



INSTITUT DE RECHERCHE
ET DE DÉVELOPPEMENT
EN AGROENVIRONNEMENT
ИИ ВСКВЕИЛИВОВИИВЕИИ
ИИ DE ДЕЛЕГОБЬЕВЕИИ

FERTILISATION DU POIS

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

FASCICULE 03 : Pois



Responsable du projet :	Christine Landry
Auteurs :	Christine Landry, Stéphanie Houde, Julie Forest-Drolet, Claude-Alla Joseph et Michèle Grenier.
Collaborateurs :	Olivier Breton-Bourgault, Lélia Anderson, Alexandre Leblanc, Anaïs Charles, Mélissa Paradis, Julie Desautels, Simon Guillemette, Anne-Mary Le Guennec.
Produit pour :	Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation
Date :	Décembre 2020 (publication mars 2021)

Fertilisation du pois. Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation du Québec (2020-2023). Fascicule 03 : Pois.

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

LE RAPPORT PEUT ÊTRE CITÉ COMME SUIT :

Landry, C., S. Houde, J. Forest-D., C.-A. Joseph et M. Grenier. 2021. Fertilisation du pois. Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation du Québec (2020-2023). Fascicule 03 : Pois. 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.
Stéphanie Houde, agr., M. Sc.
Michèle Grenier, M. Sc.
Alexandre Leblanc, biologiste, M. Sc.

RESPONSABLES DU RAPATRIEMENT DES DONNÉES : Lélia Anderson, agr., M. Sc. B. Ing.
Olivier Breton-Bourgault, agr.
Simon Guillemette, M. Sc.
Anne-Mary Le Guennec
Julie Desautels, M. Sc.

ÉTABLISSEMENT DES VALEURS SCIENTIFIQUES DE RÉFÉRENCE EN FERTILISATION :
Christine Landry, agr., biologiste, Ph. D.
Stéphanie Houde, agr., M. Sc.
Julie Forest-Drolet, M. Sc.
Claude-Alla Joseph, Ph. D.
Anaïs Charles, Ph. D.
Mélissa 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 se sont principalement appuyées 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>.

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
1.3.1	DONNÉES DU PSEFCM	10
1.3.2	DONNÉES DE CHAMBERLAND (1982)	10
1.4	DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL ET TRAITEMENTS	14
1.4.1	DONNÉES DU PSEFCM	14
1.4.2	DONNÉES DE CHAMBERLAND (1982)	16
1.5	RENDEMENTS COMMERCIALISABLES	16
1.6	ASPECTS ADDITIONNELS POUR L'INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS	18
1.6.1	VARIÉTÉS	18
1.6.2	PRÉCÉDENTS CULTURAUX	18
1.6.3	IRRIGATION	18
1.7	ANALYSE EXPLORATOIRE	18
1.8	CALCULS ET ANALYSES STATISTIQUES	19
1.8.1	DÉTERMINATION DES CLASSES DE FERTILITÉ DES SOLS	20
1.8.2	DÉTERMINATION DES DOSES OPTIMALES DE FERTILISANTS	21
1.8.3	DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL ET QUANTITÉS D'ÉLÉMENTS NUTRITIFS EXPORTÉS	22
2.	FERTILISATION AZOTÉE	24
2.1	PORTRAIT ET REPRÉSENTATIVITÉ DES DONNÉES	24
2.2	DÉTERMINATION DES DOSES AGRONOMIQUES OPTIMALES	24
2.2.1	RECHERCHE D'INDICATEURS DE FERTILITÉ DU SOL	24
2.2.2	EFFET DE LA DOSE D'AZOTE SUR LE RENDEMENT COMMERCIALISABLE	25
2.3	DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL ET EXPORTATIONS EN AZOTE	26
2.4	NITRATE RÉSIDUEL À LA RÉCOLTE	28
2.5	FERTILISATION AZOTÉE PROPOSÉE ET COMPARAISON AVEC LES RECOMMANDATIONS AU CANADA ET À L'ÉTRANGER	29
3.	FERTILISATION PHOSPHATÉE	31
3.1	PORTRAIT ET REPRÉSENTATIVITÉ DES DONNÉES	31
3.2	DÉTERMINATION DES DOSES AGRONOMIQUES OPTIMALES	31
3.2.1	RECHERCHE D'INDICATEURS DE FERTILITÉ DU SOL	31
3.2.2	EFFET DE LA DOSE DE PHOSPHORE SUR LE RENDEMENT COMMERCIALISABLE	32
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	38
4.1	PORTRAIT ET REPRÉSENTATIVITÉ DES DONNÉES	38
4.2	DÉTERMINATION DES DOSES AGRONOMIQUES OPTIMALES	38
4.2.1	RECHERCHE D'INDICATEURS DE FERTILITÉ DU SOL	38
4.2.2	EFFET DE LA DOSE DE POTASSIUM SUR LE RENDEMENT COMMERCIALISABLE	39
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 DU POIS – 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 DU POIS	12
TABLEAU 2. PORTRAIT DES SITES DES ESSAIS DE FERTILISATION AVANT LA VALIDATION DES DONNÉES	13
TABLEAU 3. DESCRIPTION DES TRAITEMENTS DES ESSAIS DE FERTILISATION AZOTÉE DU PSEFCM	15
TABLEAU 4. DESCRIPTION DES TRAITEMENTS DES ESSAIS DE FERTILISATION PHOSPHATÉE DU PSEFCM	15
TABLEAU 5. DESCRIPTION DES TRAITEMENTS DES ESSAIS DE FERTILISATION POTASSIQUE DU PSEFCM	15
TABLEAU 6. DESCRIPTION DES TRAITEMENTS DES ESSAIS DE FERTILISATION AZOTÉE, PHOSPHATÉE ET POTASSIQUE DE CHAMBERLAND (1982)	16
TABLEAU 7. BILAN DE LA VALIDATION DES DONNÉES À L'ISSUE DE L'ANALYSE EXPLORATOIRE	19
TABLEAU 8. RÉPARTITION DES BLOCS DES ESSAIS N SELON DIFFÉRENTES CLASSES DE PROPRIÉTÉS DE SOL APRÈS LA VALIDATION DES DONNÉES	24
TABLEAU 9. VALEURS CRITIQUES DES INDICATEURS DE SOLS SIGNIFICATIFS SELON LES TESTS DE CATE-NELSON POUR LES ESSAIS D'AZOTE	25
TABLEAU 10. CONCENTRATION ET EXPORTATIONS D'AZOTE DU POIS SELON LE DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL	27
TABLEAU 11. FERTILISATION AZOTÉE DU POIS – VALEURS SCIENTIFIQUES DE RÉFÉRENCE EN FERTILISATION	30
TABLEAU 12. COMPARAISON DES RECOMMANDATIONS EN AZOTE POUR LA PRODUCTION DE POIS AU CANADA ET À L'ÉTRANGER	30
TABLEAU 13. RÉPARTITION DES BLOCS DES ESSAIS P SELON DIFFÉRENTES CLASSES DE PROPRIÉTÉS DE SOL APRÈS LA VALIDATION DES DONNÉES	31
TABLEAU 14. VALEURS CRITIQUES DES INDICATEURS POTENTIELS DE SOLS SIGNIFICATIFS SELON LES TESTS DE CATE-NELSON POUR LES ESSAIS DE PHOSPHORE	32
TABLEAU 15. CONCENTRATIONS ET EXPORTATIONS DE P ₂ O ₅ DU POIS SELON LE DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL	34
TABLEAU 16. FERTILISATION PHOSPHATÉE DU POIS – VALEURS SCIENTIFIQUES DE RÉFÉRENCE EN FERTILISATION	35
TABLEAU 17. COMPARAISON DES RECOMMANDATIONS EN P ₂ O ₅ POUR LA PRODUCTION DE POIS AU CANADA ET À L'ÉTRANGER	37
TABLEAU 18. RÉPARTITION DES BLOCS DES ESSAIS K SELON DIFFÉRENTES CLASSES DE PROPRIÉTÉS DE SOL APRÈS LA VALIDATION DES DONNÉES	38
TABLEAU 19. VALEURS CRITIQUES DES INDICATEURS POTENTIELS DE SOLS SIGNIFICATIFS SELON LES TESTS DE CATE-NELSON POUR LES ESSAIS K	39
TABLEAU 20. CONCENTRATIONS ET EXPORTATIONS DE K ₂ O DU POIS SELON LE DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL	41
TABLEAU 21. FERTILISATION POTASSIQUE DU POIS – VALEURS SCIENTIFIQUES DE RÉFÉRENCE EN FERTILISATION	43
TABLEAU 22. COMPARAISON DES RECOMMANDATIONS EN K ₂ O POUR LA PRODUCTION DE POIS AU CANADA ET À L'ÉTRANGER	44

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1. RÉPARTITION GÉOGRAPHIQUE DES SITES DE POIS SELON LA SOURCE DE DONNÉES.....	9
FIGURE 2. DISTRIBUTION DES BLOCS (PSEFCM) OU DES SITES (CHAMBERLAND, 1982) DES ESSAIS DE POIS DANS LE TRIANGLE TEXTURAL.....	14
FIGURE 3. RENDEMENTS COMMERCIALISABLES SELON L'ÉLÉMENT TESTÉ, LES SITES ET LES DOSES CROISSANTES D'ENGRAIS.....	17
FIGURE 4. DÉFINITIONS DES QUADRANTS D'UN TEST DE PARTITION BINAIRE DE CATE-NELSON (1979).....	21
FIGURE 5. RÉSULTATS DES ANALYSES DE VARIANCE SUR LA RÉPONSE DE LA CULTURE AUX DOSES CROISSANTES D'AZOTE.....	26
FIGURE 6. EXPORTATIONS D'AZOTE EN FONCTION DES RENDEMENTS DU POIS, EXPRIMÉS SELON (A) LES VARIÉTÉS ET (B) LE DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL.....	28
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 GROUPES DE TEXTURES DE SOL ET DES DOSES D'AZOTE DANS LES ESSAIS DE POIS DU PSEFCM.	29
FIGURE 8. RÉSULTATS DES ANALYSES DE VARIANCE SUR LA RÉPONSE DE LA CULTURE AUX DOSES CROISSANTES DE PHOSPHORE.....	33
FIGURE 9. EXPORTATIONS DE P ₂ O ₅ EN FONCTION DES RENDEMENTS DU POIS, EXPRIMÉS SELON (A) LES VARIÉTÉS ET (B) LE DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL.....	34
FIGURE 10. RÉSULTATS DES ANALYSES DE VARIANCE SUR LA RÉPONSE DE LA CULTURE AUX DOSES CROISSANTES DE POTASSIUM	40
FIGURE 11. EXPORTATIONS DE K ₂ O EN FONCTION DES RENDEMENTS DU POIS, EXPRIMÉS SELON (A) LES VARIÉTÉS ET (B) LE DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL.....	42

1. PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES ESSAIS ET DES ANALYSES

1.1 Provenance des données

Les données ayant servi au calcul des VSRF pour la culture du pois sont issues d'essais du PSEFCM, additionnés d'essais réalisés de 1978 à 1980 par le chercheur Émile Chamberland (MAPAQ, projet no. 830-50). Pour être valorisées, les jeux de données devaient satisfaire aux critères suivants : la randomisation et la répétition des traitements, l'inclusion d'un témoin sans apport de l'élément testé (ex. 0 N + PK) et l'utilisation exclusive d'engrais minéraux.

