ont évolué considérablement au fil du temps, ainsi que les méthodes d'analyse et de dosage du nitrate. Par conséquent, les résultats obtenus par les différentes méthodes peuvent différer (Khiari *et al.*, 2017 ; Chelabi *et al.*, 2016). Tel que mentionné à la section 1.3, les pH_{eau} des sols (0-20 cm) sont majoritairement neutres (pH de 6,6-7,3 ; 67 % des blocs). Bien que plus élevé que le pH de 6,3 visé pour la culture de carotte par le CRAAQ (2010), la disponibilité de l'azote reste optimale à l'intérieur de cet intervalle (Brady, 1990). Hormis l'apport de N par la fertilisation, le nitrate déjà présent dans le sol et celui provenant de la décomposition de la MO sont les deux principales sources qui auraient pu influencer la nutrition azotée de la carotte, rendant ces deux paramètres primordiaux dans le cadre des essais N. La concentration en MO est supérieure à 4 % pour la totalité des sols G1. Dans les sols G2-G3, toutefois, plus de la moitié des blocs ont eu moins que 4 % de MO. Une telle répartition des blocs entre les sols G1 et G2-G3 est normale et cohérente à ce qui est rapporté dans la littérature. Par exemple, selon N'Dayegamiye *et al.* (2007), les sols G1 auraient en général une plus grande réserve en matière organique en comparaison aux sols G2-G3. Concernant la teneur en nitrate au semis des sols, les analyses de sols sont manquantes pour 30 % des blocs. Les données disponibles montrent que 15 % des blocs ont moins de 10 ppm de nitrate, que 30 % ont entre 10 et 20 ppm et que 15 % ont plus de 20 ppm.

Tableau 6. Répartition des blocs des essais N selon différentes classes de propriétés de sol après la validation des données

pH_{eau}		Matière organique (%)			Nitrate au semis (ppm)		Groupe de textures ²		Argile (%)	
Seuil ¹	Blocs (%)	G1		G2-G3	0-30 cm		Blocs (%)	Seuil	Blocs (%)	
		Seuil	Blocs (%)		Seuil	Blocs (%)				
≤ 5,6	0	< 3	0	13	0 – 5	2	G1	24,5	≤ 30	81
5,7 – 6,0	2	3 – 4	0	38	5 – 10	13	G2	43,0	> 30	19
6,1 – 6,5	27	4 – 5	44	23	10 – 20	30	G3	32,5	-	-
6,6 – 7,3	67	5 – 6	11	15	20 – 30	18	-	-	-	-
> 7,4	4	> 6	45	11	> 30	7	-	-	-	-
-	-	-	-	-	Nd ³	30	-	-	-	-

¹ Cescas (1978), cité par le Guide de référence en fertilisation (CRAAQ 2010).

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

³ nd : non disponible.

2.2 Détermination des doses agronomiques optimales

2.2.1 Recherche d'indicateurs de fertilité du sol

Plusieurs propriétés de sol ayant un lien avec la nutrition azotée des cultures ont été testées comme indicateurs potentiels pouvant expliquer la réponse à la fertilisation, avec le test de Cate et Nelson (1971), soit : la teneur en nitrate (N-NO₃) au semis (0-30 cm et 30-60 cm), en MO, en argile, de même que les rapports logarithmiques isométriques et centrés calculés en fonction des teneurs en argile, limon et sable des sols (ILR_[A|L], ILR_[AL|S], CLR_[A|L], CLR_[AL|S], etc.). Lorsque possible, ces indicateurs ont été également testés à l'intérieur des groupes de textures de sols G1, G2 et G3. Pour alléger la présentation des résultats, seuls les tests dont la valeur de *P* est inférieure à 0,12 sont présentés (Tableau 7). Les modèles ont été sélectionnés afin de maximiser leur sensibilité, leur spécificité et leur précision, en plus de présenter un RRel supérieur à 70 %. Les valeurs critiques seront utilisées subséquemment pour les analyses de variance en tant que seuils agronomiques de réponse. Plusieurs indicateurs potentiels ont été identifiés pour la détermination des classes de fertilité du sol (Tableau 7). La teneur en nitrate du sol mesurée au semis (0-30 cm) a été l'indicateur le plus significatif. La teneur en argile du sol et les transformations logarithmiques centrées pourraient également servir d'indicateurs pour l'élaboration de grilles. Toutefois, l'argile n'est pas une variable couramment associée à la gestion du N et les transformations logarithmiques centrées ne sont pas simples d'utilisation et sont peu connues. Quant à la MO, le seuil est significatif dans les sols plus légers (G3), tandis que seule une tendance a été observée pour les autres groupes de textures.

Tableau 7. Valeurs critiques des indicateurs potentiels de sols significatifs selon les tests de Cate-Nelson pour les essais N

Indicateur de sol	Groupes de textures ¹	Valeur critique	RRel ² (%)	Sensitivité	Spécificité	<i>P</i> ³
Argile		7,2 %	81	0,89	0,44	0,039*
C-ilor2 (Sable Limon, Argile)		1,5	81	0,44	0,92	0,022*
C-ilor3 (Limon Argile)		0,9	81	0,44	0,92	0,022*
MO _{WB} ⁴	G1-G2-G3	3,2 %	83	0,72	0,71	0,073 ^t
	G1-G2	3,2 %	79	0,91	0,67	0,061 ^t
	G3	2,0 %	85	1,00	0,67	0,045*
N-NO ₃ au semis, 0-30 cm	G1-G2-G3	9,6 ppm	81	0,90	0,56	0,009**
	G1-G2	9,6 ppm	81	1,00	0,40	0,028*
	G2-G3	9,7 ppm	83	0,86	0,623	0,016*
N-NO ₃ au semis, 30-60 cm	G1-G2-G3	5,7 ppm	81	0,83	0,56	0,032*
	G1-G2	5,2 ppm	79	0,96	0,75	0,005**
	G2-G3	5,5 ppm	83	0,86	0,623	0,016*

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

² RRel : Rendement relatif (100 × rendement du témoin/rendement maximum par bloc).

³ ** significatif à *P* < 0,01 ; * significatif à *P* < 0,05 ; t : tendance à *P* < 0,12.

⁴ MO_{WB}, matière organique dosée par la méthode Walkley-Black.

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

Les résultats des analyses de variance (ANOVA) de l'essai N de la carotte sont présentés à la Figure 5. Les ROM se situant à droite de la ligne bleue ($ROM > 1$) 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, un test de comparaisons multiples des moyennes permet 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 l'augmentation de rendement obtenue pour un traitement donné est numériquement significative en comparaison au témoin. Les ANOVA effectuées sur les ROM de part et d'autre des seuils des indicateurs retenus à la section 2.2.1 révèlent que l'apport de N n'a eu qu'un très faible effet sur la variation des rendements moyens commercialisables (Rdt). La potentialité des teneurs en MO et en $N-NO_3$ (0-30 cm) du sol comme indicateurs de fertilité du sol a été considérée (données non présentées). Cependant, l'analyse de l'effet de la dose sur le ROM en fonction des seuils de MO et de $N-NO_3$ retenus n'a pas permis d'observer une différence significative entre les doses de N testées. En effet, aucun des modèles testés n'a révélé une différence significative entre les doses testées sur le ROM. Les interactions entre les doses de N et les indicateurs de fertilité des sols ont également été non significatives. Ces résultats concordent avec ceux de Herman *et al.* (1975) au Québec et de Westerveld (2005) en Ontario, qui n'ont observé aucun effet de la fertilisation azotée sur le rendement de la carotte. Selon les résultats des recherches menées par Westerveld (2005), l'apport supplémentaire de N serait plus requis pour assurer une bonne qualité du feuillage au lieu de l'augmentation des rendements. Selon Petiola (1995), la non-réponse de la carotte à la fertilisation azotée est, entre autres, attribuable au fait que cette culture possède un système racinaire très profond avec une surface spécifique racinaire élevée, lui permettant de puiser ses éléments nutritifs sur une grande profondeur de sol. En considérant le modèle sans indicateur (Figure 5A), l'application de la plus petite dose testée de 50 kg N/ha serait suffisante, puisque l'application de doses croissantes de N n'a entraîné aucun gain de rendement par rapport au témoin sans engrais (ROM de 1,02-1,03). De plus, dans le but de mieux étudier les effets de la fertilisation en N sur le rendement, un ANOVA a été réalisé pour chacun des sites séparément. Les résultats de ces analyses montrent que seulement 3 des 15 sites validés ont eu une réponse significative (site 14) ou une tendance de réponse (sites 2 et 15) à l'apport de N, avec tous une dose agronomique optimale de 50 kg N/ha. Cela vient confirmer l'observation qu'une dose de 50 kg N/ha suffirait pour l'obtention du rendement optimal de la carotte cultivée en sol minéral. Il est important de souligner que dans le cadre des essais de fertilisation, l'azote au semis a été apporté en bande (7 essais) ou à la volée (8 essais). Quant à l'apport d'azote en post-levée, il a été effectué en bande pour la totalité des essais. Ainsi, une considération sur les modes d'apports des engrais s'avère nécessaire, afin de tenir compte des pratiques de fertilisations ayant cours en contexte de production, soit l'apport à la volée. Cette différence de mode d'apport pourrait, dans une certaine mesure, influencer l'efficacité d'utilisation des engrais et ainsi les quantités optimales.

Concernant l'effet de la texture du sol sur les rendements de la culture, il est intéressant de constater que les rendements de la culture dans les sols du groupe de textures G1, bien que plus variables, sont nettement plus élevés que dans les sols des groupes de textures G2 et G3. Les ROM sont également plus élevées pour ces types de sols (Figure 5B). Toutefois, les différences n'ont pas été statistiquement significatives entre les groupes de

textures. Par ailleurs, il peut s'agir simplement d'un effet de cultivar, car seule la variété Sun 255 a été cultivée sur les sols G1 dans les essais N, et cette dernière s'est aussi montrée très performante dans les essais P et K. Les plus hauts rendements observés dans les traitements témoin des sols G1, en comparaison aux sols G2-G3, appuient l'idée que cette différence ne résulterait pas d'un effet des traitements. Cela pourrait également s'expliquer par le fait que les sols du groupe de textures G1 ont en général un niveau de fertilité plus élevé que ceux des groupes G2 et G3. Cette tendance à avoir des rendements plus élevés dans les sols argileux a été confirmée par les intervenants du domaine, consultés dans le cadre du calcul des VRSF. Il faut également souligner que seulement quatre des 15 sites d'essai sont du groupe de textures G1 et que les moyennes ont été calculées sur de faibles nombres d'observations.