1.2 Localisation des sites

Les 16 essais du PSEFCM du pois ont été menés de 2009 à 2012 dans les régions de Montréal et de la Montérégie (Figure 1). Les données de localisation GPS de ces sites sont présentées au Tableau 1. Les 14 essais supplémentaires ont couvert les régions de la Capitale-Nationale, de Chaudière-Appalaches, de la Montérégie et du Centre-du-Québec (Figure 1). La géolocalisation la plus précise pour ces données est la municipalité de l'essai (Tableau 2). L'ajout de données à celles du PSEFCM a été très bénéfique car elle a permis entre autres une grande amélioration de la répartition des essais à travers la province.

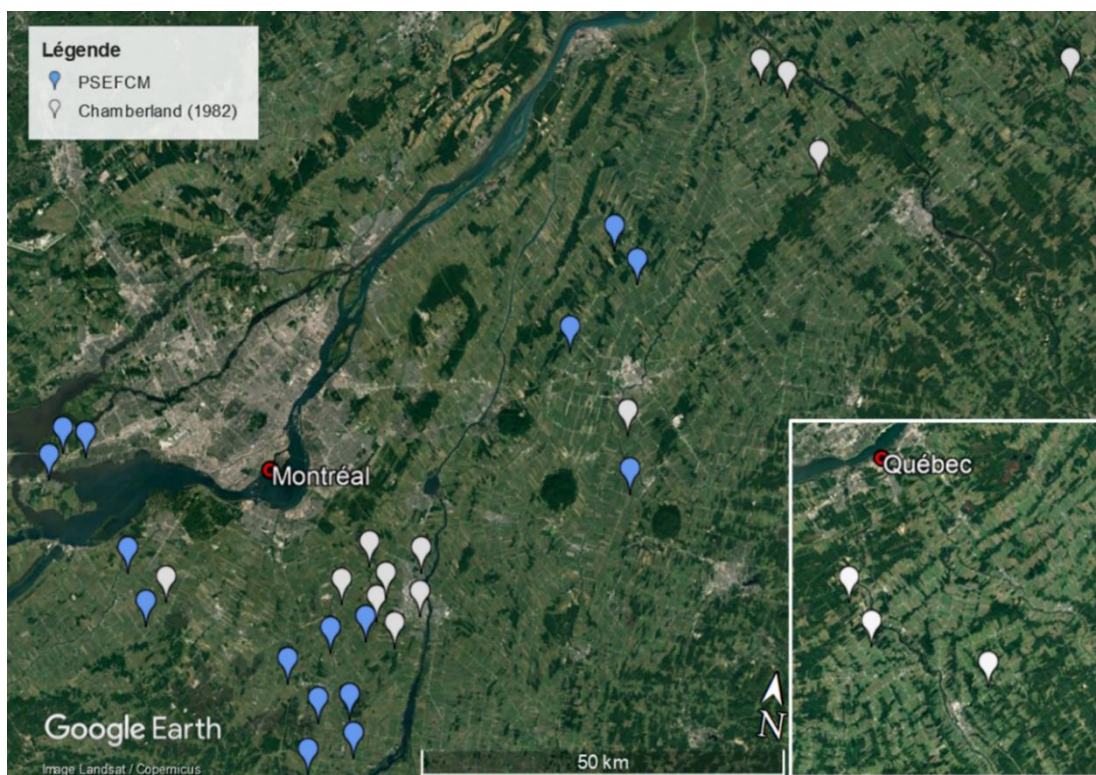


Figure 1. Répartition géographique des sites de pois selon la source de données. L'emplacement des repères est approximatif et vise seulement à représenter la répartition géographique des sites sur le territoire du Québec.

1.3 Propriétés physico-chimiques des sols

Une synthèse comparative des essais en fonction de la source des données est présentée au Tableau 2. Celle-ci permet de valider la mise en commun des différents jeux de données pour les principaux aspects agronomiques, géographiques et expérimentaux. 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.

1.3.1 Données du PSEFCM

Les informations issues des cartes pédologiques indiquent que les essais ont été conduits sur des unités pédologiques variées (Tableau 1). Selon les informations fournies dans les tables pédologiques, ainsi que les commentaires fournis par les collaborateurs, les sites de réalisation des essais seraient facilement sujets aux problèmes de compaction et de drainage, ce qui n'est pas idéal pour le bon développement de la culture. En effet, la combinaison d'un nivelage adéquat, d'un drainage de surface efficace, de même qu'une structure de sol permettant un enracinement profond est nécessaire pour une croissance optimale du pois (FQPFLT, 2018).

Les analyses de sol (0-20 cm) montrent que 63,2 % des blocs des sites étaient établis sur des sols à texture fine (G1) et 28,4 % sur des sols à texture grossière (G3). Sur le reste des sites (8,4 %), les classes texturales variaient entre les blocs d'un même site. La matière organique du sol a varié de 1,9 à 5,9 % avec 43 % des sites hors de la plage optimale de 3 à 5 % (CRAAQ, 2010; Tableau 1). Sur l'ensemble des essais, les sols avaient des pH_{eau} fortement acides à neutres, variant de 5,3 à 7,1 (Cescas, 1978). Ces sols à tendance acide peuvent présenter un risque de diminution de l'absorption des nutriments par la culture.

Les seuils de richesse des sols en P_{M_3} et K_{M_3} ont été fixés à 200 kg/ha. Pour le K, le seuil est plus bas que celui des autres cultures du PSEFCM (à l'exception du haricot) établi à 400 kg K_{M_3} /ha. Le pois, en tant que légumineuse, est sensible à la salinité du sol (Aguiar *et al.*, 1998) pouvant limiter la nodulation et la productivité (Saadallah *et al.* 2003). Ces seuils en P et en K ont servi à déterminer les doses d'engrais appliquées par traitement (voir section 1.4.1).

1.3.2 Données de Chamberland (1982)

La répartition des sites dans les différentes classes texturales est présentée à la Figure 2. Ces essais étaient répartis sur des sols de textures moyennes à grossières ayant des teneurs en matière organique variant entre 1,7 à 5,5 % (Tableau 1). La culture du pois peut être effectuée sans problème sur une multitude de types de sol. Il est cependant important de bien adapter le travail du sol en fonction de la texture (FQPFLT, 2018).

La mesure de l'acidité active des sols montre que pour neuf des 14 sites, les pH_{eau} étaient compris entre 5,0 et 6,0, ce qui est plus faible que l'intervalle de pH_{eau} idéal (6,1 à 6,5,) pour la culture du pois (MAAARO 2010). En effet, l'acidité du sol peut nuire à l'absorption des éléments majeurs (N, P et K) et mineurs (ex. Ca, Mg; Brady et Weil, 1984, CRAAQ, 2010). Hormis le pH_{eau} , les méthodes de caractérisation chimique des sols de ces essais ont différé de celles utilisées dans le PSEFCM. De ce fait, l'ajout de ce jeu de données à celui du PSEFCM a nécessité des conversions en utilisant des équations existantes dans la littérature ou fournies par des laboratoires accrédités et/ou chercheurs du Québec.

Pour ces essais, la teneur en matière organique du sol a été déterminée par la méthode Walkley-Black (MO_{WB}). Afin de pouvoir ajouter le jeu de données à celui du PSEFCM où la méthode de détermination par perte au feu (MO_{PAF}) a été utilisée, la MO_{WB} a été convertie en utilisant l'équation du Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (CEAEQ, 2003) :

$$MO_{PAF} (\%) = 0,9932 \times MO_{WB} (\%) + 0,587$$

Quant au P, l'extraction a été effectuée par la méthode Bray II. Les concentrations en P_{BrayII} ont donc été converties en P_{M3} en utilisant l'équation de N. Samson, membre de l'équipe de recherche du professeur Léon-Étienne Parent (Université Laval, données non publiées) :

$$P_{M3} = 0,0009 \times (P_{BRAY_II})^2 + 0,4306 \times P_{Bray-II}$$

Cette équation a été préférée à l'équation de Khiari *et al.* (2000) et celle de Tran *et al.* (1990), puisque ces dernières pouvaient parfois donner des valeurs négatives lorsque les valeurs de $P_{Bray-II}$ étaient faibles. Après conversion, les sols avaient des teneurs en P_{M3} de 7 à 171 ppm (moyenne de 52 ppm). Ces sols sont relativement moins pourvus en P que ceux du PSEFCM (moyenne de 94 ppm). D'une part, c'est une bonification importante du jeu de données. Notons que les données de Chamberland (1982) ne comportaient pas les teneurs en Al des sols. Afin de pouvoir estimer les indices de saturation en phosphore (ISP_1), les teneurs en Al (ppm) ont été tirées de l'Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec (Tabi *et al.*, 1990) selon les séries de sol et les textures (lorsque disponibles). La série de sol Leeds fait exception, car elle ne figurait pas dans Tabi *et al.* (1990). Pour cette série, les teneurs en Al sont issues de données plus récentes (2013 à 2015) de résultats d'analyses de sol provenant de la même municipalité et de la même classe texturale. Il est à noter que pour une même série de sol, les teneurs en Al varient peu en comparaison d'autres éléments dans la couche de surface pour une même classe texturale et varie très peu dans le temps étant peu influencée par l'historique des cultures (M. Leblanc, communication personnelle, 2020).

La teneur en K des sols a été dosé par la méthode à l'acétate d'ammonium (K_{AA} ; Chamberland, 1982). Quelques équations de conversion de K_{AA} vers K_{M3} ont été recensées dans la littérature (Cornell, 2020, Culman *et al.* 2019, Gartley *et al.*, 2002). Cependant, selon Ziadi et Sen Tran (2008) de même que le laboratoire d'analyse et de recherche Agro-Enviro Lab, le K_{AA} et le K_{M3} sont équivalents (Deslauriers, 2014; Ziadi et Sen Tran, 2008). Pour cette raison, il a été considéré que $K_{AA} \approx K_{M3}$. Après conversion, les teneurs en K_{M3} s'évaluaient entre 33 à 160 ppm (moyenne de 72 ppm), ce qui est également plus faible que la moyenne du PSEFCM (133 ppm).

En somme, l'ajout de ces données a permis d'améliorer la représentativité du jeu de données en raison de l'augmentation du nombre d'observations en sols à textures plus légère et de la proportion des sites pauvres en P et en K.

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

Source des données (Institution)	No. Site	Série de sol, texture ¹	Lat.	Long.	Argile %	Essais N		Essais P		Essais K	
						MO ²	Rendement commercialisable ⁴	Teneur en P du sol ³	Rendement commercialisable ³	Teneur en K du sol ³	Rendement commercialisable ⁴
						Moy. %	Moy. kg/ha	P _{M3} kg/ha	Moy. kg/ha	K _{M3} kg/ha	Moy. kg/ha
Programme de soutien aux essais de fertilisation des cultures maraîchères (PSEFCM, MAPAQ)	1	Aston, LS	45,49	-72,93	40	4,1	4 657	230	4 603	401	4 520
	2	Sainte-Rosalie, LA lourd	45,24	-73,41	29	3,5	4 191	204	4 467	324	4 032
	3	Saint-Urbain, ALi	45,26	-73,35	42	5,6	3 105	109	3 152	542	3 133
	4	Sainte-Rosalie, LA lourd	45,24	-73,41	31	3,1	2 903	189	3 114	302	3 000
	5	Sainte-Rosalie, AS à LA	45,29	-73,78	50	4,2	1 630	100	1 648	400	1 684
	6	Sainte-Rosalie, A	45,3	-73,78	54	4,3	8 675	155	8 660	450	8 730
	7	Lacolle LSF/Saint-Valentin, LSF	45,11	-73,34	17	3,0	5 814	191	5 696	196	5 612
	8	Lacolle LSF/Saint-Valentin, LSF	45,11	-73,34	19	3,6	6 628	182	6 486	364	6 621
	9	Lacolle LSF/Saint-Valentin, LSF	45,11	-73,34	19	2,0	4 593	69	4 441	124	4 553
	10	Joseph LSF/Massueville, LS	45,09	-73,34	12	2,4	6 686	213	7 597	412	7 296
	11	St-Aimé variante non calcaire, L	45,74	-72,97	20	2,3	6 117	180	6 727	230	6 471
	12	St-Hyacinthe, LLi lourd	45,78	-73,02	33	3,6	2 922	486	2 955	374	2 993
	13	Massueville, SFL	45,78	-73,02	6	2,6	4 397	247	4 274	221	4 674
	14	Saint-Bernard, L/Chicot, LSF/Châteauguay, LA	45,43	-73,93	32	2,4	3 624	179	3 678	394	3 677
	15	Saint-Bernard, L/Chicot, LSF/Châteauguay, LA	45,43	-73,93	25	3,3	5 275	181	5 221	312	5 336
	16	Châteauguay LA/Macdonald LA	45,43	-73,93	30	2,8	5 782	178	5 595	281	5 658
Chamberland (MAPAQ)	17	Morin, S	nd	nd	4	4,0	2 883	94	3 254	74	2 712
	18	Leeds, LS	nd	nd	12	nd	6 017	39	5 584	178	5 923
	19	Neubois, L	nd	nd	22	nd	3 516	40	3 487	135	4 271
	20	Neubois, LLi	nd	nd	16	3,6	1 955	17	2 220	119	2 306
	21	Sainte-Rosalie, LA	nd	nd	30	3,6	3 831	181	3 987	359	4 716
	22	Saint-Blaise, LA	nd	nd	26	3,7	6 149	56	6 178	132	6 096
	23	Saint-Blaise, L	nd	nd	21	3,2	2 912	28	3 084	195	3 315
	24	Saint-Blaise, LA	nd	nd	22	2,9	3 611	43	3 327	146	3 402
	25	Saint-Blaise, LA	nd	nd	18	2,7	3 357	57	3 214	146	3 381
	26	Saint-Blaise, LA	nd	nd	31	3,7	8 577	56	8 047	132	8 312
	27	Sorel; Saint-Amable, LS	nd	nd	14	6,0	7 076	319	7 370	116	7 216
	28	Saint-Jude, S	nd	nd	3	2,3	8 699	383	10 228	211	10 125
	29	Pierreville, LS	nd	nd	7	4,3	3 349	215	2 428	196	3 220
	30	Pierreville, LS	nd	nd	7	3,8	5 947	115	4 939	165	5 650
Tous les sites							4 829	158	4 855	254	4 954

¹ Information théorique retracée par les systèmes d'information géographique, analyse spatiale à partir des fichiers numériques de Pédologie (Banque des sols), MAPAQ, IRDA. A : argile; ALi : argile limoneuse; AS : argile sableuse; LA : loam argileux; LS : loam sableux; LLi : loam limoneux; LSF : loam sableux fin; L : loam; SFL : sable fin loameux; S : sable; nd : non disponible.

² MO : matière organique analysée par perte au feu.

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

⁴ Le rendement commercialisable du Pois de 2009 à 2012 au Québec était de 3500 à 4700 kg/ha (Statistique Canada, s.d.).

Tableau 2. Portrait des sites des essais de fertilisation avant la validation des données

	PSEFCM			Chamberland (1982)	
Nombre de sites <i>Total, avant validation</i>	16			14	
Période	2009 à 2012			1978 à 1980	
Régions administratives	Montréal Montréal			Capitale-Nationale Chaudière-Appalaches Montréal Centre du Québec	
Période(s) de semis	Fin avril à mi-juin			Fin mai à début juin	
Durée moyenne des essais	58 jours			64 jours	
Doses testées (kg/ha) <i>L'intervalle testé varie également en fonction des sites et des années.</i>	N	0 à 90		N	0 à 30
	P ₂ O ₅	0 à 120		P ₂ O ₅	0 à 60
	K ₂ O	0 à 120		K ₂ O	0 à 90
Classes texturales représentées	Prédominance de G1 et de G3, quelques G2			Prédominance de G2 et de G3, quelques G1	
P _{Mehlich-3} moyen des sols	94 ppm			52 ppm	
ISP ₁ moyen des sols	9,1 %			4,8 % ¹	
K _{Mehlich-3} moyen des sols	133 ppm			73 ppm	
Matière organique du sol	2,8 %			3,1 %	
pH _{eau} du sol	6,1			5,9	
Structure des unités expérimentales	Dispositif en tiroir avec l'essai (N, P ou K) en parcelle principale et la dose testée en parcelle secondaire. - 3 répétitions			<u>Deux dispositifs répertoriés :</u> 1) Blocs complets aléatoires comportant 10 traitements (doses croissantes de N, P et K) - 2 à 4 répétitions 2) Plan en tiroir avec l'espacement entre les rangs comme facteur principal (2 trts) et la fertilisation comme facteur secondaire (10 trts) - 2 répétitions	
Variétés culturales	Crescendo	Hacienda	Spring	Cameo	Canner 69-190
	Durango	Lil' Mo	Tonic	Century	Green Giant
	Estencia	Romaine	Trompet	Mini	Rallye
	Freezer	Solution			
Espacement entre-rang	15 à 19 cm, selon les sites			Selon les variétés : 37,5 cm (var. Mini) 75 cm (var. Green Giant) 10 et 18 cm (var. Rallye, Canner 69-190 et Cameo)	
Application des engrais	À la volée et incorporés			À la volée et incorporés	
Précédents culturaux	Soya, blé, maïs, plantes fourragères (fléole et dactyle)			nd	
Irrigation	Non irrigué ou information non disponible			L'article de Chamberland (1982) sous-entend que les essais ne sont pas irrigués	
Évaluation post-récolte	Tri en post-récolte effectué à quatre sites seulement			Aucune évaluation post-récolte n'a été prévue au protocole	

¹ Les concentrations de Al_{M3} (ppm) ont été estimées à partir des séries de sols de l'*Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec* (Tabi *et al.*, 1990), par série de sol ou par texture, à l'exception de la série de sol Leeds pour laquelle des teneurs en Al_{M3} provenant d'analyses de sol entre 2013 et 2015 ont été choisies.

nd, information non disponible.

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 deux autres éléments complémentaires étant fixés au 3^e niveau de traitement de chaque élément afin qu'ils ne soient pas limitants (ex. dans les essais N, des doses constantes de P et de K étaient apportées correspondant aux doses T7 et T11 de P et K, respectivement).

1.4.1.1 Essais N

Les doses testées sont présentées au Tableau 3. Les engrais ont été appliqués à la volée avant le semis et incorporés au râteau. Aucun fractionnement n'a été prévu, bien que cette pratique soit recommandée lorsque les doses sont élevées.

Tableau 3. Description des traitements des essais de fertilisation azotée du PSEFCM

Essais N			Dose de N (kg/ha)			
Années	Nbre de sites	Mode et période d'application	T1	T2	T3	T4
2009-2012	16	À la volée avant semis	0	30	60	90

1.4.1.2 Essais P

Les doses de P₂O₅ testées sont présentées au Tableau 4. À l'instar des essais N, la totalité des doses était apportée à la volée avant le semis et incorporée. Dix sites ont reçu les fortes doses, contre six qui ont reçu les faibles.

Tableau 4. Description des traitements des essais de fertilisation phosphatée du PSEFCM

Essais P				Dose de P ₂ O ₅ (kg/ha)			
Années	Nbre de sites	Teneur en P du sol	Mode et période d'application	T5	T6	T7	T8
2009-2012	10	≤ 200 kg P _{M3} /ha	À la volée avant semis	0	30	60	120
2009-2012	6	> 200 kg P _{M3} /ha	À la volée avant semis	0	20	40	80

1.4.1.3 Essais K

Les doses de K₂O testées sont présentées dans le Tableau 5. À l'instar des essais N et P, la totalité de la dose était apportée en entier avant le semis et incorporée. Une majorité de sites a reçu les faibles doses en raison de leur richesse en K_{M3}.

Tableau 5. Description des traitements des essais de fertilisation potassique du PSEFCM

Essais K				Dose de K ₂ O (kg/ha)			
Années	Nbre de sites	Teneur en K du sol	Mode et période d'application	T9	T10	T11	T12
2009-2012	3	≤ 200 kg K _{M3} /ha	À la volée avant semis	0	40	80	120
2009-2012	13	> 200 kg K _{M3} /ha	À la volée avant semis	0	30	60	90

1.4.2 Données de Chamberland (1982)

1.4.2.1 Essais NPK

Les essais de Chamberland (1982) comportent dix traitements, incluant le témoin sans engrais (0N-0P-0K) (Tableau 6). Le témoin sans engrais (T1, non présenté) n'a pas été retenu pour l'analyse, tandis que les essais de N, P et K ont été évalués par rapport aux témoins T2 (0N-P-K), T5 (N-0P-K) et T8 (N-P-0K) respectivement. Les engrais ont été apportés à la volée puis incorporés avant le semis. Le choix des doses reposait sur l'application de 0,5, 1 et 1,5 fois les recommandations du Conseil des productions végétales du Québec (CPVQ) en 1980 (Chamberland, 1982).

Tableau 6. Description des traitements des essais de fertilisation azotée, phosphatée et potassique de Chamberland (1982)

Traitements	Dose appliquée (kg/ha) Chamberland (1982)		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
T2	0	40	60
T3	15	40	60
T4	30	40	60
T5	15	0	60
T6	15	20	60
T7	15	60	60
T8	15	40	0
T9	15	40	30
T10	15	40	90
Mode d'application	À la volée et incorporé avant le semis		

1.5 Rendements commercialisables

Les rendements commercialisables des essais N, P et K étaient au moins égaux aux rendements de référence de Statistique Canada pour les années 2009 à 2012 (3 500 à 4 700 kg/ha; Figure 3). Les sites ayant des rendements singulièrement sous les rendements de référence (sites no 4, 5 et 12) ont été exclus lors de l'analyse exploratoire. Lors de la récolte, les plants étaient battus et nettoyés. Seulement quatre sites ont enregistré des pertes sur les rendements commercialisables, alors qu'aux autres sites, les pertes ont été jugées trop faibles pour être calculées. Pour les quatre sites avec des pertes plus importantes, celles-ci sont en moyenne d'environ 5 %. À titre comparatif, au Québec entre 2012 et 2015, la proportion de la récolte commercialisée variait entre 93,5 et 100 % (MAPAQ, 2017).

Pour les données de Chamberland, seuls les rendements commercialisables étaient disponibles. Par conséquent, il n'a pas été possible de calculer le pourcentage de pertes par rapport aux rendements totaux. Les rendements obtenus pour ces essais varient majoritairement entre 3 000 et 6 500 kg/ha (1^e et 3^e quartiles) avec une moyenne de 5 000 kg/ha.