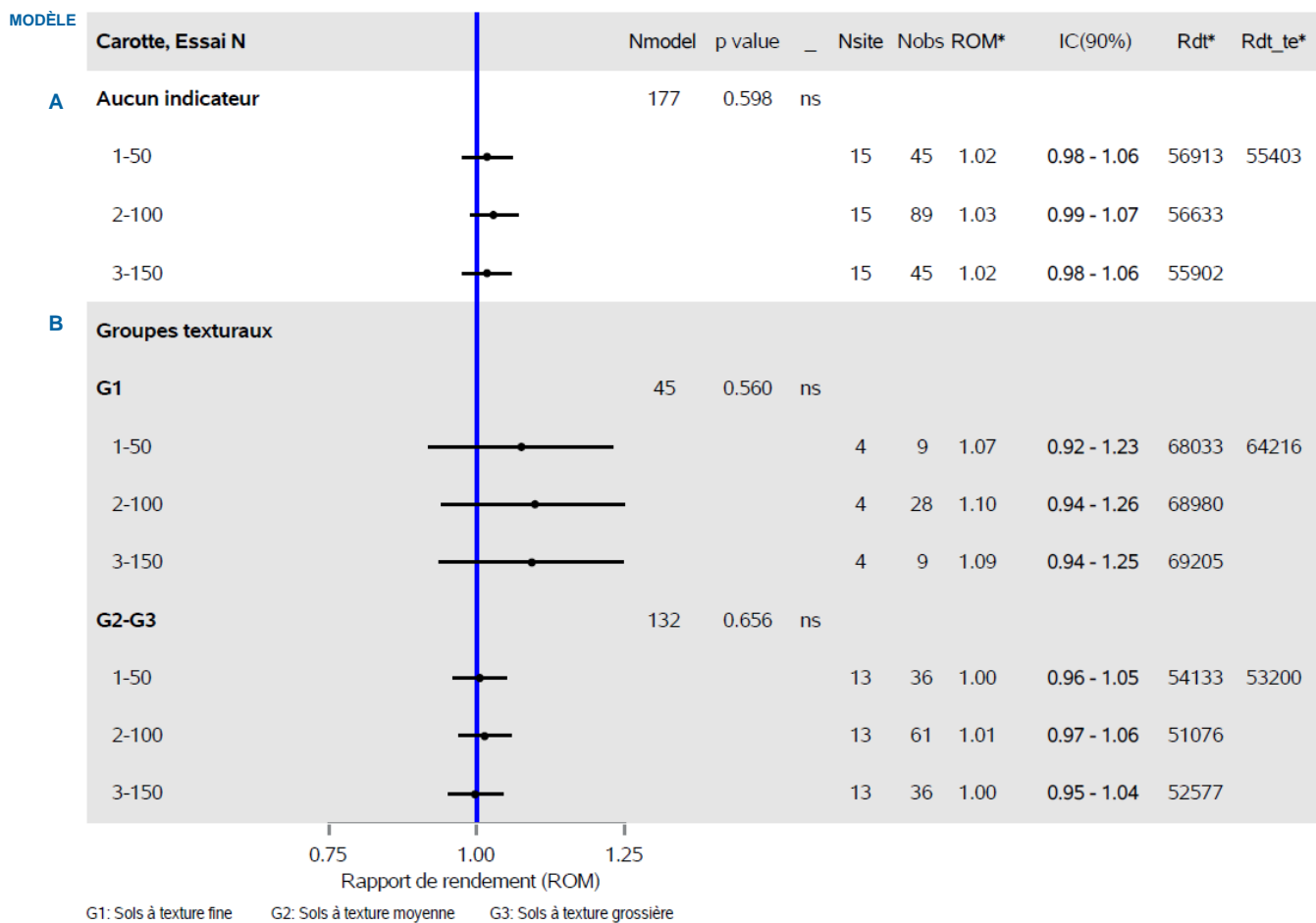


Figure 5. Résultats des analyses de variance sur la réponse de la culture aux doses croissantes d'azote. G1 : sols à texture fine ; G2 : sols à texture moyenne ; G3 : sols à texture grossière ; Nmodel : nombre d'observations du modèle ; Nsite : nombre de sites ; Nobs : nombre d'observations ; ROM : rapport de rendement (rendement parcelle fertilisée/rendement parcelle témoin) ; IC : Intervalle de confiance ; Rdt : rendement moyen en kg/ha ; Rdt_te : rendement moyen commercialisable du témoin en kg/ha ; * : Le ROM est une moyenne ajustée au modèle d'analyse de variance, tandis que le Rdt/Rdt_te est une moyenne arithmétique. De ce fait, le rapport entre le Rdt et le Rdt_te peut ne pas donner la valeur exacte du ROM.

Pour terminer, l'analyse de l'effet des précédents culturaux a été également effectuée (données non présentées). Les essais ont été réalisés sur des retours d'avoine, de betterave, de brocoli, de chou, de maïs-grain et de courgette. Les analyses statistiques ont été réalisées uniquement dans le cas où un précédent cultural se retrouvait sur plus d'un site. Les résultats des analyses ne montrent aucune variation de la dose agronomique optimale selon les précédents culturaux. De plus, indépendamment du précédent cultural, la dose de 50 kg/ha a permis d'obtenir le gain de rendement optimal. Une étude de Kimpinski et Sanderson (2004) a également démontré que les moyennes des rendements totaux et commercialisables de la carotte ne différaient pas en fonction de la rotation culturale. Il est à noter que les précédents culturaux répertoriés ne sont généralement pas répétés à plusieurs sites. Par conséquent, il est impossible de tirer des conclusions fiables sur les précédents culturaux, car l'effet peut être confondu avec un effet de site.

2.2.3 Effet de la dose d'azote sur la qualité du feuillage

Un bon état du feuillage (quantité et qualité) est très important pour assurer le bon déroulement de la récolte mécanique, l'extraction des carottes du sol se faisant en tirant sur les feuilles. En effet, il a été largement rapporté que les apports en N ont un effet considérable sur la qualité du feuillage de la carotte, autant dans la littérature scientifique (Westerveld *et al.*, 2005, 2007, 2008) qu'auprès des producteurs. Ainsi, malgré, l'absence de réponse à la fertilisation de la culture, l'apport supplémentaire de N peut rester nécessaire pour assurer une bonne qualité du feuillage (Westerveld 2005). Dans le cadre de cette étude, deux paramètres (la robustesse à la tige et la grosseur du feuillage) ont été utilisés afin d'évaluer l'effet de la fertilisation azotée sur la qualité du feuillage. Les résultats des tests statistiques (données disponibles pour 9 sites sur 16 seulement) n'ont toutefois démontré aucun effet significatif de la fertilisation en N sur les paramètres de qualité du feuillage à l'étude, c'est-à-dire la robustesse à la tige ($P = 0,981$) et la grosseur du feuillage ($P = 0,683$). D'un côté, cela pourrait signifier qu'un faible apport, tel que recommandé dans le cas présent, permettrait au sol d'atteindre un niveau de fertilité en N suffisant pour une croissance adéquate de la culture et un bon état du feuillage. D'un autre côté, le jeu de données était peut-être insuffisant pour observer un tel effet.

2.3 Diagnostic nutritionnel et exportations en azote

L'analyse des tissus rapporte des concentrations et un taux d'humidité similaires à ceux présentés actuellement dans le Guide de référence en fertilisation du Québec (GREF ; CRAAQ, 2010), soit de 1,6 kg N/t à une humidité de 88 % (Tableau 8). Les exportations, quant à elles, varient de 156 à 201 kg N/ha pour la population de tête, avec des valeurs moyennes et médianes respectives de 174 et 171 kg N/ha. La Figure 6 présente l'évolution des exportations en N par la carotte en fonction des rendements totaux. Cette figure montre que les exportations et les rendements varient grandement en fonction de la variété de carotte cultivée et que les exportations en N par la variété Sun 255 sont supérieures aux autres. Sur ce graphique, on peut également observer une stagnation des rendements à partir d'une exportation avoisinant les 170 kg N/ha.

Tableau 8. Concentrations et exportations d'azote de la carotte selon le diagnostic nutritionnel

	Humidité		Exportations ¹				
	(%)	(kg N/t humide)		(kg N/ha)			
		Moy	Éc-T	Moy	Med	Min	Max
Haut rendement et équilibre nutritionnel (« population de tête »)	88	1,56	0,11	174	171	156	201
Faible rendement et équilibre nutritionnel	87	1,65	0,04	80	78	77	83
Faible rendement et déséquilibre nutritionnel	88	1,53	0,36	96	92	40	279
Haut rendement et déséquilibre nutritionnel	88	1,41	0,15	146	142	110	202

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

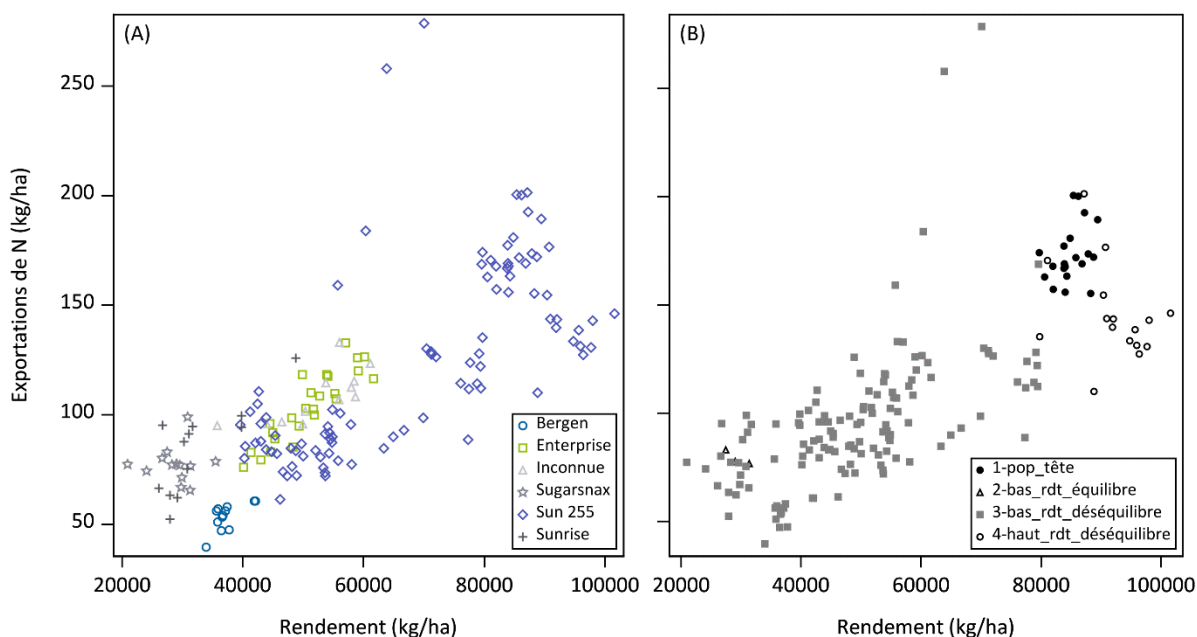


Figure 6. Exportations d'azote en fonction des rendements de la carotte, exprimés selon les variétés (A) et selon le diagnostic nutritionnel (B).

2.4 Nitrate résiduel à la récolte

Les quantités de nitrate (N-NO₃) résiduel des strates 0-30 et 30-60 cm du sol ont été analysées (parcelles fertilisées en N vs témoin 0 N) afin d'évaluer les risques de pertes de N vers l'environnement (Figure 7). Hormis la dose de 100 kg N/ha en sol G1, les teneurs en nitrate résiduel dans le sol varient de 8 à 26 kg/ha et de 5 à 13 kg/ha pour les couches de sol de 0-30 cm (Figure 7A) et de 30-60 cm (Figure 7B), respectivement. Ces résultats sont similaires à ceux rapportés par Salo (1999) de 9 à 13 kg/ha et de 5 à 22 kg/ha pour les strates 0-25 et 25-60 cm, respectivement. Dans l'ensemble, bien que plus de nitrate se retrouve dans les sols de type G1 que les sols G2-G3, les quantités résiduelles demeurent relativement faibles pour les deux groupes de textures de sol. Dans les sols du groupe G1, les quantités de N-NO₃ ne sont pas significativement différentes du témoin pour les deux couches de sol. Seule la dose de 100 kg N/ha entraîne une hausse significative du nitrate, mais celle-ci est causée par une seule donnée extrême (43 kg N-NO₃/ha). Bien que non significatif, la Figure 7 montre que sur la

strate de 0-30 cm, la teneur en N-NO₃ résiduelle du sol est également plus élevée pour la dose de 100 kg N/ha que pour celle de 150 kg N/ha. Cette plus grande quantité de N-NO₃ résiduelle mesurée pour la dose de 100 kg/ha reste toutefois inexplicée. Les exportations spécifiques de la culture au site concerné s'étant avérées plus élevées pour cette dose que pour celle de 150 kg N/ha (102 kg N/ha et 92 kg N/ha pour les doses respectives de 100 N et 150 N), cette quantité élevée de nitrate n'a pas été causée par des exportations plus faibles. En l'absence d'information supplémentaire, il n'est pas possible d'enlever la donnée jugée aberrante.

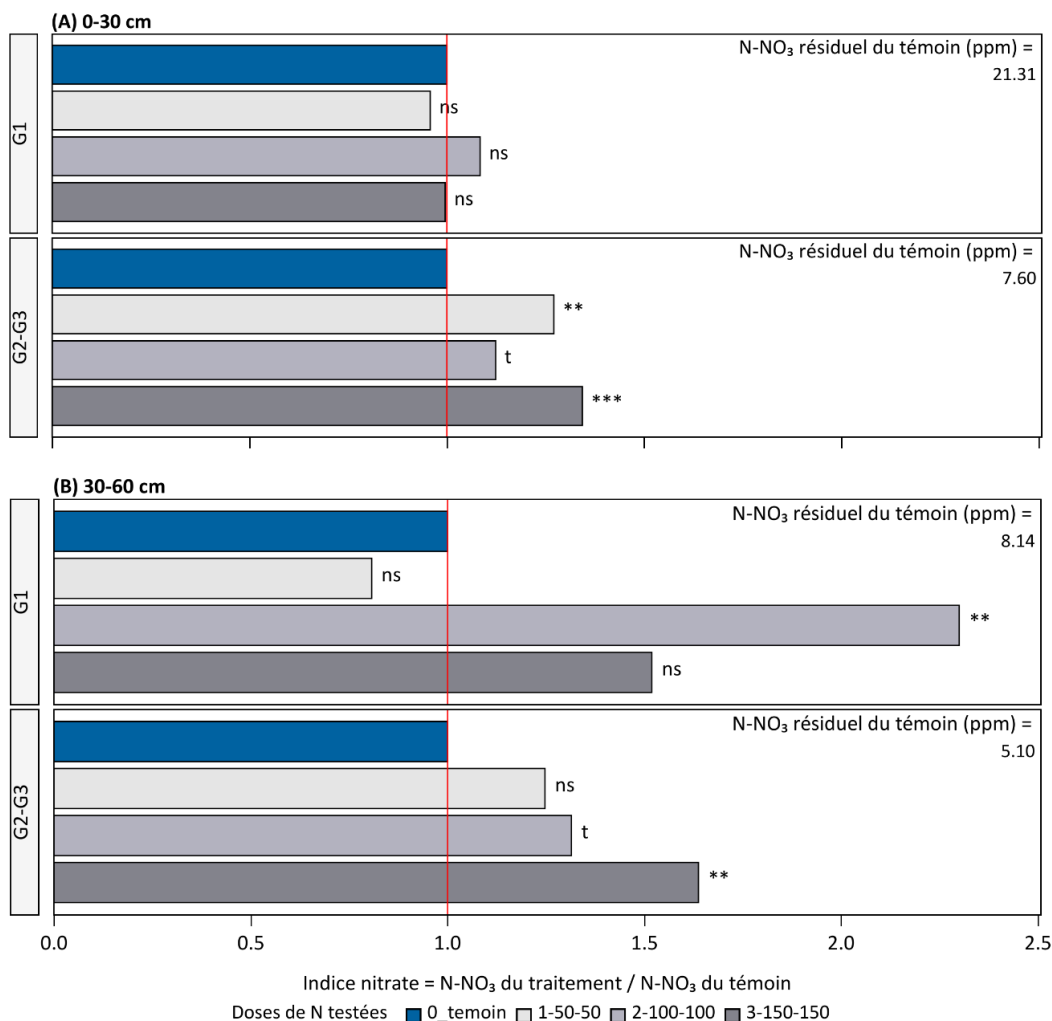


Figure 7. Nitrate résiduel (N-NO₃) à la récolte dans les couches de sol 0-30 cm (A) et 30-60 cm (B) en fonction des doses d'azote et des groupes de textures pour la carotte. G1 : sols à texture fine ; G2 : sols à texture moyenne ; G3 : sols à texture grossière. Les statistiques ont été réalisées sur les données transformées (log), alors que le graphique présente les données brutes tels qu'analysées au laboratoire. De ce fait, les résultats du test statistique pourraient ne pas correspondre exactement aux données présentées sur le graphique. ns : non significatif ; t : tendance, P < 0,12 ; * significatif, P < 0,05 ; ** significatif, P < 0,01.