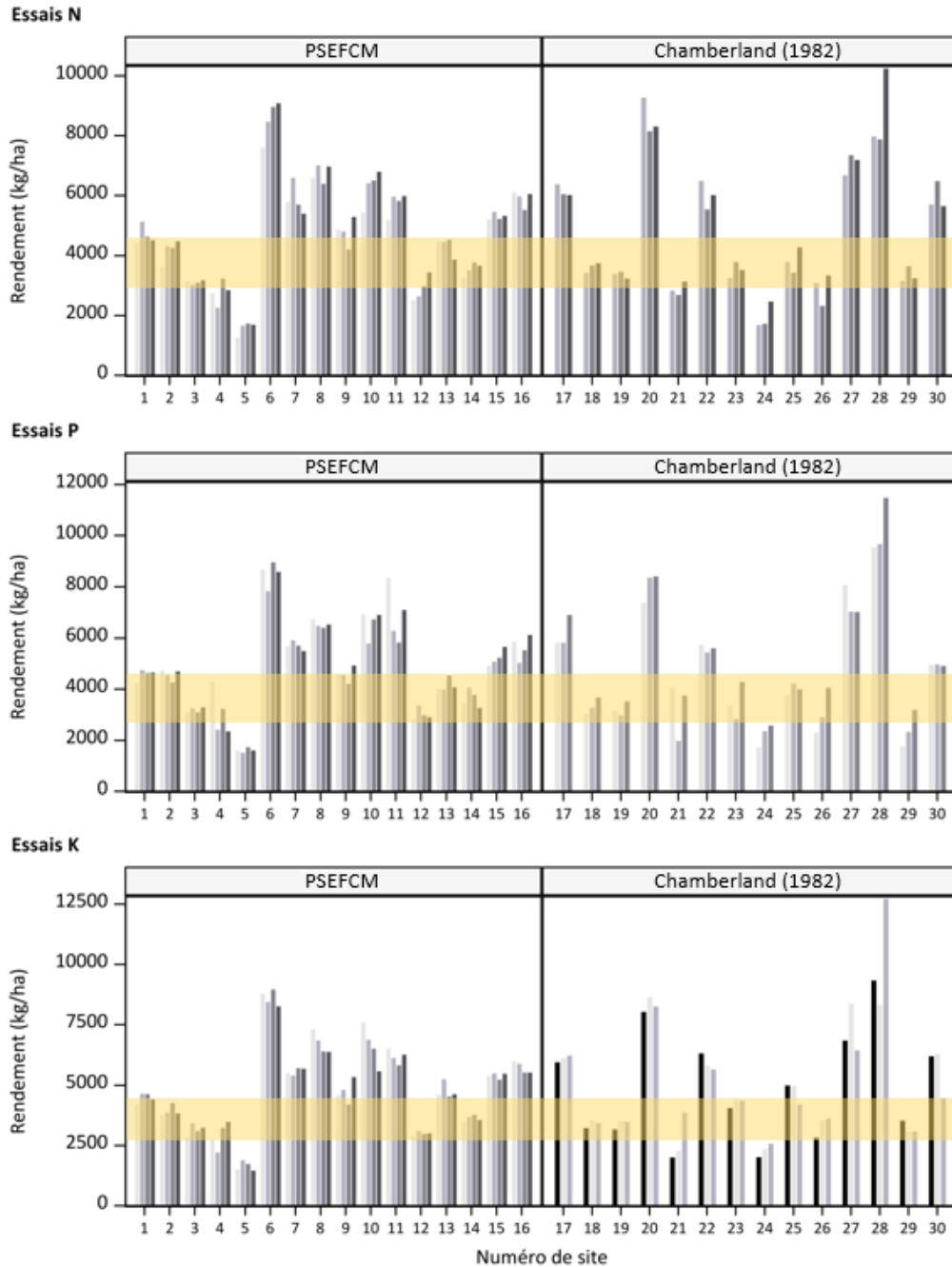


Figure 3. Rendements commercialisables selon l'élément testé, les sites et les doses croissantes d'engrais. La bande jaune illustre les rendements de référence pour la période des essais du PSEFCM (Statistiques Canada). Aucun rendement de référence n'a été retrouvé pour les années 1978 à 1980. PSEFCM : Programme de soutien aux essais de fertilisation des cultures maraîchères. Consulter la section 1.4 pour connaître les doses testées

1.6 Aspects additionnels pour l'interprétation des résultats

1.6.1 Variétés

Dix-sept (17) variétés différentes de pois (onze dans le PSEFCM et six dans les données de Chamberland, 1982) ont été testées. Ainsi, il n'est pas possible d'étudier l'interaction entre la dose et la variété culturale sur le rendement, au vu de l'effet confondant entre les sites et les variétés. De plus, puisque aucune variété n'est commune entre les essais du PSEFCM et ceux de Chamberland (1982), il pourrait y avoir un effet confondant quant à la source des données.

1.6.2 Précédents cultureaux

Pour les essais de Chamberland (1982), aucune information n'était disponible sur les précédents cultureaux. Les essais du PSEFCM, quant à eux, ont été réalisés sur des retours de maïs sucré, de maïs-grain, de soya, de blé ou d'un mélange de dactyle et de fléole des prés. Cependant, l'influence du précédent cultural sur les besoins en N du pois n'a pu être analysée que sur les retours de maïs-grain par rapport à l'ensemble des sites, puisque les autres précédents cultureaux étaient présents sur un nombre insuffisant de sites. L'analyse de variance n'a révélé aucun effet de la dose de N sur les rendements lorsque le pois était cultivé sur un retour de maïs-grain.

1.6.3 Irrigation

Les essais de Chamberland (1982) ne contenaient aucune information sur l'irrigation. Dans les essais du PSEFCM, la majorité des sites (56 %) n'a pas été irriguée, alors que l'information n'était pas disponible pour le reste. Bien que l'irrigation puisse permettre une amélioration de la qualité et du rendement dans les régions plus arides (Alberta Agriculture and Forestry, 2016), elle n'est pas pratique courante au Québec, puisque le climat est humide (Environnement Canada, 2020). La période critique d'apport en eau survient lors de la floraison et durant le développement des gousses (Alberta Agriculture and Forestry, 2016). Seulement 2 % des surfaces cultivées en pois étaient irriguées en 2014 (FQPFLT, 2018).

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 ont été 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 analysés, 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 7. Pour le PSEFCM, environ 75 % des données ont été validées après l'analyse exploratoire, tandis que le reste a été identifié comme étant expérimentalement biaisé, et par conséquent, a été exclu des analyses. Les problématiques rencontrées étaient majoritairement des rendements anormalement faibles probablement dû à un manque d'eau, des rendements anormalement élevés, des problématiques de terrain affectant le rendement ou encore la présence d'oies qui ont affecté la population et le rendement des parcelles. Pour les données de Chamberland (1982), 92 % des données ont été validées. N'ayant aucune photo, commentaire, ou observation consignée, l'évaluation des données de Chamberland a reposé sur un examen visuel du patron de rendement par bloc. Les résultats du test de régression robuste du logiciel SAS 9.4 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA) ont été considérés. Pour les sites qui comprenait deux espacements de rangs à l'étude (sites no 18 et 19), la moyenne des rendements des deux espacements, pour une même dose d'engrais, a été retenue comme variable-réponse. La liste des données exclues lors de la validation des données est disponible en annexe.

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

Essais	Source	Jeu de données initial		Données exclues		Jeu de données final	
		Sites	Données	Sites	Données	Sites	Données
N	PSEFCM	16	285	3	63	13	222
	Chamberland (1982)	14	150	1	12	13	138
	Total	30	435	4	75	26	360
P	PSEFCM	16	288	3	74	13	214
	Chamberland (1982)	14	150	1	12	13	138
	Total	30	438	4	86	26	352
K	PSEFCM	16	285	3	64	13	221
	Chamberland (1982)	14	150	1	12	13	138
	Total	30	435	4	76	26	359

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

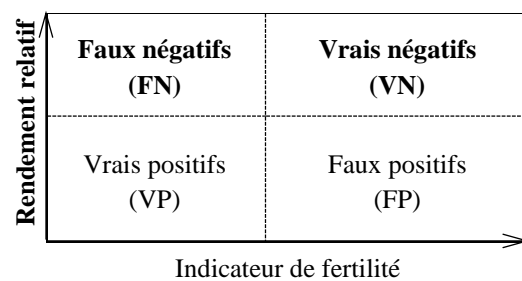


Figure 4. Définitions des quadrants d’un test de partition binaire de Cate-Nelson (1979).

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 observés entre les rendements produits en grandes surfaces en contexte de production et ceux obtenus en parcelles de recherche. Tel qu’expliqué précédemment pour le rendement relatif, le ROM permet également d’atténuer les effets de 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 des traitements permettant de déterminer les doses agronomiques optimales menant aux meilleurs rendements. Il est important de souligner qu'en raison de la considération des rendements sur une base relative (ROM), le test de Student permet de faire une comparaison multiple des moyennes des traitements entre elles sans tenir compte de l'effet de la fertilisation par rapport au témoin. Ainsi, l'absence de différence significative entre les traitements ne traduit pas nécessairement une absence de différence par rapport au témoin. Le calcul des intervalles de 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 numérique 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.). Ainsi, seuls les pois, donc sans les gousses, ont été considérés comme biomasse d'exportation puisque le pois est battu au champ. Le feuillage et les gousses demeurent au champ. Dans les essais du PSEFCM, puisque ceux-ci portaient sur le pois de transformation (conserverie et congélation), les exportations auraient dû être calculées avec le rendement total, car le classement s'effectue en post-récolte. Toutefois, pour les données provenant des essais de Chamberland (1982), seuls les rendements commercialisables étaient disponibles. Les pertes (rendement total – rendement commercialisable) étant minimales dans cette culture (< 5 %), ces données ont été considérées pour le calcul des exportations afin de valoriser un maximum de données.

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

S^n , 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.*, 2001b). 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 du nombre de blocs selon différentes propriétés de sol est présentée au Tableau 8. Tel que discuté précédemment, plusieurs analyses de sols sont inconnues pour les données de Chamberland (1982). Le pH_{eau} (0-20 cm) des sols se situent entre 5,0 et 7,1, ce qui se situe dans l'intervalle acceptable pour le pois (Hartmann, 1988), bien que l'acidité des sols nuise au développement des nodules (Chemining'wa et Vessey, 2006). Dans les deux groupes de textures de sols, plus de la moitié des sites ont un taux de matière organique (méthode Walkley-Black; MO_{WB}; 0-20 cm) inférieur à 4 %. De plus, près de la moitié des sites (45 %) ont une teneur en nitrate au semis (0-30 cm) inférieures à 10 ppm. Toutefois, il faut mentionner que les analyses du nitrate au semis (0-30 cm) sont manquantes pour 36 % des blocs. La teneur en argile des sols est pour la plupart inférieure à 30 %, alors que les groupes de textures représentés sont à 48 % des G1, 16 % des G2 et à 36 % des G3. Bien que le pois puisse croître sans problème sur différents types de sol, les sols légers, fertiles et bien drainés sont à favoriser pour une pleine expression du rendement (FQPFLT 2018; NRCS 2012). Les sols sont propices à l'obtention d'une réponse de la culture à la fertilisation azotée.

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

pH _{eau}		Matière organique ²			Nitrate au semis (0-30 cm)		Groupe de textures ³		Argile	
Seuil ¹	Bloc (%)	Seuil (%)	G1 ---- Bloc (%) ---	G2-G3	Seuil (ppm)	Bloc (%)	Bloc (%)	Seuil (%)	Bloc (%)	
< 5,0	0	< 3	29	37	0 – 5	19	G1	48	≤ 30	77
5,1 – 5,5	18	3 – 4	36	30	5 – 10	26	G2	16	> 30	23
5,6 – 6,0	34	4 – 5	24	14	10 – 20	12	G3	36	-	-
6,1 – 6,5	32	> 5 %	11	6	20 – 30	5	-	-	-	-
6,6 – 7,3	16	nd	-	13	> 30	2	-	-	-	-
> 7,4	0	-	-	-	nd	36	-	-	-	-

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

² PAF : dosé par la méthode de perte au feu; nd : non disponible.