En sols G2 et G3, l'augmentation des doses de N a entraîné une augmentation significative de la concentration en nitrate post-récolte dans les strates 0-30 et 30-60 cm, même pour la plus petite dose testée. Cela suggère que comparativement au sol argileux, l'effet de la fertilisation azotée pourrait être plus important dans les sols G2 et G3 impliquant la nécessité d'avoir une gestion plus soutenue afin de minimiser les risques de pertes de N vers les cours d'eau.

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

À la lumière de tous les résultats, une dose de 50 kg N/ha fractionnée en deux apports est recommandée (Tableau 9). Cette nouvelle recommandation intègre le fractionnement à un stade précis (au semis et au stade 6-10 feuilles), une mode de gestion des engrais qui s'inscrit dans les bonnes pratiques agronomiques. Cette dernière favorise une meilleure utilisation des engrais, laquelle pourrait contribuer à la diminution observée des doses agronomiques optimales. Il est à noter que les essais de la présente étude ont été réalisés avec des carottes de type cello-jumbo et d'industrie uniquement. Or, il est probable que les besoins en N diffèrent en fonction de la densité de plantation et la durée du cycle cultural, comme pour les carottes nantaises par exemple. Le jugement de l'agronome sur l'application de cette dose est requis dans ce cas.

Les données obtenues concordent avec plusieurs recommandations de diverses régions ayant un climat semblable à celui du Québec, ainsi qu'avec les résultats de plusieurs autres études (Tableau 10). En effet, Gutezeit (1999) n'a pas mesuré d'effet de la fertilisation azotée sur le rendement de la carotte lors d'une expérimentation menée sur deux années en utilisant les mêmes traitements que les présents essais (0, 50, 100 et 150 kg N/ha). De plus, tel que mentionné à la section 2.4, une augmentation de la dose de N entraîne une hausse du nitrate résiduel dans les 60 premiers cm de sol, ce qui augmente les risques de pollution environnementale.

La recommandation de 50 kg N/ha proposée constitue une légère diminution comparativement à la dose actuelle du GREF du Québec (CRAAQ, 2010). Elle est toutefois semblable à la recommandation des états du Mid-Atlantique des États-Unis. Les provinces des Maritimes ne donnent pas de valeurs de référence, mais recommandent des évaluations au cas par cas, puisque la carotte répond peu ou pas aux apports de N (Tableau 10). La dose proposée semble faible comparativement aux exportations en N de la culture. Toutefois, les exportations élevées mesurées pour la carotte ne peuvent servir à moduler les doses de fertilisant puisque la carotte peut prélever une quantité plus importante de N que ce dont elle a besoin pour la production de biomasse (Westerveld *et al.*, 2006b). En effet, il a été rapporté dans la littérature que la carotte peut être utilisée comme « *catchcrop* » (piège à nitrate) étant donné sa forte capacité à prélever le N (Westerveld *et al.*, 2006b). De plus, étant donné que l'évaluation des pertes à l'entreposage n'a pas pu être effectuée, il n'est pas possible de mesurer les effets de la fertilisation azotée sur ces pertes. Tel qu'indiqué dans la section 1.6.4, les résultats des recherches antérieures (Bundiniené *et al.*, 2014; Westerveld *et al.*, 2006b) n'ont rapporté aucun effet significatif de la dose de N sur l'entreposage de la carotte si les conditions d'entreposage (température, humidité, etc.) sont respectées.

Tableau 9. Fertilisation azotée de la carotte cultivée en sol minéral – Valeurs scientifiques de référence en fertilisation

Groupe de textures ¹	Période d'application ²	VSRF ³ (kg N/ha)
G1, G2, G3	Au semis	25
	Au stade 6-10 feuilles	25
Apport total		50 ⁴

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

² Dans le cadre des essais de fertilisation, l'azote au semis a été apporté en bande (7 sites) ou à la volée (8 sites). L'un ou l'autre de ces deux modes d'application peut être adopté. Lorsque faisable techniquement, l'application en bande est à prioriser, car elle permet une meilleure utilisation de l'engrais par la plante.

³ VSRF : Valeurs scientifiques de référence en fertilisation.

⁴ La dose de 50 kg N/ha recommandée correspond à la dose agronomique optimale pour cette culture.



L'azote est reconnu pour avoir une grande influence sur la qualité du feuillage de la carotte (robustesse à l'arrachage) qui est nécessaire au bon déroulement de la récolte. En effet, la carotte est récoltée en tirant sur les feuilles. Cela traduit qu'une fertilisation insuffisante en N pourrait causer des pertes importantes au moment de la récolte. La dose de 50 kg/ha proposée est basée sur l'absence de différence significative entre les doses de N testées sur le rendement et sur les paramètres de qualité du feuillage observée dans le cadre de cette étude.

Dans le cadre des essais de fertilisation, l'azote au semis a été apporté en bande (7 essais) ou à la volée (8 essais). Quant à l'apport d'azote en post-levée, il a été effectué en bande pour la totalité des essais. Ainsi, une considération sur les modes d'apports des engrais s'avère nécessaire, afin de tenir compte des pratiques de fertilisations ayant cours en contexte de production, soit l'apport à la volée. Cette différence de mode d'apport pourrait, dans une certaine mesure, influencer l'efficacité d'utilisation des engrais et ainsi les quantités optimales.

Tableau 10. Comparaison des recommandations en azote pour la production de carotte en sol minéral au Canada et à l'étranger

Région	Mode et période d'application	Fractionnement	Indicateurs		Dose N (kg/ha)	Source
			Fertilité du sol	Autre		
Québec (CAN)	À la volée avant le semis	Non	-	-	80	CRAAQ (2010)
Ontario (CAN)	À la volée et incorporé, avant le semis En saison quand les plants mesurent 10 cm de haut	Oui	Non	Transformation : 78-90 Fraîche : 34-45	110	MAAARO (2010)
Les Maritimes (CAN)	À la volée et incorporé, au semis, et/ou en bande en saison	Fractionner les apports de N et de K lorsque les taux sont élevés	-	40-80	Aucune ou peu de réponse à la fertilisation.	Atlantic Provinces Advisory Committee on Vegetable Crops (2004)
Prairies (CAN)	À la volée et incorporé, avant le semis En saison, à la volée ou fertigué	Selon le producteur	Nitrate	-	80-100	Alberta Agriculture and Rural Development (2014)

Région	Mode et période d'application	Fractionnement	Indicateurs		Dose N (kg/ha)	Source
			Fertilité du sol	Autre		
Minnesota (É-U)	50 % à la volée et 50 % en bande au semis	50 % à la volée et 50 % en bande au semis	MO	50	90-135	Rosen et Eliason (2005)
Nouvelle Angleterre (É-U)	À la volée et incorporé, au semis En bande, 4 à 6 sem. suivant le semis En bande, quand la racine mesure 0,5 po de diamètre	Oui	-	50-60 Si le potentiel de rendement est < 50, le 3 ^e apport peut être omis.	125-165	University of Massachusetts Amherst (2018)
Michigan (É-U)	À la volée au semis 4 à 6 sem. Après la levée	Oui	-	-	110	Warncke et coll. (1992)
Mid-Atlantic (É-U)	À la volée et incorporé En bande en saison (au besoin)	Oui	-	-	55-90	PennState Extension (2020)
Centre et Nord de la France (FRA)	Au semis	Oui	Bilan azoté	Non	130-200	UNILET (s.d.)
Nouvelle-Zélande	Au semis, à la volée et incorporé ou au stade 4 feuilles vraies, voire un peu plus tard	Non	N	< 100 ou 170	0- 90	The New Zealand Institute for Plant & Food Research Limited (2016)

3. FERTILISATION PHOSPHATÉE

3.1 Portrait et représentativité des données

Le seuil de 200 kg/ha (équivalent à 89 ppm si on considère le facteur de conversion de 2,24) de P extrait par la méthode Mehlich-3 (P_{M3}) a été utilisé *a priori* pour distinguer les sites dits de faible (< 200 kg P_{M3} /ha) ou de forte (> 200 kg P_{M3} /ha) teneur en P. Une grande proportion des blocs des sites (environ 70 % ; Tableau 11) avait une teneur en P_{M3} qui se situait au-delà de ce seuil, ce qui n'est pas adéquat pour mesurer une réponse à la fertilisation en P. Néanmoins, selon l'indice de saturation en P ($ISP_1 = P/Al$), reconnu comme étant un meilleur indicateur agroenvironnemental de la disponibilité en P du sol que le P_{M3} seul (Khiari *et al.*, 2000), 67 % des blocs avaient un ISP_1 inférieur au seuil environnemental de 7,6 % du REA (MDDELCC, 2010) dans les sols G1. Dans les sols des groupes de textures G2 et G3, 54 % des blocs ont un ISP_1 sous le seuil de 13,1 %, ce qui est adéquat pour évaluer une réponse à la fertilisation phosphatée. Toutefois, la comparaison entre les ISP_1 des sites et ceux des MRC montrent que les sites saturés en P sont surreprésentés comparativement aux ISP_1 des trois MRC des essais (Côte de Beauré, Montcalm et Lac-Saint-Jean-Est) où les sols présentant des ISP_1 inférieurs à 7,5 % prédominent (Tableau 11).

Tableau 11. Répartition des blocs des essais P selon différentes classes de propriétés de sol après validation des données

pH _{eau}	Saturation en P (ISP_1 , %) ³				Teneur en P_{M3} (ppm)		Groupe de textures ²		Saturation en P des MRC (ISP_1 %) ^{4,5}				
	Blocs (%)	G1 ²		G2-G3		Seuil	Blocs (%)	Seuil	Blocs (%)	1	2	3	
Seuil		Blocs (%)	Seuil	Blocs (%)	Seuil					% du territoire			
≤ 5,6	0	≤ 3,8	15	≤ 6,5	18	≤ 50	22	G1	20	≤ 7,5	87	53	90
5,7 - 6,0	2	3,9 - 7,6	52	6,6 - 13,1	36	51 - 100	7	G2	47	7,6 - 13,1	3	25	3
6,1 - 6,5	29	7,7 - 15,2	22	13,2 - 20	35	101 - 150	31	G3	33	13,2 - 20,0	2	13	1
6,6 - 7,3	62	> 15,2	11	> 20	11	151-200	23	-	-	> 20,0	8	9	7
≥ 7,4	7	-	-	-	-	201-250	8	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	> 250	9	-	-	-	-	-	-

¹ Cescas (1978), cité par le Guide de référence en fertilisation (CRAAQ 2010).

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

³ $ISP_1 = [P_{M3} \text{ (ppm)} / Al_{M3} \text{ (ppm)}] \times 100$, éléments extraits au Mehlich-3 (1984).

⁴ Adapté du Portrait des années 2011 à 2013 du MDDELCC (2016).

⁵ MRC (1) de la Côte-de-Beauré (2) du Montcalm (3) du Lac-Saint-Jean-Est.

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 sont reliés à la disponibilité du P dans le sol et à la réponse à la fertilisation phosphatée de la culture (Parent *et al.*, 2002 ; Khiari et Parent, 2005 ; Chien et Menon, 1995). Ceux-ci ont été testés avec le test de Cate et Nelson (1971) : P_{M3} , ISP_1 , pH_{eau}, CEC, la teneur du sol en MO, la teneur du sol en argile et les rapports logarithmiques isométriques calculés en fonction de la granulométrie

des sols ($ILR_{[A|L]}$, $ILR_{[AL|S]}$). Lorsque possible, ces indicateurs ont été testés à l'intérieur des groupes de textures G1, G2 et G3. Parmi tous les indicateurs de fertilité testés, la teneur du sol en argile s'est avérée être l'indicateur potentiel le plus significatif de la réponse au P_2O_5 ($P < 0,05$; Tableau 12), suivi de l'ISP₁ qui a tout de même présenté une forte tendance ($P = 0,057$ 1) pour les sols de type G3 (Tableau 12).