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

2.2 Détermination des doses agronomiques optimales

2.2.1 Recherche d'indicateurs de fertilité du sol

Plusieurs variables de sol reconnues dans la littérature scientifique peuvent avoir une influence sur la réponse des cultures à la fertilisation azotée et ainsi devenir des indicateurs de fertilité. Le potentiel de plusieurs indicateurs à expliquer la réponse à la fertilisation a donc été vérifié avec le test de Cate-Nelson (1971) : la teneur en nitrate (N-NO₃) au semis (0-30 cm), la teneur en matière organique et la teneur en argile (0-20 cm). Lorsque possible, ces indicateurs ont été également testés à l'intérieur des groupes de textures G1, G2 et G3. Comme les données de Chamberland (1982) étaient incomplètes pour certaines propriétés de sol, seuls les indicateurs dont

les données étaient disponibles à l'ensemble des sites ont été considérés. Pour alléger la présentation des résultats, seuls les tests dont la valeur de P est inférieure à 0,12 sont présentés (Tableau 9). Les modèles ont été sélectionnés afin de maximiser leur sensibilité, leur spécificité et leur précision, en plus de présenter un rendement relatif (RRel) supérieur à 70 %. Les valeurs critiques obtenues sont ensuite utilisées pour les analyses de variance en tant que seuils agronomiques de réponse.

Selon le test de Cate-Nelson, dans les sols sableux (G3), seule la teneur des sols en N-NO₃ au semis (0-30 cm) s'est avéré un potentiel indicateur de fertilité pour le N. Suivant le test de Cate-Nelson, les valeurs critiques observées du Tableau 9 ont été utilisées comme « valeurs seuils » dans les analyses de variance.

Tableau 9. Valeurs critiques des indicateurs de sols significatifs selon les tests de Cate-Nelson pour les essais d'azote

Indicateur de sol	Groupes de textures ¹	Valeur critique	RRel ² (%)	Sensitivité	Spécificité	p ³
N-NO ₃ au semis 0-30 cm	G3	12,5 ppm	78	0,48	0,90	0,055t

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 t : tendance à $P < 0,12$.

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

Les résultats des analyses de variance (ANOVA) de l'essai N du pois sont présentés à la Figure 5. Les ROM se situant et s'étendant à droite de la ligne rouge (ROM > 1) témoignent d'une augmentation de rendement suivant un apport d'engrais, par rapport à une parcelle témoin non fertilisée. Inversement, les ROM à gauche de cette ligne (ROM < 1) témoignent d'une diminution de rendement. Tel que mentionné précédemment dans la section 1.8.2, un test de comparaison multiple des moyennes permet de sélectionner le meilleur traitement. De plus, en absence de différences significatives entre les traitements, les 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.

En premier lieu, une ANOVA a été effectuée sans indicateur potentiel de fertilité, soit en considérant l'ensemble des observations ($n = 275$; Figure 5A). En second lieu, les ANOVA ont été effectuées de part et d'autre des seuils significatifs des indicateurs identifiés par le test de Cate-Nelson (Figure 5B). Seuls les résultats des ANOVA permettant l'interprétation de la réponse de la culture à l'engrais sont présentés à la Figure 5.

Le modèle sans indicateur (Figure 5A) révèle que l'augmentation de la dose n'a pas permis d'augmenter le ROM de façon significative. En d'autres termes, on observe une équivalence entre les gains de rendements peu importe la dose de N appliquée. En considérant les intervalles de confiance des ROM, on constate que ceux-ci se situent entre 0,98 et 1,13. Ainsi, bien que l'apport de N ait engendré jusqu'à 13 % de gain par rapport au témoin non fertilisé (Figure 5), la réponse a été très variable. Le risque de perte de rendement a été très faible avec la plus petite dose (2 %).

Le modèle par texture (Figure 5B) permet de raffiner l'interprétation de la réponse du pois aux apports en N selon la texture du sol. Une fois de plus, les gains de rendements sont équivalents peu importe la dose de N appliquée. La grande variabilité observée pour les sols du groupe G2 peut s'expliquer par le faible nombre

d'observations (n = 40) dans cette catégorie, qui diminue la précision des intervalles de confiance. Puisque les intervalles de confiance croisent la valeur de ROM = 1, on constate que, dans certains cas, les parcelles non fertilisées peuvent atteindre des rendements équivalents aux parcelles fertilisées (Figure 5).

Considérant ces résultats, la dose unique de 15 kg N/ha serait suffisante pour maximiser les rendements et minimiser les coûts dans la culture du pois, bien que la dose 0 N pourrait être mentionnée dans la recommandation également.

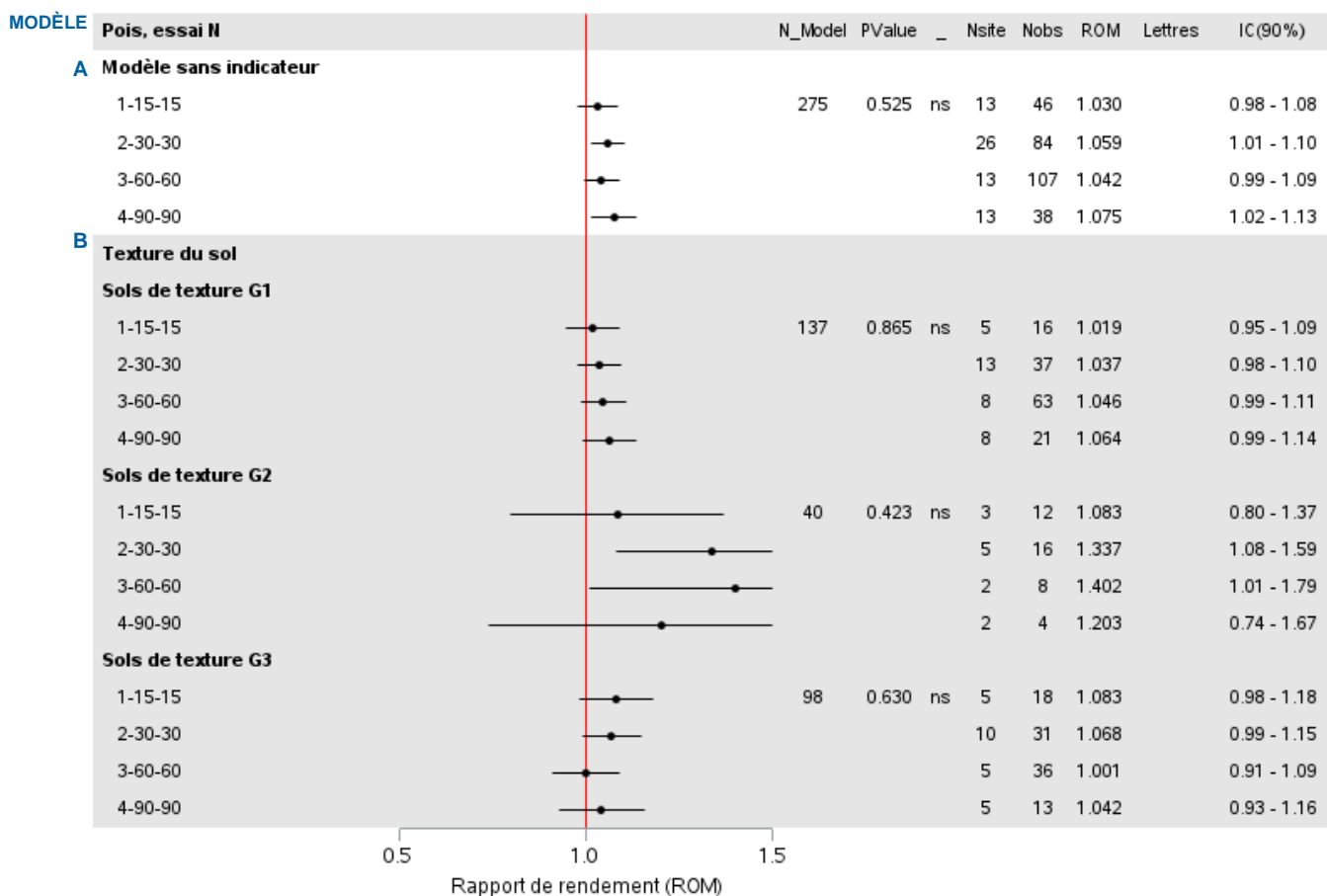


Figure 5. Résultats des analyses de variance sur la réponse de la culture aux doses croissantes d'azote. G1 : sols à texture fine; G2 : sols à texture moyenne; G3 : sols à texture grossière; N_model : nombre d'observations du modèle; Nsite : nombre de sites; Nobs : nombre d'observations; ROM : rapport de rendement (rendement parcelle fertilisée/rendement parcelle témoin); IC : Intervalle de confiance; Lettres : résultats du test de comparaison des moyennes lorsque la valeur de p est significative.

2.3 Diagnostic nutritionnel et exportations en azote

Les exportations en N du pois sont basées sur les résultats d'analyses de biomasses fournies du PSEFCM et de Chamberland (1982). Cependant, les données de Chamberland (1982) ne mentionnaient pas la teneur en matière sèche (MS) des rendements, nécessaires pour le calcul des concentrations de la biomasse de récolte humide.

Ainsi, les MS calculées sur les données du PSEFCM ont été utilisées, en considérant une moyenne par traitement de fertilisation. Il a été jugé que, vu les durées similaires de l'ensemble des essais (moyennes de 58 et 64 jours respectivement pour le PSEFCM et Chamberland, 1982; Tableau 2), les teneurs en MS pouvaient s'apparenter. Pour les données PSEFCM, les moyennes de MS par traitement variaient entre 20,5 et 21,3 % pour une valeur moyenne de $20,9 \pm 0,3$ %. Entre les variétés et tous traitements confondus, l'écart-type était plutôt de 1,65 %. Au vu d'une variabilité plus importante entre les variétés qu'entre les traitements, il aurait été préférable d'attribuer la MS sur la variété. Or, aucune des variétés du PSEFCM n'a été utilisée dans les essais de Chamberland. Toutefois, de manière générale, la MS varie assez peu.

Les exportations en N du pois varient en fonction du rendement, de la variété et de la concentration en N des tissus récoltés (Figure 6). Afin d'améliorer l'exactitude des valeurs d'exportation, ces dernières ont été calculées à partir de la population de tête, c'est-à-dire la population ayant un diagnostic nutritionnel équilibré tout en offrant les meilleurs rendements (voir section 1.8.3 p. 22, pour davantage de détails). L'analyse des biomasses de récolte rapporte des concentrations de $9,0 \pm 0,8$ kg N/t humide pour une humidité moyenne de 79 % (Tableau 10). Les données obtenues pour la concentration dans la biomasse de récolte sont similaires à la valeur de $9,1 \pm 0,2$ kg N/t humide présentées au tableau 8.1 du *Guide de référence en fertilisation* actuel (CRAAQ, 2010).

En considérant un rendement moyen de la population de tête de 8 366 kg/ha, les exportations moyennes totalisaient 75 kg N/ha et variaient de 67 à 88 kg N/ha. La valeur médiane était de 75 kg N/ha. Puisque le pois est une légumineuse qui fixe symbiotiquement le N atmosphérique, c'est une plante peu exigeante en éléments fertilisants (FQPFLT, 2018). Il semble probable que les exportations en N soient plus élevées que les doses recommandées, car la plante fixe ce dont elle a besoin via l'azote atmosphérique.

Tableau 10. Concentration et exportations d'azote du pois selon le diagnostic nutritionnel

	Humidité		Exportations ¹				
	(%)	(kg N/ t humide)		(kg N/ha)			
		Moy	Écart -type	Moy	Med	Min	Max
Haut rendement et équilibre nutritionnel (« population de tête »)	79	9,0	0,8	75	75	67	88
Faible rendement et équilibre nutritionnel	80	9,0	0,2	47	50	25	63
Faible rendement et déséquilibre nutritionnel	79	8,9	0,8	42	43	21	68
Haut rendement et déséquilibre nutritionnel	78	9,1	0,8	74	72	65	88

¹ Moy : moyenne; Med : médiane; Min : valeur minimale; Max : valeur maximale.