Tableau 12. Valeurs critiques des indicateurs potentiels de sols significatifs selon les tests de Cate-Nelson pour les essais P

Indicateur de sol	Groupes de textures ¹	Valeur critique	RRel ² (%)	Sensitivité	Spécificité	p^3
ISP ₁	G3	9,2 %	75	0,85	1,00	0,057 ^t
Teneur en argile	G1-G2-G3	8,0 %	81	0,89	0,56	0,009 ^{**}

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

² RRel : Rendement relatif ($100 \times$ rendement du témoin/rendement maximum par bloc).

³ ** significatif à $P < 0,01$; t : tendance à $P < 0,12$.

3.2.2 Effet de la dose de phosphore sur le rendement commercialisable

De même que pour les essais sur l'azote, les analyses de variance ont démontré que dans les sols minéraux, la carotte répond très peu à l'ajout de fertilisant phosphaté peu importe le niveau de fertilité phosphaté du sol ou son taux de saturation en P. Toutes les données ont donc été analysées ensemble sans tenir compte des indicateurs de fertilité du sol (Figure 8). En effet, les résultats du modèle sans indicateur (sur l'ensemble du jeu de données) étaient non significatifs ($P = 0,822$), traduisant l'obtention de ROM similaires pour les différentes doses de P_2O_5 testées (voir section 2.2.2 pour les explications sur l'interprétation du graphique). Ainsi, le groupe de doses 30-40 kg P_2O_5 /ha (plus petit groupe de doses testées) serait donc suffisant pour l'obtention du rendement optimal. L'analyse de la distribution des doses testées dans le groupe 30-40 permet de statuer sur la dose médiane de 35 P_2O_5 /ha, comme les doses 30 et 40 ont été testées à un nombre égal de sites.

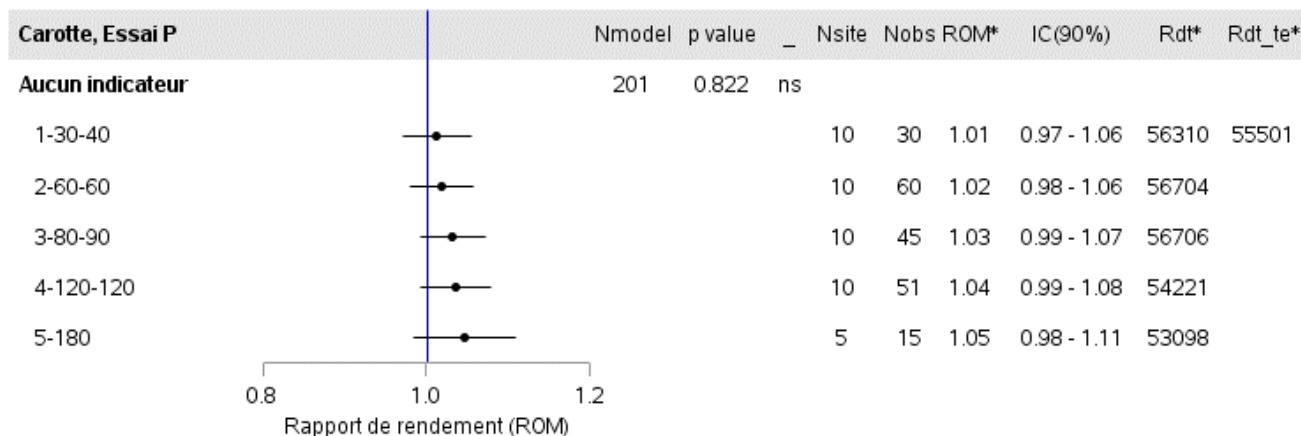


Figure 8. Résultats des analyses de variance sur la réponse de la culture aux doses croissantes de phosphore. Nmodel : nombre d'observations du modèle ; Nsite : nombre de sites ; Nobs : nombre d'observation ; ROM : rapport de rendement (ROM = rendement parcelle fertilisé/rendement parcelle témoin) ; IC : Intervalle de confiance ; Rdt : rendement moyen en kg/ha ; Rdt_te : rendement moyen commercialisable du témoin en kg/ha ; * : Le ROM est une moyenne ajustée au modèle d'analyse de variance, tandis que le Rdt/Rdt_te est une moyenne arithmétique. De ce fait, le rapport entre le Rdt et le Rdt_te présentés ci-dessus peut ne pas donner la valeur exacte du ROM.

3.3 Diagnostic nutritionnel et exportations en phosphore

L'évolution des exportations en P_2O_5 par la carotte en fonction des rendements totaux est présentée à la Figure 9. Les taux d'humidité moyens sont identiques à ceux présentés dans le GREF (CRAAQ, 2010), tout comme la quantité de P_2O_5 exportée par la carotte (Tableau 13). Les exportations en P_2O_5 de la carotte varient de 86 à 105 kg P_2O_5 /ha avec une moyenne de 93 kg P_2O_5 /ha et une médiane est de 92 kg P_2O_5 /ha. De même que pour l'azote, les exportations varient grandement en fonction de la variété de carotte cultivée et la variété Sun 255 présente les exportations les plus élevées en raison de sa plus grande productivité. De ce fait, les fertilisations en P_2O_5 dans les sols pauvres pourraient être revues la baisse dans le cadre de la culture de variétés ayant un faible potentiel de rendement, sans risque de perte par le producteur.

Tableau 13. Concentrations et exportations de phosphore de la carotte selon le diagnostic nutritionnel

	Humidité		Exportations ¹				
	(%)	(kg P_2O_5 /t humide)		(kg P_2O_5 /ha)			
		Moy	Éc-T	Moy	Med	Min	Max
Haut rendement et équilibre nutritionnel (« population de tête »)	88	0,83	0,04	93	92	86	105
Faible rendement et équilibre nutritionnel	87	0,88	0,02	42	42	39	45
Faible rendement et déséquilibre nutritionnel	88	0,79	0,09	50	46	22	92
Haut rendement et déséquilibre nutritionnel	88	0,88	0,12	91	95	56	101

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

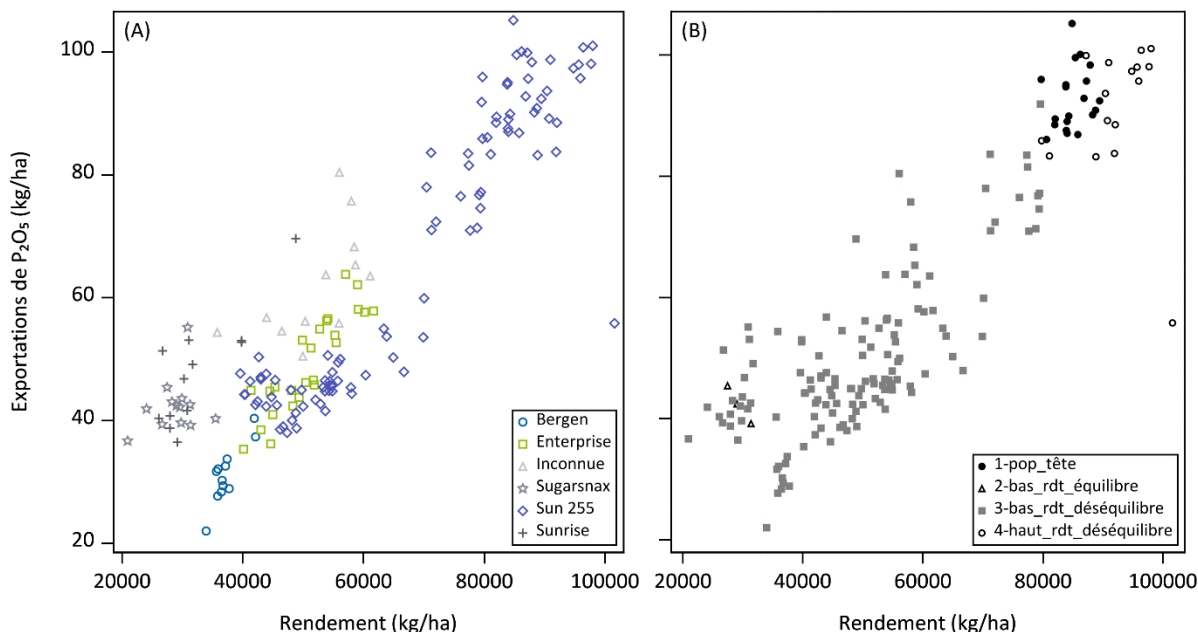


Figure 9. Exportations de phosphore en fonction des rendements de la carotte, exprimés selon les variétés (A) et selon le diagnostic nutritionnel (B).

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

Les recommandations d'apports de P₂O₅ du MIRVRF suggérées suivant les analyses de variance et le calcul des exportations sur la base des données validées du PSEFCM sont présentées au Tableau 14. Ces nouvelles recommandations considèrent la saturation en P du sol (ISP), un indicateur agroenvironnemental plus fiable et plus performant que la considération du P_{M3} seul afin d'évaluer la disponibilité du P. De plus, conjointement avec la considération des groupes de textures, la recommandation tient compte de la réglementation en vigueur (seuils environnementaux du REA). Contrairement à l'azote et au potassium, les doses de phosphore ont été appliquées entièrement à la volée tel que réalisé actuellement en contexte de production.

La consultation des grilles de fertilisation phosphatée proposées à l'étranger (Tableau 15) permet de constater que les recommandations sont très variables d'un endroit à l'autre, ce qui pourrait s'expliquer par la grande influence des propriétés physico-chimiques des sols sur la disponibilité du P après son application sur les sols agricoles. La littérature abonde dans le même sens. Crnko *et al.* (1993) n'observent aucun effet des doses de P₂O₅ sur les rendements commercialisables et sur les calibres de la carotte. À l'Île-du-Prince-Édouard, Sanderson et Sanderson (2006 b) ont obtenu des rendements maximaux avec une dose 110 kg P₂O₅/ha, alors que l'apport de seulement 22 kg P₂O₅/ha permettait l'atteinte de 95 % des rendements maximaux.

Tableau 14. Fertilisation phosphatée de la carotte cultivée en sol minéral – Valeurs scientifiques de référence en fertilisation

Groupe de textures ¹	Classe de fertilité ISP ₁ (%) ^{2,3}	Période d'application	VSRF ⁴ (kg P ₂ O ₅ /ha)
G1	≤ 3,8	Au semis	(90) ⁵
	3,9 – 7,6		35 ⁶
	7,7 – 15,2		35 – 0 ^{6,7}
	> 15,2		0 ⁵
G2, G3	≤ 6,5	Au semis	(90) ⁵
	6,6 – 13,1		35 ⁶
	13,2 – 26,2		35 – 0 ^{6,7}
	> 26,2		0 ⁷

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

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

³ Les catégories ont été déterminées selon les seuils environnementaux (CRAAQ, 2010).

⁴ VSRF : Valeurs scientifiques de référence en fertilisation.

⁵ Dose proposée, basée sur les exportations de la culture, 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. L'exportation en P₂O₅ est en moyenne de 93 kg/ha.

⁶ La valeur maximale recommandée de 35 kg P₂O₅/ha correspond à la médiane du plus petit groupe de doses testées étant donné l'absence de réponse à la fertilisation.

⁷ La valeur minimale recommandée de 0 kg P₂O₅/ha est mentionnée pour indiquer aux producteurs qu'ils peuvent, sans risque sur les rendements, couper la dose d'apport jusqu'à la rendre nulle pour abaisser l'ISP₁ du sol.



Dans les sols présentant un très faible niveau de risque environnemental, la fertilisation phosphatée pourrait être ajustée afin d'entretenir la fertilité du sol. Selon le GREF actuel (CRAAQ, 2010), les seuils critiques environnementaux (ISP_{critique}) varient en fonction de la teneur en argile du sol. Ces seuils sont de 13,1 % et de 7,6 % dans les sols ayant une teneur en argile $\leq 30\%$ et $> 30\%$, respectivement. Considérant l'absence de réponse à la fertilisation phosphatée, une dose de 90 kg P_2O_5 /ha (Tableau 13) pourrait être appliquée comme fertilisation d'entretien dans les sols ayant un très faible niveau de risque de diffusion du P dans l'environnement, soit un $ISP_1 \leq 3,8\%$ dans les sols de texture fine (G1) et un $ISP_1 \leq 6,5\%$ dans les sols de texture moyenne à grossière (G2 et G3). Pour les autres classes d' ISP_1 , les recommandations seraient de 0 à 35 kg P_2O_5 /ha pour les sols présentant un risque environnemental moyen à très élevé ($ISP_1 > 6,5\%$ pour les G2-G3 et $> 3,8\%$ pour les G1).