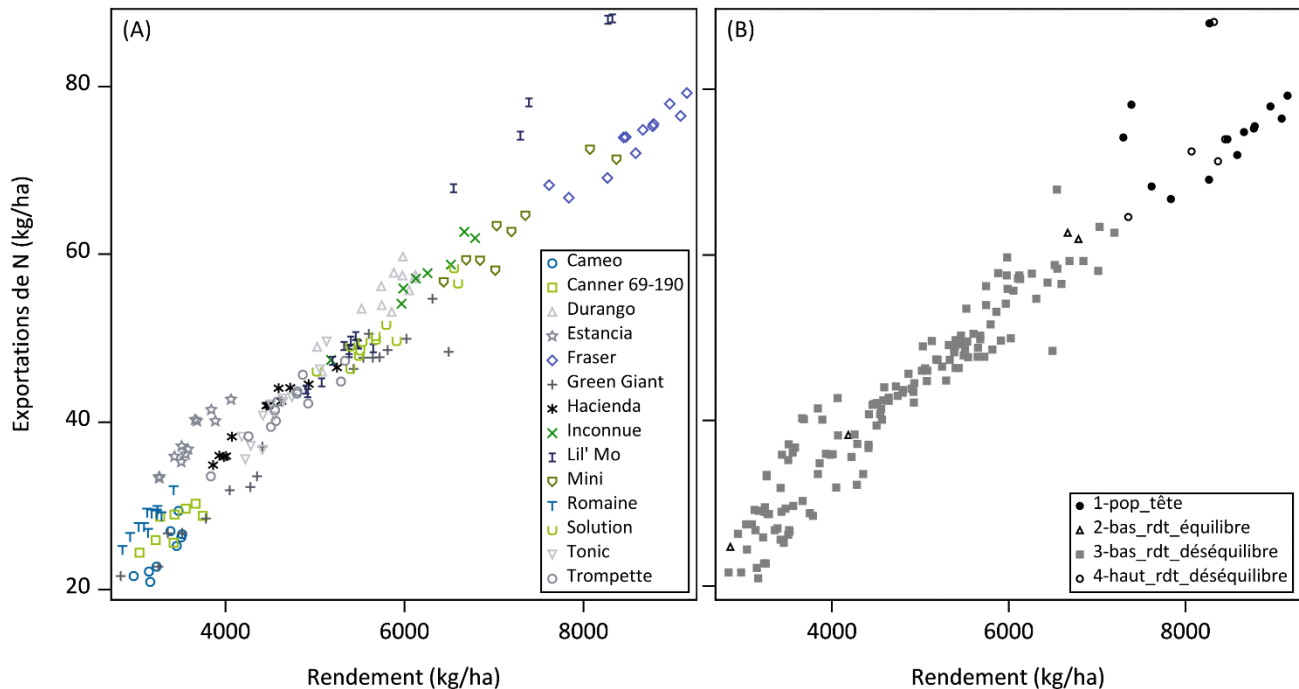


Figure 6. Exportations d'azote en fonction des rendements du pois, exprimés selon (A) les variétés et (B) le diagnostic nutritionnel

2.4 Nitrate résiduel à la récolte

Afin d'évaluer les risques de pertes de N vers l'environnement (Figure 7), les teneurs en nitrate (N-NO_3) résiduel des strates 0-30 cm (Figure 7A) et 30-60 cm (Figure 7B) du sol ont été analysées et converties en kg/ha en utilisant la masse volumique du sol des sites (parcelles fertilisées en N vs témoin 0 N). Les teneurs sont des estimations et ne concernent que les données issues du PSEFCM, car les essais de Chamberland (1982) ne mesuraient pas ce paramètre. Les statistiques présentées à droite de la Figure 7 indiquent si la fertilisation a laissé une quantité significativement plus importante de N-NO_3 dans les sols fertilisés par rapport au témoin 0 N. L'analyse est donc réalisée sur une base relative (fertilisée/non-fertilisée) afin d'atténuer les effets dus à des particularités propres aux sites et aux saisons.

Dans la culture du pois, le nitrate résiduel augmente avec l'augmentation de la dose de N. Les quantités mesurées dans ces essais sont faibles (Beckie et Brandt, 1997), mais l'augmentation est significative pour toutes les doses aux deux profondeurs de sol. Cela indique, malgré les très faibles quantités, que le risque de lessivage augmente avec l'application de plus fortes doses d'engrais et sera proportionnel à l'importance de la dose appliquée.

Il est donc important, aux plans environnementaux et économiques, de ne pas appliquer trop de N, car la plante ne semble pas l'utiliser. Toutefois, le pois étant une légumineuse, il est plausible d'observer une augmentation

du nitrate résiduel dans le sol. La planification de la fertilisation de la culture suivante devra tenir compte de ces résidus de N dans le sol dans le cadre de la réalisation du bilan de N dans le sol.

L'augmentation significative du nitrate résiduel dans le sol à partir d'une dose de 30 N vient appuyer les résultats de l'ANOVA selon lesquels la dose de 15 kg/ha serait suffisante pour l'obtention du meilleur rendement. La dose de 15 kg N/ha a été recommandée sur la base des données Chamberland (1982), ce qui explique qu'elle ne soit pas illustrée à la Figure 7.

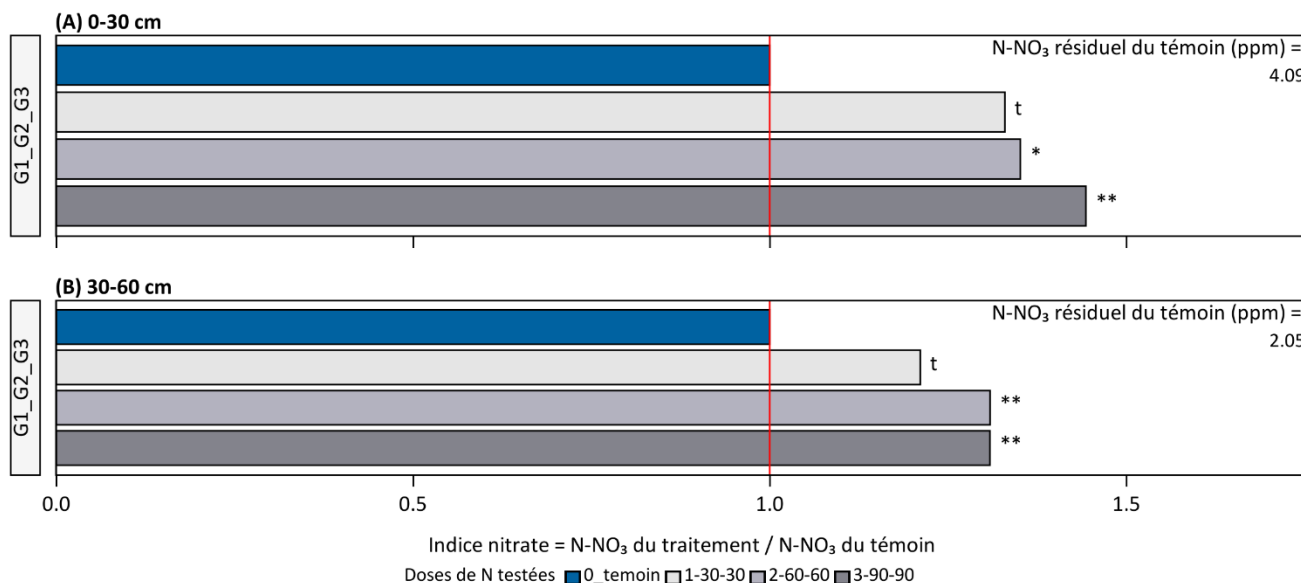


Figure 7. Nitrate résiduel (N-NO₃) à la récolte dans les couches de sol 0-30 cm (A) et 30-60 cm (B) en fonction des groupes de textures de sol et des doses d'azote dans les essais de pois du PSEFCM. G1 : sols à texture fine; G2 : sols à texture moyenne; G3 : sols à texture grossière. Les statistiques ont été réalisées sur les données transformées (log), alors que le graphique présente les données brutes tels qu'analysés au laboratoire. De ce fait, les résultats du test statistiques 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.

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

Au vu des résultats obtenus, il semble que le pois ne réponde pas ou très peu à la fertilisation azotée. Ainsi, il n'est pas à propos de présenter la recommandation en fonction d'un indicateur de fertilité. La recommandation de la dose agronomique de N pour la production du pois est donc de 0 – 15 kg N/ha à la volée et incorporé avant le semis, peu importe les teneurs en argile, en matière organique ou en N-NO₃ au semis (Tableau 11). Cette dose représente une légère diminution par rapport à l'actuelle recommandation (CRAAQ, 2010). De faibles apports en N sont également préconisés dans les Prairies canadiennes, les Maritimes, de même que dans l'État du Minnesota aux États-Unis où la teneur en matière organique est utilisée comme indicateur de fertilité (Tableau 12). De surcroît, le pois est une légumineuse et produit son propre N. Les exportations, plus élevées les apports de N par la fertilisation, sont probablement compensées par la fixation du N par les nodules, et ce, malgré que

la culture n'ait pas été inoculée. Par ailleurs, une petite dose permet de limiter les nitrates résiduels se retrouvant dans le sol en post-récolte.

Tableau 11. Fertilisation azotée du pois – Valeurs scientifiques de référence en fertilisation

Groupe de textures ¹	Mode et période d'application	Recommandation (kg N/ha)
G1, G2 et G3	À la volée et incorporé avant le semis	0 – 15 ¹

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

² Plus petite dose testée en absence de réponse à la fertilisation.

Tableau 12. Comparaison des recommandations en azote pour la production de pois au Canada et à l'étranger

Province /État	Mode et période d'application	Fractionnement	Indicateurs		Dose N (kg/ha)	Source
			Fertilité du sol	Autres		
Québec (CAN)	-	Non	-	-	Pois vert : 35 ¹ Pois sec : 20 ¹	CRAAQ (2010)
Les Maritimes (CAN)	À la volée ou en bande	Non	-	-	Ne nécessite pas une grande quantité de N. Si on n'applique pas de P et de K, l'apport de N peut être négligé.	Atlantic Provinces Advisory Committee on Vegetable Crops (1989)
Prairies canadiennes (CAN)	-	Non	-	-	Ne nécessite pas une grande quantité de fertilisant, en particulier le N. Une faible quantité de N peut être appliquée avant le semis.	Alberta Agriculture and Rural Development (2014)
Minnesota (É-U)	-	Non	MO	Objectif de rendement	0-85	Rosen et Eliason (2005)
Nouvelle Angleterre (É-U)	À la volée ou intégré au semoir	Non	-	-	55-85	University of Massachusetts Amherst (2018)
Michigan (É-U)	-	Non	-	-	45	Warncke et coll. (1992)
Mid-Atlantic (É-U)	À la volée et incorporé	Non	-	-	45-90	PennState Extension (2020)

¹ Ajuster la dose d'azote selon le cultivar et le précédent cultural

3. FERTILISATION PHOSPHATÉE

3.1 Portrait et représentativité des données

La répartition des sites à travers les différentes classes de propriétés de sol est présentée au Tableau 13. La grande majorité des sites (82 %) a présenté une teneur en P_{M3} inférieure à 100 ppm, principalement grâce à l'ajout des données de Chamberland (1982) pour lesquelles 82 % des sites étaient sous le seuil. Outre la faible teneur en P d'une forte proportion des blocs, les données montrent également que la saturation en P des sols se situe en dessous des seuils environnementaux du règlement sur les exploitations agricoles (REA) (MDDEP, 2010) pour 64 % et 87 % des blocs des sols G1 et G2-G3 respectivement. Une telle répartition est adéquate pour observer une réponse à fertilisation. Comparativement aux valeurs d'ISP₁ des MRC où les essais ont été conduits, les données montrent une bonne représentativité des conditions de sols faiblement à moyennement saturés en P. Toutefois, les sols ayant un taux de saturation en P supérieur à 20 % n'ont pas fait partie des essais.