Tableau 15. Comparaison des recommandations en P_2O_5 pour la production de carotte en sol minéral au Canada et à l'étranger

Province /État	Mode et période d'application	Fractionnement	Indicateurs		Dose P_2O_5 (kg/ha)	Source
			Fertilité du sol ¹	Autre		
Québec (CAN) ¹	-	Non	0-50 kg P_{M3} /ha	-	170	CRAAQ (2010)
			51-100		140	
			101-150		105	
			151-200		85	
			201-300		70	
			301-400		50	
Ontario (CAN) ²	À la volée et incorporé, avant le semis	Non	P_{Olsen}	Objectif de rendement	0-180	MAAARO (2010)
Les Maritimes (CAN) ³	À la volée et incorporé, au semis	Fractionner les apports lorsque les taux sont élevés	-	Objectif de rendement	Apports de P pour maintenir des niveaux suffisants dans le sol.	Atlantic Provinces Advisory Committee on Vegetable Crops (2004)
Prairies canadiennes (CAN) ⁴	À la volée et incorporé, avant le semis ou en bande, avant le semis (Réduire l'option 1 de 1/5)	Non	« Basé sur les résultats des tests de sol annuels »	-	97-133	Alberta Agriculture and Rural Development (2014)
Minnesota (É-U) ⁵	À la volée	Oui	$P_{\text{Bray-I}}$ ou P_{Olsen}	Objectif de rendement	0-170	Rosen et Eliason (2005)
Nouvelle-Angleterre (É-U) ⁶	À la volée et incorporé, au semis	Non		Objectif de rendement	0-170	University of Massachusetts Amherst (2018)
Michigan (É-U) ⁷	À la volée, au semis	Non	P_{Olsen}	-	0-170	Warneck et coll. (1992)
Mid-Atlantic (É-U) ⁸	À la volée et incorporé	Non	P_{M3}	-	0-170	PennState Extension (2020)
Centre et Nord de la France (FRA) ⁹	-	Non	P du sol	-	0-60	UNILET (s.d.)
Nouvelle-Zélande ¹⁰	Au semis, à la volée et incorporé	Non	P_{Olsen}	Objectif de rendement	20- 40	The New Zealand Institute for Plant & Food Research Limited (2016)

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

4. FERTILISATION POTASSIQUE

4.1 Portrait et représentativité des données

La teneur des sols en K_{M3} de la majorité des sites se situait sous le seuil de richesse de 400 kg/ha (179 ppm de K considérant un facteur de conversion de 2,24) établi *a priori* dans les essais PSEFCM pour les deux groupes de textures de sols (Tableau 16). Dans les deux groupes de sols (G1 et G2-G3), une grande proportion des blocs a une teneur en K inférieure au seuil. Toutefois, les données montrent que les sols de textures moyennes à légères ont eu une plus grande richesse en K en comparaison aux sols de textures fines, ce qui est contraire à ce qui était attendu. La représentativité des groupes de textures parmi les sites est acceptable (Tableau 16).

Tableau 16. Répartition des blocs des essais K selon différentes classes de propriétés de sol après la validation des données

pH _{eau}		Teneur en K_{M3} (ppm)			Groupe de textures ²		Teneur en argile	
Seuil ¹	Blocs (%)	Seuil	G1 Blocs (%)	G2-G3 Blocs (%)	Seuil	Blocs (%)	Seuil	Blocs (%)
≤ 5,6	0	≤ 100	46	15	G1	20	≤ 30 %	84
5,7 - 6,0	4	101 – 200	46	51	G2	47	> 30 %	16
6,1 - 6,5	29	201 – 300	7	16	G3	33	-	-
6,6 - 7,3	62	301 – 400	-	6	-	-	-	-
≥ 7,4	5	> 400	-	16	-	-	-	-

¹ Cescas (1978), cité par le Guide de référence en fertilisation (CRAAQ 2010).

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

4.2 Détermination des doses agronomiques optimales

4.2.1 Recherche d'indicateurs de fertilité du sol

Comme le K est une base échangeable, les variables choisies pour la réalisation du test de Cate-Nelson sont en lien avec la CEC du sol : le K_{M3} , l'indice K (indice $K = K/Ca+Mg$), le rapport K/CEC, la CEC et la teneur en argile. Les rapports logarithmiques isométriques (ILR) et centrés (CLR) calculés en fonction de la composition granulométrique des sols et en fonction de leurs teneurs en bases échangeables (K, Ca et Mg) ont été également testés. Lorsque possible, ces indicateurs ont été testés à l'intérieur des groupes de textures G1, G2 et G3. Étant donné la bonne représentativité des sites dans les groupes de textures, les indicateurs de fertilité déclinés par texture ont donné des résultats généralement significatifs dans les tests de partition (Tableau 17). Les valeurs critiques qui seront utilisées pour l'analyse de variance sont présentées au Tableau 17.

Tableau 17. Valeurs critiques des indicateurs potentiels de sols significatifs selon les tests de Cate-Nelson pour les essais K

Indicateur de sol ¹	Groupe de textures ²	Valeur critique	RRel (%) ³	Sensitivité	Spécificité	P ⁴
K _{M3}	G1-G2-G3	95,1 ppm	75	0,90	0,50	0,042*
	G1	82,1 ppm	90	1,00	0,67	0,083 ^t
	G1-G2	86,4 ppm	68	0,89	0,67	0,064 ^t
	G2	102,1 ppm	68	0,94	0,67	0,041*
	G2-G3	108,9 ppm	70	0,93	0,80	0,001**
Indice K	G1-G2-G3	2,4 %	75	0,95	0,33	0,083 ^t
	G1	2,4 %	90	1,00	0,67	0,083 ^t
	G1-G2	2,4 %	68	0,93	0,67	0,039*
	G2	2,4 %	68	1,00	0,67	0,014*
	G2-G3	2,4 %	75	1,00	0,33	0,025*
Clr _[Fv, Ca, Mg K]	G1-G2-G3	-3,6	75	0,97	0,33	0,045*
	G1	-3,4	90	1,00	0,67	0,083 ^t
	G1-G2	-3,6	68	0,96	0,67	0,020*
	G2	-3,5	68	1,00	0,67	0,014*
	G2-G3	-3,5	77	1,00	0,29	0,035*
Clr _[Ca, Mg K]	G1-G2-G3	-1,6	77	0,97	0,29	0,061 ^t
	G1	-1,4	90	1,00	0,67	0,083 ^t
	G1-G2	-1,6	80	0,96	0,50	0,039*
	G2	-1,6	68	1,00	0,67	0,014*
	G2-G3	-1,6	70	1,00	0,40	0,017*
llr _[Ca, Mg K]		1,9	88	0,80	0,71	0,002**
llr _[Mg Ca]		-2	75	0,97	0,33	0,045*
K/CEC	G1-G2	8,5	86	0,83	0,83	0,007**
	G2	6,5	68	0,94	0,67	0,046*
	G2-G3	6,5	75	0,96	0,50	0,037*
MO _{WB}	G1-G2-G3	2,8 %	77	0,80	0,60	0,096 ^t

¹ indice K = K/(Ca+Mg) ; CLR : rapports logarithmiques centrés ; ILR : rapports logarithmiques isométriques ; MO_{WB} : teneur en matière organique dosée par la méthode Walkley-Black. CEC : capacité d'échange cationique, K_{M3} : dosé par la méthode Mehlich-3.

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

³ RRel : rendement relatif (100 × rendement du témoin/rendement maximum par bloc).

⁴ ** : significatif, P < 0,01 ; * : significatif, P < 0,1 ; t : tendance, P < 0,12.

4.2.2 Effet de la dose de potassium sur le rendement commercialisable

De manière générale, les analyses de variance n'ont révélé aucun effet des doses de K₂O sur le ROM (Figure 10 ; voir section 2.2.2 pour les explications sur l'interprétation du graphique en forêt). Le modèle sans indicateur (Figure 10A) était non significatif (P = 0,276), ainsi que la plupart des autres modèles testés (K-Mehlich3, Indice K, llr). Les résultats par groupes de textures démontrent que les sols du groupe G1 ont une réponse significative (P = 0,023) à la fertilisation K (Figure 10D). Toutefois, en raison du faible nombre d'observations dans ce groupe, il est ardu d'émettre une recommandation spécifique à ces sols. Les groupes G2 et G3, quant à eux, n'ont pas répondu à la fertilisation et ont donc été combinés pour former un seul groupe (G2-G3 ; P = 0,625). Pour ces raisons, le groupe de textures ne sera pas retenu comme indicateur.

Par souci d'uniformité avec l'actuel GREF du CRAAQ (2010) et ce qui est utilisé dans le milieu agricole au Québec, le modèle du K extrait au Mehlich-3 (K_{M3}) a été retenu. Conformément aux conclusions de Khiari *et al.* (2017), les limites des classes de fertilité des sols seront présentées en parties par million (ppm, équivalentes aux mg/kg) plutôt qu'en kg/ha afin d'éviter tout biais de conversion induit par l'usuelle constante 2,24 (CRAAQ, 2010). Au total, trois classes de fertilité du sol ont été obtenues. En dessous du seuil critique de 95,1 ppm, une seule classe a été définie en raison du faible nombre d'observations. Au-dessus de la valeur critique, deux classes ont été définies en utilisant la procédure de Cope et Rouse (1973) : soit de 95-190 et > 190. Le seuil critique de 95,1 ppm de K_{M3} du modèle sans indicateur a été retenu. Les intervalles de confiance (Figure 10B) sont très étendus en dessous du seuil, indiquant que les rendements peuvent être très variables. Des essais supplémentaires auraient permis de mieux définir la réponse et les différents facteurs qui induisent une telle variation. De plus, les exportations de K sont très importantes (entre 395 et 541 kg K_2O /ha ; Tableau 18). Ainsi, à long terme, des apports trop restreints pourraient induire un manque de K. Enfin, une seule observation (un seul site) se retrouve dans le premier groupe de doses (40 à 50 kg K_2O /ha) qui aurait été celui à recommander en absence de réponse. Il apparaît risqué de se baser sur cette seule observation. Ainsi, la dose médiane du groupe de doses suivant de 100 kg K_2O /ha est retenue. Au-dessus du seuil de 95,1 ppm, les rendements mesurés sont stables. Ainsi, le risque de perte par manque d'apport de K semble faible et la médiane de 50 kg K_2O /ha du premier groupe (40 à 50 kg K_2O /ha) est retenue.

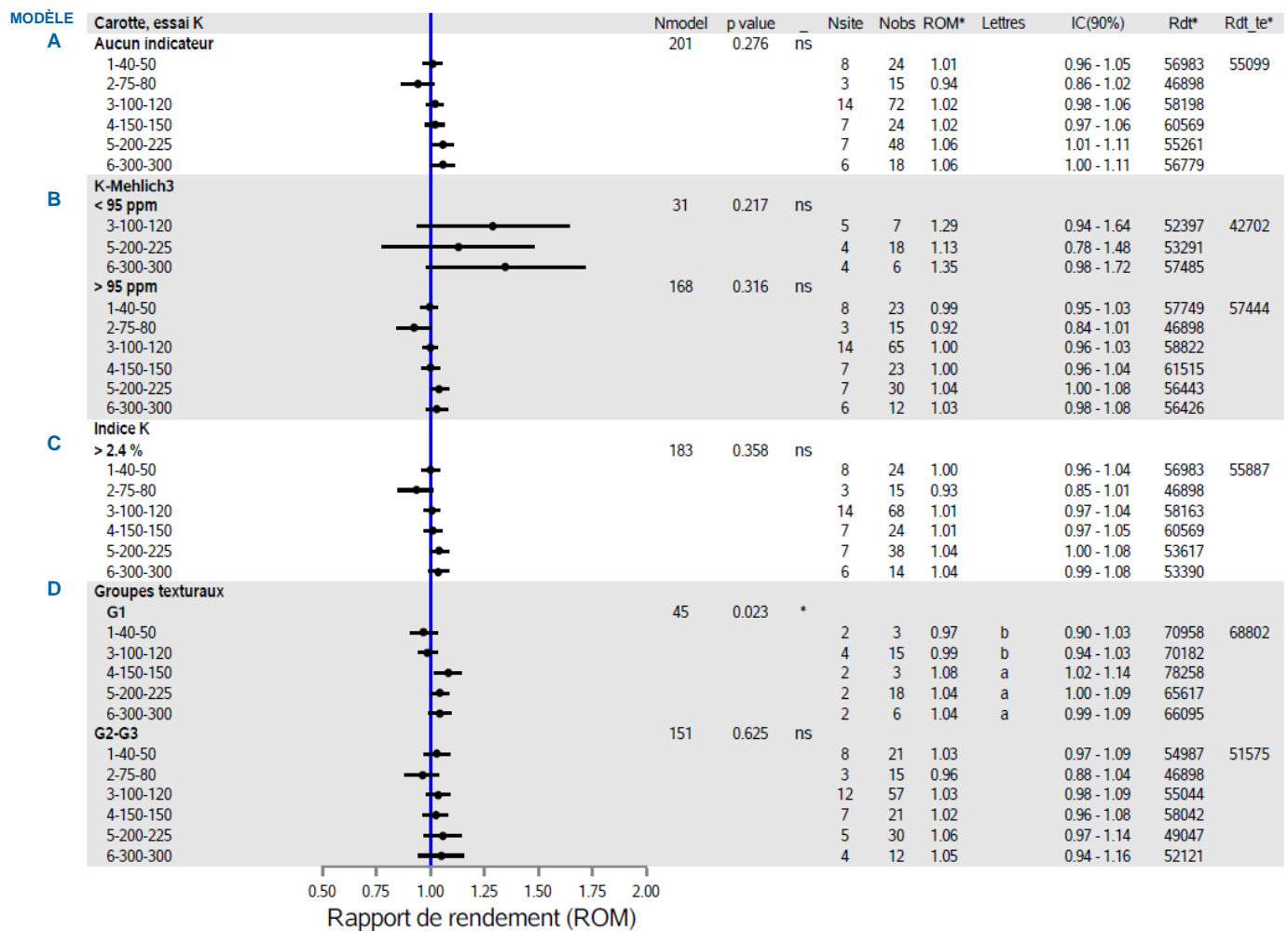


Figure 10. Résultats des analyses de variance sur la réponse de la culture aux doses croissantes de potassium. Nmodel : nombre d'observations du modèle ; Nsite : nombre de sites ; Nobs : nombre d'observation ; ROM : rapport de rendement (rendement parcelle fertilisée/rendement parcelle témoin) ; G1 : sols à texture fine ; G2 : sols à texture moyenne ; G3 : sols à texture grossière ; IC : intervalle de confiance ; Rdt = rendement moyen commercialisable (kg/ha) ; rdt_te = rendement moyen commercialisable du témoin (kg/ha) ; * : Le ROM est une moyenne ajustée au modèle d'analyse de variance, tandis que le Rdt/Rdt_te est une moyenne arithmétique. De ce fait, le rapport entre le Rdt et le Rdt_te présentés ci-dessus peut ne pas donner la valeur exacte du ROM.

4.2.3 Effet de la dose de potassium sur la qualité du feuillage

De même que pour la fertilisation azotée, la robustesse à la tige et la grosseur du feuillage ont été mesurés lors des essais afin d'évaluer l'effet de la fertilisation potassique sur la qualité du feuillage. Aucun effet significatif de la fertilisation en K n'a également été observé sur les paramètres de qualité du feuillage à l'étude, c'est-à-dire la robustesse à la tige ($P = 0,951$) et la grosseur du feuillage ($P = 0,688$). Toutefois, les données ont été disponibles pour seulement une partie des sites d'essais (données disponibles pour 9 sites sur 16).

4.3 Diagnostic nutritionnel et exportations en potassium

La valeur moyenne d'humidité et la concentration en K_2O dans les tissus de la carotte sont respectivement de 88 % et de 4,3 kg K_2O /t humide (Tableau 18). Ces valeurs sont identiques à celles présentées dans le guide du CRAAQ (2010). Les exportations de la carotte varient entre 395 et 541 kg K_2O /ha avec une moyenne de 478 kg K_2O /ha et une médiane de 467 kg K_2O /ha. Les exportations importantes obtenues dans le cadre de ces essais sont en partie attribuables à l'obtention de très hauts rendements (jusqu'à plus de 100 000 kg/ha de carotte). De même que pour l'azote et le phosphore, une variabilité considérable a été observée entre les cultivars, où la Sun 255 a eu les exportations les plus élevées (Figure 11). Cela implique donc que l'utilisation de ces données d'exportations par les producteurs doit se faire en tenant compte du potentiel ou de l'objectif de rendement de leur champ et de la variété cultivée.

Tableau 18. Concentrations et exportations de potassium de la carotte selon le diagnostic nutritionnel

	Humidité		Exportations ¹				
	(%)	(kg K_2O /t humide)	(kg K_2O /ha)				
		Moy	Éc-T	Moy	Med	Min	Max
Haut rendement et équilibre nutritionnel (« population de tête »)	88	4,30	0,37	478	467	395	541
Faible rendement et équilibre nutritionnel	87	4,94	0,18	237	229	228	253
Faible rendement et déséquilibre nutritionnel	88	3,68	0,87	230	208	92	399
Haut rendement et déséquilibre nutritionnel	88	3,99	0,65	413	410	241	554

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

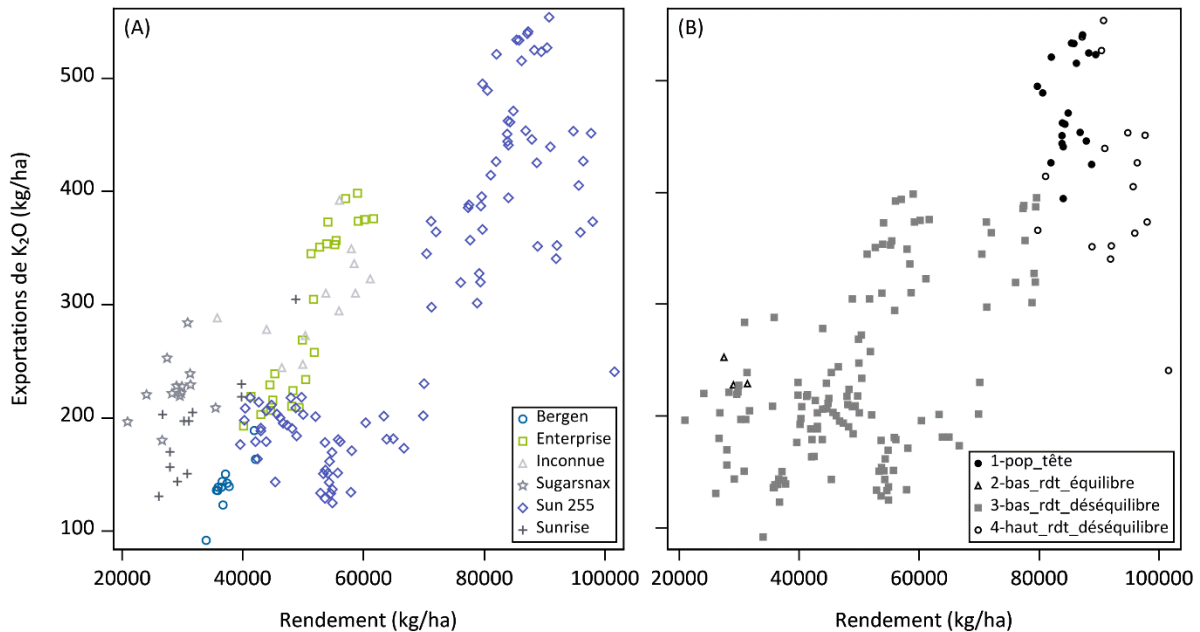


Figure 11. Exportations de potassium en fonction des rendements de la carotte, exprimés selon les variétés (A) et selon le diagnostic nutritionnel (B).

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

Les doses de K_2O recommandées à l'issue du MIRVRF sont de 0 à 235 kg K_2O /ha, selon la teneur en K_{M3} du sol (Tableau 19). Ces nouvelles recommandations intègrent le fractionnement à un stade précis (au semis et au stade 6-10 feuilles), un élément qui s'inscrit dans les bonnes pratiques agronomiques. Cette dernière favorise un meilleur taux de prélèvement des engrais, lequel expliquerait en partie la diminution des doses agronomiques optimales présentées. Enfin, dans l'objectif de minimiser les biais de conversion reliés au facteur 2,24, l'indicateur de fertilité potassique (K_{M3}) est désormais exprimé sur la base de sa concentration en ppm plutôt qu'en kg/ha.

Ces résultats sont semblables à ceux obtenus par Sanderson et Sanderson (2006a), où des doses de 150, 75 et 0 kg K/ha (appliquées sous forme de KCl) étaient nécessaires pour atteindre 95 % des rendements maximaux dans des sols ayant des teneurs en K très faibles (0-41 ppm), faibles (42-67 ppm) et moyennes (60 -103 ppm), respectivement. Les doses de K_2O recommandées ailleurs au Canada et aux États-Unis varient quant à elles entre 0 et 335 kg/ha selon la fertilité du sol (Tableau 20). Enfin, les doses recommandées par le MIRVRF sont également plus faibles que les recommandations de l'actuel GREF (CRAAQ, 2010).

Dans les sols ayant moins de 47,5 ppm de K_{M3} , un apport équivalent à la moitié des exportations de la culture (200 à 235 kg K_2O /ha) est proposé afin d'éviter de diminuer davantage la disponibilité du K dans le sol. Toutefois, le faible nombre d'observations en-dessous du seuil de 47,5 ppm (1 site) n'a pas permis de déterminer une dose agronomique optimale à partir des ANOVA réalisées sur les rendements de la culture. Puisque très peu de sites se retrouvaient en dessous du seuil de 200 kg K_{M3} /ha parmi les données des essais de carottes en sol minéral du PSEFCM, des essais supplémentaires pourraient confirmer la réponse ou sa stabilisation en sol pauvre suivant des apports de K. Les propositions faites dans le cadre du MIRVRF restent toutefois prudentes et soutenues par le fait qu'aucune relation importante n'a été observée entre le prélèvement en K_2O de la carotte et sa production de biomasse commercialisable. Cela dit, le jugement agronomique lors de l'établissement des recommandations sur le long terme s'impose puisque les exportations en K_2O de la carotte sont supérieures à la dose maximale proposée. Ainsi, si les apports en K sont continuellement inférieurs aux exportations de la culture, le niveau de fertilité potassique du sol pourrait diminuer à moyen ou à long terme. Le maintien du niveau de fertilité potassique du sol pour cette culture requiert donc un suivi régulier et une rotation culturale adéquate.

Tableau 19. Fertilisation potassique de la carotte cultivée en sol minéral – Valeurs scientifiques de référence en fertilisation

Groupe de textures ¹	Classe de fertilité K_{M3} (ppm) ²	Période d'application	Fractionnement ³ (kg K_2O /ha)	VSRF ⁴ (kg K_2O /ha)
G1, G2, G3	≤ 47,5	À la volée avant le semis	135	(235) ⁵
		Au semis	40	
		Au stade 6-10 feuilles	60	
	47,5 – 95	Au semis	40	100 ^{6,7}
		Au stade 6-10 feuilles	60	
	96 – 190	Au semis	40	50 ^{7,8}
		Au stade 6-10 feuilles	10	
	> 190	-	0	0 ⁹

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

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

³ Les fractionnements sont présentés tel que testés.

⁴ VSRF : Valeurs scientifiques de référence en fertilisation.

⁵ Dose proposée, afin de couvrir la moitié des exportations de la culture, en vue d'éviter les risques de diminution rapide de la fertilité potassique des sols pauvres en K. L'exportation en K_2O est en moyenne de 478 kg/ha.

⁶ La valeur maximale recommandée de 100 kg K_2O /ha correspond à la dose agronomique optimale déterminée sur la base des intervalles de confiance.

⁷ Les exportations de K_2O par la population de tête sont de 465 kg K_2O /ha (valeur arrondie).

⁸ La valeur maximale recommandée de 50 kg K_2O /ha correspond à la plus petite dose testée étant donné l'absence de réponse dans cette catégorie de sol.

⁹ La valeur minimale recommandée de 0 kg K_2O /ha est mentionnée pour indiquer aux producteurs qu'ils peuvent, sans risque sur les rendements, couper la dose d'apport jusqu'à la rendre nulle.

Dans le cas des sols plus pauvres en K ($K_{M3} < 47,5$ ppm; seuil défini en utilisant la procédure de Cope et Rouse (1973), un apport équivalent à la moitié des exportations de la culture (235 kg K_2O /ha) pourrait être envisagé afin d'éviter d'appauvrir davantage le sol. Toutefois, le faible nombre d'observations en-dessous du seuil de 47,5 ppm (1 site) n'a pas permis de déterminer une dose agronomique optimale basée sur les ANOVA réalisées sur les rendements.



Dans le cadre des essais de fertilisation, le K a été apporté en bande (5 essais sur 16) pour les plus faibles doses testées (50 et 100 kg/ha). Cette différence de mode d'apport pourrait, dans une certaine mesure, influencer l'efficacité d'utilisation des engrais et ainsi les quantités optimales.

Une grande variabilité a été observée au niveau du rendement commercialisable et des concentrations en éléments nutritifs dans les tissus entre les différents cultivars. Quelle stratégie serait idéale pour la prise en compte de cette variabilité en vue de l'obtention d'une meilleure représentativité des exportations de la culture dans les recommandations de fertilisation ?