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

pH _{eau}	Saturat. en P (ISP ₁ , %) ²	Teneur en P _{M3} (ppm)	Groupe de textures ³	Saturat. en P des régions (ISP ₁ %) ⁴											
				1	2	3	4	5							
Seuil ¹	Blocs (%)	G1 ³		G2-G3		Seuil (ppm)	Blocs (%)	Blocs (%)	Seuil	----% du territoire----					
		Seuil (%)	Blocs (%)	Seuil (%)	Blocs (%)					1	2	3	4	5	
< 5,0	0	≤ 3,8	21	≤ 6,5	48	< 50	35	G1	49	< 7,5	54	82	43	55	64
5,1 – 5,5	21	3,9 – 7,6	43	6,6 – 13,1	39	51 – 100	47	G2	13	7,6 – 13,1	20	8	29	23	19
5,6 – 6,0	30	7,7 – 15,2	32	13,2 – 20	13	101 – 150	16	G3	38	13,2 – 20,0	12	7	16	18	11
6,1 – 6,5	34	> 15,2	3	> 20	0	151 – 200	2	-	-	> 20,0	11	3	12	4	4
6,6 – 7,3	15	-	-	-	-	-	-	-	-	nd	3	0	0	0	2
≥ 7,4	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

¹ Cescas (1978) cité par le CRAAQ (2010).

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

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

⁴ Adapté du Portrait des années 2011 à 2013 du MDDELCC (2016). Portrait de la saturation en P des MRC dans lesquelles ont été conduits les essais du PSEFCM; 1 : MRC des Jardins-de-Napierville; 2 : MRC de Roussillon; 3 : MRC des Maskoutains; 4 : région de Montréal; 5 : MRC du Haut-Richelieu.

nd : non disponible

3.2 Détermination des doses agronomiques optimales

3.2.1 Recherche d'indicateurs de fertilité du sol

Plusieurs indicateurs potentiels de fertilité sont recensés dans la littérature pour expliquer la réponse des cultures à la fertilisation phosphatée et devenir des indicateurs de fertilité. Le potentiel de ces indicateurs a été testé avec le test de partition de Cate-Nelson (1971) : la teneur en argile, l'ISP₁ et la teneur en P_{M3} des sols. Il faut souligner que l'indicateur P_{M3} a été utilisé à titre comparatif avec l'ISP₁, dorénavant reconnue comme étant un meilleur indicateur agro-environnemental de la disponibilité du P du sol que le P_{M3} pris seul (Khiari *et al.*, 2000). Les grilles les plus récentes (ex. maïs-grain, pomme de terre; CRAAQ 2010) utilisent d'ailleurs l'ISP₁. Il n'est donc

pas visé d'utiliser le P_{M3} comme indicateur pour la détermination des classes de fertilité des sols. Lorsque possible, ces indicateurs ont été également testés à l'intérieur des groupes de textures G1, G2 et G3. Les groupes de textures ont en effet une forte influence sur le lien entre l'ISP₁ et la disponibilité du P, comme en témoigne la grande différence entre les seuils critiques du règlement sur les exploitations agricoles (REA) pour un sol de type G1 (7,6 %, texture fine) et ceux de type G2-G3 (13,1 % texture moyenne à grossière; Pellerin *et al.* 2006, MDDELCC 2017). Comme les données de Chamberland (1982) étaient incomplètes pour certaines propriétés de sol, seuls les indicateurs dont les données étaient disponibles à l'ensemble des sites ont été considérés.

Les résultats des tests de Cate-Nelson sur les RRel (Tableau 14) démontrent que l'ISP₁ et le P_{M3} expliquent significativement la réponse à la fertilisation (P respectifs de 0,078 et 0,014), avec ou sans regroupement par groupe de textures. Le seuil d'ISP₁, toutes textures confondues, était de 8,6 %. Tel qu'attendu, les sols sableux (G3) ont révélé un seuil de réponse plus élevé (11,7 %), tandis que la considération des sols plus lourds a fait diminuer ces seuils (3,6 et 4,3 %; Tableau 14). Similairement, pour le P_{M3} , la division par groupe de textures a fait diminuer le seuil dans les G1-G2. Enfin, l'ISP₁ sera considéré préférentiellement pour l'établissement des classes de fertilité de sol, car il tient compte des risques liés à la diffusion du P dans l'environnement (Khiari *et al.*, 2000).

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

Indicateur de sol	Groupes de textures ¹	Valeur critique	RRel ² (%)	Sensitivité	Spécificité	p ³
ISP ₁ ⁴	G1-G2-G3	8,6 %	81	0,360	0,833	0,078t
	G2-G3	3,6 %	80	0,731	0,611	0,032*
	G1-G2	4,3 %	73	0,590	0,800	0,037*
	G3	11,7 %	81	0,429	1,000	0,030*
P_{M3}	G1-G2-G3	32,8 ppm	76	0,705	0,632	0,014*
	G2-G3	32,8 ppm	79	0,778	0,706	0,004**
	G1-G2	19,3 ppm	76	0,912	0,600	< 0,001**

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

3.2.2 Effet de la dose de phosphore sur le rendement commercialisable

Les résultats des analyses de variance (ANOVA) de l'essai P du pois sont présentés à la Figure 8 (voir la section 2.2.2 pour les explications sur l'interprétation du graphique en forêt). D'abord, une ANOVA a été effectuée sans indicateur de fertilité, soit en considérant l'ensemble des observations ($n = 259$; Figure 8A). Ce modèle démontre que les ROM ne diffèrent pas selon les doses croissantes de P_2O_5 appliquées ($P = 0,254$). Sans égard au groupe de textures et à l'ISP₁, il n'y a pas d'augmentation significative du rendement dans les traitements fertilisés par rapport au témoin.

Dans les sols G2 et G3 (Figure 8B), la réponse du ROM aux doses de P_2O_5 diffère en fonction de l'ISP₁. Entre 0 et 3,65 % de saturation en P, les ROM tendent à être plus élevés avec l'application de 40 à 60 P ($P = 0,124$). Cette dose engendre également un risque de perte jusqu'à 15 % inférieur à celui de la dose 20 à 30 P. Cependant, seuls deux groupes de doses ont été testés à l'intérieur de cet intervalle d'ISP, ce qui ne permet pas de dire avec certitude qu'une dose plus élevée n'aurait pas conduit à des ROM supérieurs. En effet, l'ANOVA réalisée sur

l'intervalle d'ISP₁ 0 à 11,7 % démontre que les ROM obtenus avec 40-60 P sont similaires à ceux des doses 80 et 120 P. Au-delà de 11,7 % d'ISP₁ dans les sols G2 et G3, aucune réponse du ROM aux apports de P₂O₅ n'est enregistrée. Par ailleurs, les intervalles de confiance révèlent que des pertes importantes de rendement peuvent survenir (au-delà de 15 %).

Enfin, dans les sols de type G1, aucun seuil d'ISP₁ n'avait été déterminé au Cate-Nelson. L'analyse des ROM des G1 (Figure 8C) a démontré que les meilleurs ROM ont été obtenus avec la dose 120 P ($P = 0,016$). Toutefois, les parcelles ayant reçu la dose 80 P semblent avoir particulièrement mal performé. Celles-ci sont probablement à l'origine du fort effet significatif enregistré. Cette dose n'ayant été testée qu'à 3 sites, il est difficile d'écarter qu'il ne s'agisse pas que de l'erreur expérimentale. De surcroît, l'analyse des intervalles de confiance démontre que la différence entre les doses 40-60 P et 120 P ne justifie pas la recommandation de 120 P dans les G1, cette dose étant considérable pour des sols supposés davantage fertiles (par rapport aux G2-G3).

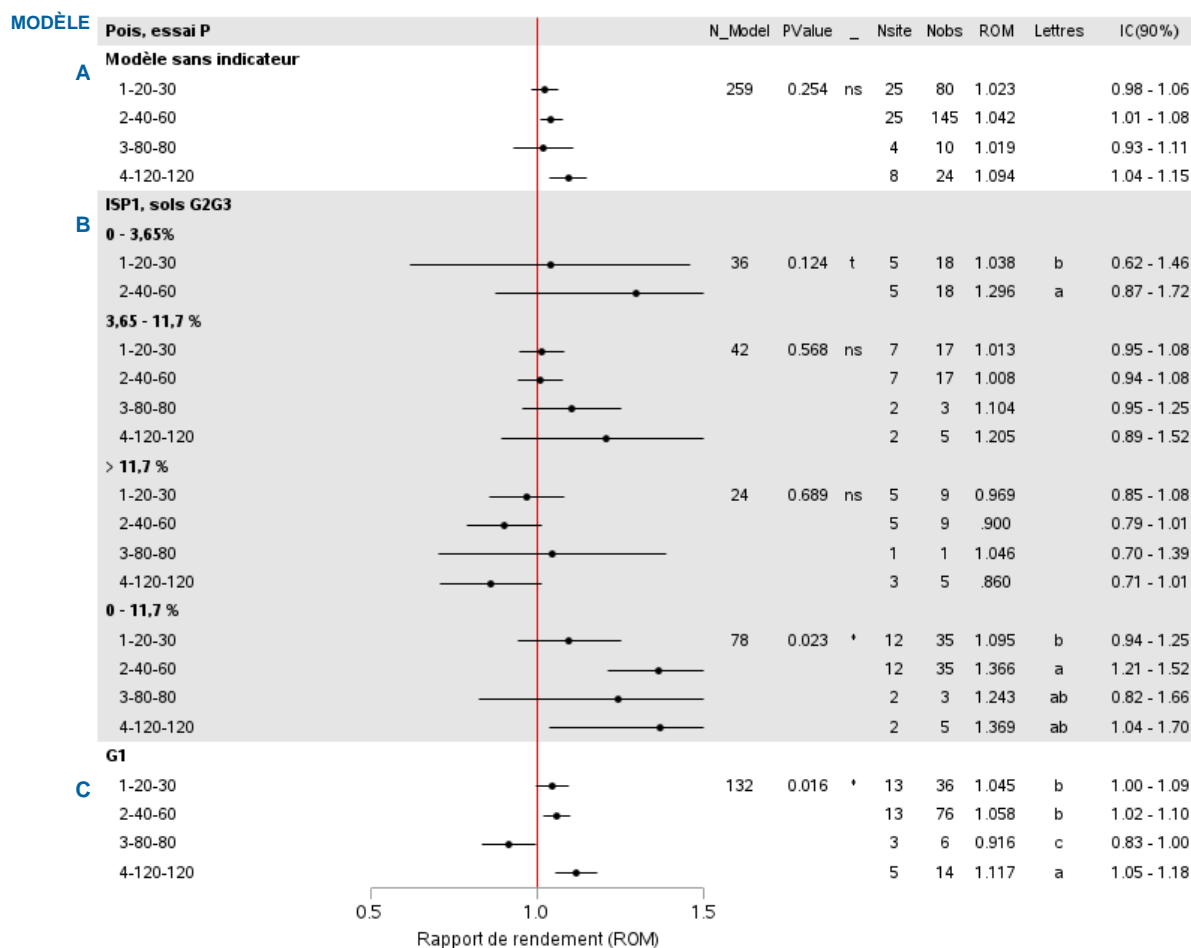


Figure 8. Résultats des analyses de variance sur la réponse de la culture aux doses croissantes de phosphore.
 G1 : sols à texture fine; G2 : sols à texture moyenne; G3 : sols à texture grossière; N_model : nombre d'observations du modèle; Nsite : nombre de sites; Nobs : nombre d'observations; ROM : rapport de rendement (rendement parcelle fertilisée/rendement parcelle témoin); IC : Intervalle de confiance; Lettres : résultats du test de comparaison des moyennes lorsque la valeur de p est significative.