Tableau 20. Comparaison des recommandations en K₂O pour la production de carotte en sol minéral au Canada et à l'étranger

Province /État	Mode et période d'application	Fractionnement	Indicateurs		Dose K ₂ O (kg/ha)	Source
			Fertilité du sol ¹	Autre		
Québec (CAN)	-	Non	0-100 kg K _{M3} /ha		225	CRAAQ (2010)
			101-200		170	
			201-300		120	
			301-400	-	75	
			401-500		60	
			501-600		40	
Ontario (CAN)	À la volée et incorporé, avant le semis	Non	K _{AA}	Objectif de rendement	0-230	MAAARO (2010)
Les Maritimes (CAN)	À la volée et incorporé, au semis, et/ou en bande en saison	Fractionner les apports de N et de K lorsque les taux sont élevés	-	Objectif de rendement	Apports de K pour maintenir des niveaux suffisants dans le sol.	Atlantic Provinces Advisory Committee on Vegetable Crops (2004)
Prairies canadiennes (CAN)	À la volée et incorporé, avant le semis	Non	-	-	250	Alberta Agriculture and Rural Development (2014)
Minnesota (É-U)	À la volée	Jusqu'à 35 kg K ₂ O/ha de l'apport total en bande au semis	K _{AA}	Objectif de rendement	0-225	Rosen et Eliason (2005)
Nouvelle-Angleterre (É-U)	À la volée et incorporé, au semis	Si de grands apports de K sont nécessaires ou si le lessivage est important, une partie du K peut être appliquée en bande, 4-6 semaine après le semis	-	Objectif de rendement	0-335	University of Massachusetts Amherst (2018)
Michigan (É-U)	À la volée, au semis	Non	K _{AA}	-	0-225	Warncke et coll. (1992)
Mid-Atlantic (É-U)	À la volée et incorporé	Non	K _{M3}		0-170	PennState Extension (2020)
Centre et Nord de la France (FRA)	-	Non	-	-	150-300	UNILET (s.d.)
Nouvelle Zélande	-	Non	-	Objectif de rendement	Jusqu'à 300. Fertilisation de maintenance (3 kg K ₂ O/t humide de carotte)	The New Zealand Institute for Plant Food Research Limited (2016)

¹ K_{AA} : dosé par la méthode à l'acétate d'ammonium, K_{M3} : dosé par la méthode Mehlich-3.

5. FERTILISATION DE LA CAROTTE EN SOL MINÉRAL

Valeurs scientifiques de référence en fertilisation

AZOTE			
Groupe de textures	Période d'application ¹	Fractionnement ² (kg N/ha)	VSRF (kg N/ha)
G1, G2 et G3	Au semis	25	50 ³
	Au stade 6-10 feuilles	25	

PHOSPHORE			
Groupe de textures	Classe de fertilité (ISP ₁ , %)	Période d'application	VSRF (kg P ₂ O ₅ /ha)
G1	≤ 3,8	Au semis	(90) ⁴
	3,9 – 7,6		35 ⁵
	7,7 – 15,2		35 – 0 ^{5,6}
	> 15,2		0 ⁶
G2, G3	≤ 6,5	Au semis	(90) ⁴
	6,6 – 13,1		35 ⁵
	13,2 – 26,2		35 – 0 ^{5,6}
	> 26,2		0 ⁶

POTASSIUM				
Groupe de textures	Classe de fertilité K _{M3} (ppm)	Période d'application	Fractionnement ³ (kg K ₂ O/ha)	VSRF (kg K ₂ O/ha)
G1, G2 et G3	≤ 47,5	À la volée avant le semis	135	(235) ⁷
		Au semis	40	
		Au stade 6-10 feuilles	60	
	47,5 – 95	Au semis	40	100 ³
		Au stade 6-10 feuilles	60	
	96 – 190	Au semis	40	50 ⁵
		Au stade 6-10 feuilles	10	
	> 190	-	0	0 ⁶

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

¹ Dans le cadre des essais de fertilisation, l'azote au semis a été apporté en bande (7 sites) ou à la volée (8 sites). L'un ou l'autre de ces deux modes d'application peut être adopté. Lorsque faisable techniquement, l'application en bande est à prioriser, car elle permet une meilleure utilisation de l'engrais par la plante.

² Les fractionnements sont présentés tels que testés.

³ Dose agronomique optimale déterminée sur la base des intervalles de confiance.

⁴ Dose proposée, basée sur les exportations de la culture, 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. L'exportation en P₂O₅ est en moyenne de 93 kg/ha.

⁵ Plus petite dose testée étant donné l'absence de réponse à la fertilisation.

⁶ La valeur minimale recommandée de 0 kg/ha de P₂O₅ ou de K₂O est mentionnée pour indiquer aux producteurs qu'ils peuvent, sans risque sur les rendements, couper la dose jusqu'à la rendre nulle. Ce qui permettra dans le cas du P d'abaisser l'ISP du sol.

⁷ Dose proposée, afin de couvrir la moitié des exportations de la culture, en vue d'éviter les risques de diminution rapide de la fertilité potassique des sols pauvres en K. L'exportation en K₂O est en moyenne de 478 kg/ha.



Ce tableau présente les résultats scientifiques des essais de fertilisation du PSIH et du PSEFCM. 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.

6. 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 cette culture, en plus de mettre à jour les périodes d'application, ainsi que les classes de fertilité et doses optimales d'apports des éléments majeurs pour la carotte cultivée en sol minéral. Ces recommandations reposent sur l'analyse des données validées d'expérimentations scientifiques québécoises réalisées au champ, appuyée de l'expertise agronomique et de principes scientifiques reconnus dans le domaine de la nutrition des cultures. La récolte de la carotte se faisant de façon mécanique en tirant par les feuilles, les doses proposées tiennent également compte de deux paramètres de qualité du feuillage, soit la robustesse à la tige et la grosseur du feuillage. Dans l'ensemble, les doses optimales proposées sont inférieures à celles des grilles antérieures (CRAAQ, 2010), sans compromettre les rendements. Ces diminutions découlent probablement en partie du fractionnement des doses (N et K), favorisant une utilisation plus efficace des engrais, plutôt que l'apport unique de la dose au semis. De plus, dans le cadre des essais de fertilisation, le potassium et l'azote ont été apporté en bande (mode d'apport majoritaire pour le N) ou à la volée selon l'année de réalisation de l'essai (essai N et K) et la dose testée (essai K). Ainsi, une considération sur les modes d'apports des engrais s'avère nécessaire, afin de tenir compte des pratiques de fertilisations ayant cours en contexte de production, soit l'apport à la volée. Cette différence de mode d'apport pourrait, dans une certaine mesure, influencer l'efficacité d'utilisation des engrais et ainsi les quantités optimales. Pour la fertilisation phosphatée, les apports ont pu être précisés par l'intégration d'un double indicateur qui considère le groupe de textures de sol, influençant grandement le dynamisme et la biodisponibilité du P, et l'indice de saturation en P (ISP) qui est un meilleur indicateur agroenvironnemental de la biodisponibilité du P que la concentration du P du sol considérée seule. À ceci s'ajoute l'inclusion des seuils critiques environnementaux du REA, conformément à la réglementation en vigueur. Enfin, un biais important a été corrigé pour l'indicateur de fertilité du sol en potassium (K) par l'usage de la teneur en ppm, plutôt que la valeur en kg/ha obtenue par conversion avec le facteur générique de 2,24 susceptible d'entraîner des biais significatifs. Globalement, les travaux de l'IRDA permettront donc aux acteurs du milieu agricole de bénéficier de recommandations propres aux sols et au climat québécois, permettant de mieux concilier la productivité et la conservation des ressources.

Remerciements

L'équipe de l'IRDA tient à remercier d'une manière spéciale les divers intervenants et spécialistes pour leur collaboration facilitant la prise en compte des contraintes et des pratiques culturelles dans la culture de la carotte en sol minéral. Nos gratitudee sont exprimées plus spécifiquement à M. Mario Leblanc pour les échanges téléphoniques.

De plus, nos remerciements s'étendent à l'ensemble des membres du Comité Scientifique IRDA 2017-2020 constitué de Anne Vanasse, Athyna Cambouris, Judith Nyiraneza, Éric Thibault, Carl Bélec, Serge-Étienne Parent, Michaël Leblanc, Alexandre Mailloux, Daniel Bernier, Caroline Provost et Joann Whalen. Bien que la grille n'ait pas été finalisée au cours de ces trois premières années, l'équipe de l'IRDA a grandement bénéficié de l'implication de ces personnes, essentielles à la poursuite du projet.

7. RÉFÉRENCES

- ALBERTA AGRICULTURE AND RURAL DEVELOPMENT. 2014. COMMERCIAL VEGETABLE PRODUCTION ON THE PRAIRIES, EDMONTON, ALBERTA, p.310
- ANDERSON, C. ET SCHUMAKER, 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, 2 (2), 79-103.
- ATLANTIC PROVINCES ADVISORY COMMITTEE ON VEGETABLE CROPS. 2004. VEGETABLE CROPS PRODUCTION GUIDE FOR THE ATLANTIC PROVINCES, ATLANTIC PROVINCES AGRICULTURE: HALIFAX, CANADA, p.117
- BIEGON, R. C. 1995. EFFECTS OF POTASSIUM FERTILIZATION AND PERIDERM DAMAGE ON SHELF LIFE OF CARROTS (T). UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA. RETRIEVED FROM [HTTPS://OPEN.LIBRARY.UBC.CA/COLLECTIONS/UBCTHESES/831/ITEMS/1.0086867](https://open.library.ubc.ca/collections/ubctheses/831/items/1.0086867)
- BRADY, N. C. 1990. SOIL REACTION: ACIDITY AND ALCALINITY. DANS : THE NATURE AND PROPERTIES OF SOIL. 10TH EDITION. MCMILLAN PUBLISHING CO. NEW YORK. P. 388
- BROWN, D. S. 1945. THE GROWTH AND COMPOSITION OF THE TOPS OF PEACH TREES IN SAND CULTURE IN RELATION TO NUTRIENT-ELEMENT BALANCE. WEST VIRGINIA AGRICULTURAL AND FORESTRY EXPERIMENT STATION BULLETINS. 322. [HTTPS://RESEARCHREPOSITORY.WVU.EDU/WV_AGRICULTURAL_AND_FORESTRY_EXPERIMENT_STATION_BULLETINS/325](https://researchrepository.wvu.edu/wv_agricultural_and_forestry_experiment_station_bulletins/325)
- BUNDINIENÉ, O., ZALATORIUS, V., KAVALIAUSKAITĖ, D. STARKUTĖ, R. 2014. EFFICIENCY OF THE ADDITIONAL FERTILIZATION WITH NITROGEN FERTILIZERS GROWING CARROT OF EXCEPTIONAL QUALITY AND ITS INFLUENCE ON PRODUCTION STORAGE.
- CANTIN, J. 2007. LES TESTS DE NITRATE DE SOL AFIN D'AJUSTER LA FERTILISATION AZOTÉE DU MAÏS. COLLOQUE SUR L'AZOTE. CENTRE DE RÉFÉRENCES EN AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE DU QUÉBEC ET ORDRE DES AGRONOMES DU QUÉBEC. 28 MARS. DRUMMONDVILLE. P. 37-60.
- CATE, R. B., NELSON, L.A. 1971. A SIMPLE STATISTICAL PROCEDURE FOR PARTITIONING SOIL TEST CORRELATION DATA INTO TWO CLASSES. SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA PROCEEDINGS 35, 658–660.
- CESCAS, M. P. 1978. TABLE INTERPRÉTATIVE DE LA MESURE DU PH DES SOLS DU QUÉBEC PAR QUATRE MÉTHODES DIFFÉRENTES. LE NATURALISTE CANADIEN, 105, 259-263.
- CHELABI, H., KHIARI, L., GALLICHAND, J. ET JOSEPH, C.-A. 2016. SOIL SAMPLE PREPARATION TECHNIQUES ON ROUTINE ANALYSES IN QUEBEC AFFECT LIME AND FERTILIZER RECOMMENDATIONS. CANADIAN JOURNAL OF SOIL SCIENCE VOLUME : 96 ISSUE : 2 PAGES : 244-255.
- CHIEN, S.H. ET MENON, R.G. 1995. FACTORS AFFECTING THE AGRONOMIC EFFECTIVENESS OF PHOSPHATE ROCK FOR DIRECT APPLICATION. FERTIL. RES. 41, 227–234. doi:10.1007/BF00748312
- COPE, J.T., JR. ET ROUSE, R.D. 1973. INTERPRETATION OF SOIL TEST RESULTS. 35-54p. DANS : WALSH, L.M. ET BEATON, J.D., SOIL TESTING AND PLANT ANALYSIS, REVISED EDITION. SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA, MADISON WI.
- CRAAQ. 2010. GUIDE DE RÉFÉRENCE EN FERTILISATION. 2E ÉDITION. CENTRE DE RÉFÉRENCE EN AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE DU QUÉBEC. CRAAQ, QUÉBEC. 473 PAGES.
- CRNKO G.S., A. FERRER, E.A.HANLO ET C.A. NEAL, J. 1993. CARROT AND SWEET CORN YIELD WHEN FERTILIZED ACCORDING TO SOIL RESULT - RECHERCHE GOOGLE. PROCEEDINGS OF THE FLORIDA STATE HORTICULTURAL SOCIETY, 106, 199-201.
- DE BAUW P., VAN ASTEN P., JASSOGNE L, 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. AGRIC ECOSYST ENVIRON. 231:166–175. doi:10.1016/j.agee.2016.06.036.
- GUTEZEIT, B. 1999. YIELD AND NITRATE CONTENT OF CARROTS (DAUCUS CAROTA L.) AS AFFECTED BY NITROGEN SUPPLY. ACTA HORTIC. 506, 87-92. DOI:10.17660/ACTAHORTIC.1999.506.10. [HTTPS://DOI.ORG/10.17660/ACTAHORTIC.1999.506.10](https://doi.org/10.17660/ACTAHORTIC.1999.506.10)
- HAMILTON, H.A. ET R. BERNIER. 1975. N-P-K FERTILIZER EFFECTS ON YIELD, COMPOSITION, AND RESIDUES OF LETTUCE, CELERY, CARROT, AND ONION GROWN ON AN ORGANIC SOIL IN QUEBEC. CAN. J. PLANT SCI. 55:453–461.
- HUBERT M., DEBRUYNE M. 2010. MINIMUM COVARIANCE DETERMINANT. WIRES COMPUT STAT. 2(1):36–43. DOI:10.1002/WICS.61.

- INSTITUT DE RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT EN AGROENVIRONNEMENT (IRDA), 2021, MISE EN LIGNE À VENIR. PACKAGE CND VERSION 1.2, CNDMETHODROBUSTIRDA. R, [LIEN GITHUB À VENIR].
- IRDA (1945-2005). ÉTUDES PÉDOLOGIQUES (BANQUES DE SOL), MAPAQ, IRDA. INSTITUT DE RECHERCHE ET DE DÉVELOPPEMENT EN AGROENVIRONNEMENT INC. (IRDA). [HTTPS://WWW.IRDA.QC.CA/FR/SERVICES/PROTECTION-RESSOURCES/SANTE-SOLS/INFORMATION-SOLS/ETUDES-PEDOLOGIQUES/](https://www.irda.qc.ca/fr/services/protection-ressources/sante-sols/information-sols/etudes-pedologiques/) (CONSULTÉ LE 01/07/2020).
- KHIARI L., PARENT L.-É., TREMBLAY N. 2001A. SELECTING THE HIGH-YIELD SUBPOPULATION FOR DIAGNOSING NUTRIENT IMBALANCE IN CROPS. *AGRON J.* 93(4):802–808. DOI:10.2134/AGRONJ2001.934802X.
- KHIARI, L., PARENT, L.-E., TREMBLAY, N. 2001 B. CRITICAL COMPOSITIONAL NUTRIENT INDEXES FOR SWEET CORN AT EARLY GROWTH STAGE. *AGRON. J.*, 93, 809–814. KHIARI, L. ET PARENT, L. 2005. PHOSPHORUS TRANSFORMATIONS IN ACID LIGHT-TEXTURED SOILS TREATED WITH DRY SWINE MANURE. *CAN. J. SOIL SCI.* 85, 75–87.
- KHIARI, L., GALLICHAND, J. ET BOUSLAMA, S. 2017. VOLUME OR WEIGHT SOIL SAMPLING FOR EXTRACTING MEHLICH III ELEMENTS WITH ROUTINE ANALYSES? *COMMUNICATIONS IN SOIL SCIENCE AND PLANT ANALYSIS* VOLUME: 48 ISSUE : 15 PAGES : 1753-1763
- KHIARI, L., L.E. PARENT, A. PELLERIN, A.R.A. ALIMI, C. TREMBLAY, R.R. SIMARD ET J. FORTIN. 2000. AN AGRI-ENVIRONMENTAL PHOSPHORUS SATURATION INDEX FOR ACID COARSE TEXTURED SOILS. *J. ENVIRON. QUAL.* 29 : 1561-1567.
- KIMPINSKI, J. ET SANDERSON, K. 2004. EFFECTS OF CROP ROTATIONS ON CARROT YIELD AND ON THE NEMATODES *PRATYLENCHUS PENETRANS* AND *MELOIDOGYNE HAPLA*. *PHYTOPROTECTION* 85: 13-17.
- LANDRY, C. ET AL. 2023. RAPPORT SYNTHÈSE. MANDAT IRDA DE RÉVISION DES VALEURS SCIENTIFIQUES DE RÉFÉRENCE EN FERTILISATION (MIRVRF), 2020-2023, (EN COURS DE RÉDACTION).
- MAAARO. 2010. VEGETABLE PRODUCTION RECOMMENDATIONS 2010-2011—PUBLICATION 363. MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, DE L'ALIMENTATION ET DES AFFAIRES RURALES DE L'ONTARIO. 243 PAGES.
- MDDCCL. 2016. MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES. BILAN DE PHOSPHORE : PORTRAIT DES ANNÉES 2011 À 2013. DISPONIBLE [EN LIGNE] [HTTP://WWW.ENVIRONNEMENT.GOUV.QC.CA/MILIEU_AGRICOLE/PHOSPHORE/PORTRAIT2011-2013/BILAN-PORTRAIT2011-2013.PDF](http://www.environnement.gouv.qc.ca/milieu_agri/agricole/phosphore/portrait2011-2013/bilan-portrait2011-2013.pdf) (CONSULTÉ LE 2020-06-19).
- MEHLICH, A. 1984. MEHLICH -3 SOIL TEST EXTRACTANT : A MODIFICATION OF MEHLICH-2 EXTRACTANT. *COMMUNICATIONS IN SOIL SCIENCE AND PLANTS ANALYSIS.* 15(12), 1409-1416.
- MELCC. 2020. RÈGLEMENT SUR LES EXPLOITATIONS AGRICOLES. LOI SUR LA QUALITÉ DE L'ENVIRONNEMENT. EN LIGNE : [HTTP://LEGISQUEBEC.GOUV.QC.CA/FR/SHOWDOC/CR/Q-2,%20R.%2026](http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/showdoc/cr/q-2,%20r.%2026) (CONSULTÉ LE 2020-07-02).
- N'DAYEGAMIYE, A., GIROUX, M. ET GASSER, M. O. (2007). LA CONTRIBUTION EN AZOTE DU SOL RELIÉE À LA MINÉRALISATION DE LA MO : FACTEUR CLIMATIQUE ET RÉGIES AGRICOLES INFLUENÇANT LES TAUX DE MINÉRALISATION D'AZOTE.
- NEW ZEALAND INSTITUTE FOR PLANT & FOOD RESEARCH LIMITED. 2016. N, P AND K FERTILISER RATES FOR PROCESS CARROTS. [EN LIGNE] [HTTP://WWW.PROCESSVEGETABLES.CO.NZ/ASSETS/RESEARCH/CARROTS/CARROT-BOOKLET-CARROT-FERTILISER-RECOMMENDATIONS-OCT-2016.PDF](http://www.processvegetables.co.nz/assets/research/carrots/carrot-booklet-carrot-fertiliser-recommendations-oct-2016.pdf) (CONSULTÉ LE 2020-06-15).
- PARENT, L.-É., PELLERIN, A. ET KHIARI, L. 2002. LE FLUX ET LA DYNAMIQUE DU PHOSPHORE DANS LES SOLS AGRICOLES QUÉBÉCOIS. COLLOQUE SUR LE PHOSPHORE. QUÉBEC. 27 PAGES.
- PARENT L.-É., DAFIR M. 1992. A THEORETICAL CONCEPT OF COMPOSITIONAL NUTRIENT DIAGNOSIS. *J AM SOC HORTIC SCI.* 117 (2) :239–242. DOI:10.21273/JASHS.117.2.239.
- PARENT L.-É., NATALE W. S, ZIADI N. 2009. COMPOSITIONAL NUTRIENT DIAGNOSIS OF CORN USING THE MAHALANOBIS DISTANCE AS NUTRIENT IMBALANCE INDEX. *CAN J SOIL SCI.* 89(4):383–390. DOI:10.4141/CJSS08050.
- PENNSSTATE EXTENTION. 2020. 2020/2021 MID-ATLANTIC COMMERCIAL VEGETABLE PRODUCTION RECOMMENDATIONS. 439 P.
- PETIOLA, L. 1995. EFFECT OF SOIL COMPACTNESS ON THE GROWTH AND QUALITY OF CARROT. *AGRICULTURAL SCIENCE OF FINLAND.* 4: 139-237.

- ROSEN, C. J. ET ELIASON, R. 2005. NUTRIENT MANAGEMENT FOR COMMERCIAL FRUIT AND VEGETABLE CROPS IN MINNESOTA. DEPARTMENT OF SOIL, WATER, AND CLIMATE, UNIVERSITY OF MINNESOTA.
- SALO, T., 1999. EFFECTS OF BAND PLACEMENT AND NITROGEN RATE ON DRY MATTER ACCUMULATION, YIELD AND N UPTAKE OF CABBAGE, CARROT AND ONION. AGRICULTURE AND FORESTRY. UNIVERSITY OF HELSINKI, HELSINKI, PP. 157–232.
- SANDERSON, K. ET SANDERSON, J. 2006A. POTASSIUM MANAGEMENT FOR CARROTS IN PRINCE EDWARD ISLAND. CANADIAN JOURNAL OF PLANT SCIENCE, 86 (SPECIAL ISSUE), 1405-1407.
- SANDERSON, K., ET SANDERSON, J. 2006B. PRINCE EDWARD ISLAND GROWERS CAN REDUCE SOIL PHOSPHORUS BUILDUP WHILE MAINTAINING CARROT CROP YIELD. CANADIAN JOURNAL OF PLANT SCIENCE, 86 (SPECIAL ISSUE), 1401-1403.
- SAS/STAT, VERSION 9.4 DE SAS (SYSTEM POUR WINDOWS 10x64). COPYRIGHT 2002-2012 SAS INSTITUTE INC., CARY, NC, USA.
- SAS INSTITUTE INC. 2018. SAS/STAT® 15.1 USER'S GUIDE. CARY, NC : SAS INSTITUTE INC.
- STATISTIQUE CANADA (S. D.). TABLEAU 32-10-0365-01 SUPERFICIE, PRODUCTION ET VALEUR À LA FERME DES LÉGUMES COMMERCIALISÉS. DOI : [HTTPS://DOI.ORG/10.25318/3210036501-FRA](https://doi.org/10.25318/3210036501-fra). (CONSULTÉE LE 2020-06-16)
- UNILET, S.D. LA FERTILISATION. DANS CAROTTE. [EN LIGNE] [HTTP://WWW.UNILET.FR/CULTURES/CAROTTES/CAROTTES.PHP?PAGE=FERTILISATION](http://www.unilet.fr/cultures/carottes/carottes.php?page=fertilisation) (CONSULTÉ LE 2020-07-09)
- UNIVERSITY OF MASSACHUSETTS AMHERST. 2018. NEW ENGLAND VEGETABLE MANAGEMENT GUIDE [EN LIGNE] [HTTPS://NEVEGETABLE.ORG/CROPS/CARROT-AND-PARSNIP](https://nevegetable.org/crops/carrot-and-parsnip). (CONSULTÉE LE 2020-06-16)
- WARNCKE, D.D., CHRISTENSON, D.R., JACOBS, L.W., VITOSH, M.L. ET ZANDSTRA, B.H. 1992. FERTILIZER RECOMMENDATIONS FOR VEGETABLE CROPS IN MICHIGAN, DEPARTMENT OF CROP AND SOIL SCIENCES AND DEPARTMENT OF HORTICULTURE MICHIGAN STATE UNIVERSITY, EXTENSION BULLETIN E-550B.
- WESTERVELD, S. M. 2005. NITROGEN DYNAMICS OF THE CARROT CROP AND INFLUENCES ON YIELD AND ALTERNARIA AND CERCOSPORA LEAF BLIGHTS. PH.D. THESIS, UNIVERSITY OF GUELPH, GUELPH, ON.
- WESTERVELD, S. M., McDONALD, M. R. ET McKEOWN, A. W. 2007. UTILISATION DE L'AZOTE PAR LA CAROTTE DURANT LA SAISON VÉGÉTATIVE. CAN. J. PLANT Sci. 87 : 587–592.
- WESTERVELD, S. M., McDONALD, M. R. AND McKEOWN, A. W. 2006A. CARROT YIELD, QUALITY, AND STORABILITY IN RELATION TO PREPLANT AND RESIDUAL NITROGEN ON MINERAL AND ORGANIC SOILS. HORTTECHNOLOGY 16: 286–293.
- WESTERVELD, S. M., McKEOWN, A. W. ET McDONALD, M. R. 2006B. DISTRIBUTION OF NITROGEN UPTAKE, FIBROUS ROOTS, AND NITROGEN IN THE SOIL PROFILE FOR FRESH-MARKET AND PROCESSING CARROT CULTIVARS. CAN. J. PLANT Sci. 86: 1227–1237.
- WESTERVELD, S. M., McKEOWN, A. W. ET McDONALD, M. R. 2008. RELATIONSHIP BETWEEN NITROGEN FERTILIZATION AND CERCOSPORA LEAF SPOT AND ALTERNARIA LEAF BLIGHT OF CARROT. HORTSCIENCE 43(5):1522–1527.

Annexe 1

Sommaire des données exclues de l'analyse et justifications

Code du site	Donnée exclue	Raisons justifiant l'exclusion
11	Site	Patron spatial aligné sur la droite du dispositif démontrant des rendements beaucoup plus faibles que sur le reste du site. Forte variation au niveau des populations (nombre de plants/hectare). Relation linéaire entre les rendements et la population.