3.3 Diagnostic nutritionnel et exportations en phosphore

L'analyse des tissus de la population de tête du pois rapporte des concentrations de 2,50 kg P₂O₅/t à une humidité de 79 % (Tableau 15). Les exportations moyennes sont de 21 kg P₂O₅/ha et varient entre 18 et 24 kg P₂O₅/ha. Les valeurs moyennes d'humidité et de concentration en P de la population de tête sont très similaires à celles présentées dans le *Guide de référence en fertilisation du Québec* (CRAAQ, 2010, tableau 8.6) où on rapporte des concentrations de 2,47 kg P₂O₅/t humide et une humidité de 79 %. Les exportations en P₂O₅ varient en fonction du cultivar et en fonction du rendement (Figure 9), traduisant que l'utilisation de ces données d'exportations par les agronomes et les conseillers agricoles devrait se faire en tenant compte du potentiel ou de l'objectif de rendement de leur champ et de la variété cultivée.

Tableau 15. Concentrations et exportations de P₂O₅ du pois selon le diagnostic nutritionnel

	Humidité		Exportations ¹				
	(%)	(kg P ₂ O ₅ /t humide)		(kg P ₂ O ₅ /ha)			
		Moy	Écart-type	Moy	Med	Min	Max
Haut rendement et équilibre nutritionnel (« population de tête »)	79	2,47	0,16	21	20	18	24
Faible rendement et équilibre nutritionnel	80	2,60	0,19	14	15	7	19
Faible rendement et déséquilibre nutritionnel	79	2,41	0,46	12	12	4	20
Haut rendement et déséquilibre nutritionnel	78	2,58	0,20	21	21	20	24

¹ Moy : moyenne; Med : médiane; Min : valeur minimale; Max : valeur maximale.

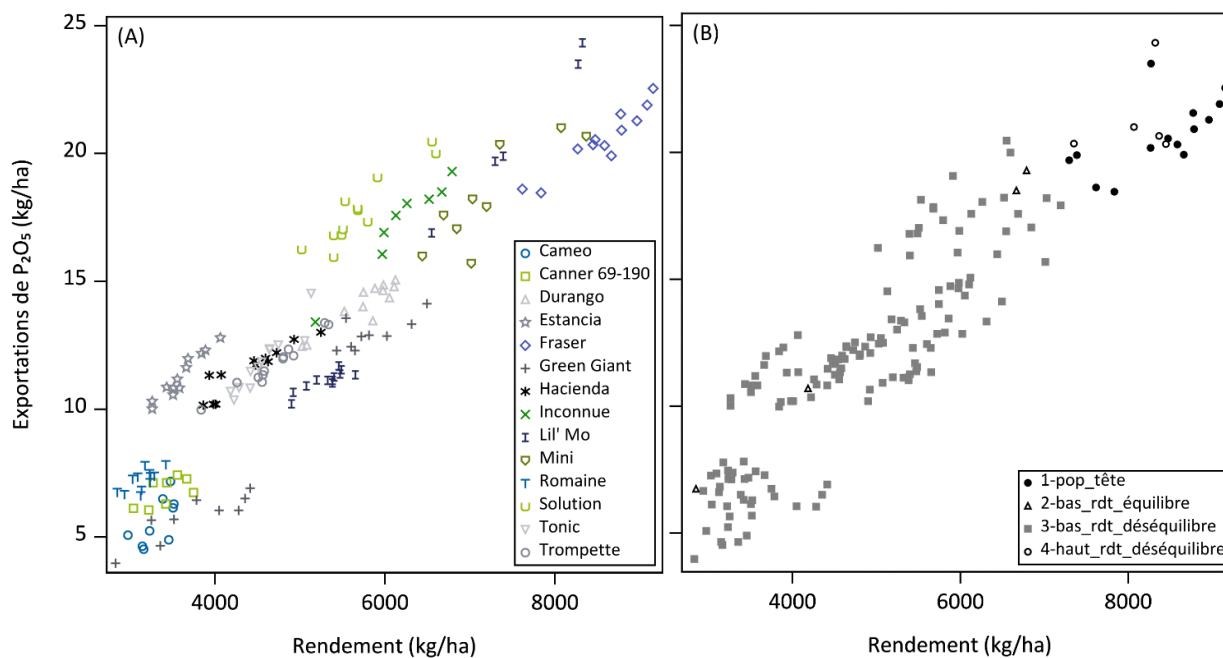


Figure 9. Exportations de P₂O₅ en fonction des rendements du pois, exprimés selon (A) les variétés et (B) le diagnostic nutritionnel.

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

La recommandation de fertilisation en P_2O_5 pour la production du pois est présentée au Tableau 16. Les indicateurs retenus afin de préciser les recommandations sont les groupes de textures (G1 vs. G2-G3) et l'indice de saturation en P (ISP₁) du sol, en vertu des seuils environnementaux et des seuils obtenus avec le test de Cate-Nelson. Ces nouvelles recommandations considèrent la saturation en P du sol (ISP), un indicateur agro-environnemental 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).

En sol G1, l'analyse de la distribution des doses testées dans les groupes a indiqué que la dose moyenne pondérée était de 24 kg P_2O_5 /ha (arrondie à 25) dans les sols sous le seuil agroenvironnemental d'ISP₁ de 7,6 %. Pour l'intervalle 7,6 – 15,2 % d'ISP₁, la dose 20 kg P_2O_5 /ha est retenue, car elle correspond à la valeur des exportations. Celle-ci engendrera peu de risque de perte de rendements, en plus d'éviter un appauvrissement des sols à long terme. Enfin, une dose nulle est recommandée dans les sols au-delà de 15,2 % d'ISP₁, et ce, sans craindre d'engendrer de mauvais rendement.

Dans les sols G2 et G3, 60 kg P_2O_5 /ha sont recommandés dans les sols peu saturés (0 – 3,6 %), seuil établi avec le test de Cate-Nelson. Enfin, à l'instar des sols G1 et pour les intervalles au-delà de 3,6 %, ce sont les doses de 30, 20 et de 0 qui sont recommandées. Dans l'intervalle 3,6 – 13,1 %, la dose 30 kg P_2O_5 /ha (limite supérieure du groupe de doses 1-20-30) a été préférée à la dose 20 kg P_2O_5 /ha afin de diminuer les risques de pertes de rendements et de diminuer les risques d'appauvrissement des sols à long terme dans les sols peu saturés en P (Johnston *et al.*, 2002).

Tableau 16. Fertilisation phosphatée du pois – Valeurs scientifiques de référence en fertilisation

Groupe de textures ¹	Classe de fertilité ISP ₁ (%) ^{2,3}	Mode et période d'application	VSRF ⁴ (kg P_2O_5 /ha)
G1	≤ 7,6	À la volée avant le semis, incorporé	25 ⁵
	7,7 – 15,2		20 ⁶
	> 15,2		0
G2, G3	≤ 3,6	À la volée avant le semis, incorporé	60 ⁷
	3,7 – 13,1		30 ⁸
	13,2 – 26,2		20 ⁶
	> 26,2		0

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

² ISP₁ : saturation en P = $[P_{M3} \text{ (ppm)} / Al_{M3} \text{ (ppm)}] \times 100$, éléments extraits au Mehlich-3 (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) et des seuils obtenus avec le test de Cate-Nelson.

⁴ VSRF : Valeurs scientifiques de référence en fertilisation.

⁵ Dose moyenne pondérée du groupe de doses 20 – 30 P. Dose agronomique optimale dans cette catégorie de sols.

⁶ Exportations en P_2O_5 de la culture.

⁷ Dose agronomique optimale (médiane du groupe de doses 40 – 60 P) dans cette catégorie de sols.

⁸ Dose agronomique optimale déterminée sur la base des intervalles de confiance.



Sols G1 : Afin de ne pas recommander deux fois la même dose pour les intervalles d'IPS₁ de [0 – 7,6] et [7,6 – 15,2], c'est la moyenne pondérée du groupe de doses qui est retenue pour les sols moins saturés, soit 25 kg P₂O₅/ha. Bien que la recommandation de la même dose dans plusieurs catégories de sol ne soit pas idéale, si la dose médiane du groupe était préférable, la dose à recommander serait de 20 kg P₂O₅/ha.

Sols G2 et G3 : Afin de ne pas recommander deux fois la même dose pour les intervalles d'IPS₁ de [3,6 – 13,1] et de [13,1 – 26,2], la limite supérieure du plus petit groupe de doses testées a été retenue afin de diminuer le risque dans ces sols peu saturés en P. Cette dose (30 kg P₂O₅/ha) a été préférée afin de diminuer les risques. De la même façon que pour les sols G1, la moyenne pondérée du groupe de doses 20-30 kg P₂O₅/ha pourrait être utilisée, soit 25 kg P₂O₅/ha (valeur arrondie). Alternativement, si la dose médiane du groupe était préférable, la dose à recommander serait de 20 kg P₂O₅/ha.

Les grilles de fertilisation d'ailleurs au Canada et des États-Unis, présentées au Tableau 17, recommandent d'appliquer l'engrais à la volée en un seul apport, à l'instar de la recommandation du MIRVRF. Par rapport aux doses, la recommandation du MIRVRF se compare à celle du Minnesota (États-Unis). Les autres états américains recommandent des doses supérieures à 100 kg P₂O₅/ha dans les sols plus pauvres, alors que la dose maximale de la présente étude est de 60 kg P₂O₅/ha. La recommandation des Maritimes peut être qualifiée de semblable à celle du MIRVRF, bien qu'elle ne précise seulement qu'une « faible quantité » de P est requise.

Par rapport à la grille actuellement en vigueur au Québec, les recommandations du MIRVRF constitueront des diminutions importantes. Toutefois, étant donné les faibles exportations de la culture, la diminution de la recommandation ne devrait pas provoquer l'appauvrissement à long terme des sols agricoles du Québec. Enfin, la recommandation en P₂O₅ du MIRVRF est la seule qui intègre la saturation en P du sol plutôt que sa simple concentration, le tout en combinaison avec le groupe de textures (Tableau 17).

Tableau 17. Comparaison des recommandations en P₂O₅ pour la production de pois au Canada et à l'étranger

Province /État	Mode et période d'application	Fractionnement	Indicateurs		Dose P ₂ O ₅ (kg/ha)	Source
			Fertilité du sol ¹	Autre		
Québec (CAN)	-	Non	0-50 kg P _{M3} /ha	-	160	CRAAQ (2010)
			51-100	-	130	
			101-150	-	95	
			151-200	-	80	
			201-300	-	65	
			301-400	-	45	
Prairies canadiennes (CAN)	Avant le semis	Non	-	-	En fonction des analyses de sols	Alberta Agriculture Rural Development (2014)
Les Maritimes (CAN)	À la volée ou en bande (5 cm en dessous et 5 cm à côté de la ligne de semis)	Non	-	-	P requis en faible quantité	Atlantic Provinces Advisory Committee on Vegetable Crops (1989)
Minnesota (É-U)	-	Non	P _{Bray 1} ou P _{Olsen}	Objectif de rendement	0-110	Rosen et Eliason (2005)
Nouvelle Angleterre (É-U)	À la volée ou intégré au semoir	Non	-	-	0-170	University of Massachusetts Amherst (2018)
Michigan (É-U)	À la volée, au semis	Non	P _{Olsen}	-	0-120	Warncke <i>et al.</i> (1992)
Mid-Atlantic (É-U)	-	Non	P _{M3}	-	0-135	PennState Extension (2020)

¹P_{M3} : phosphore dosé par la méthode Mehlich-3 (Mehlich, 1984).

4. FERTILISATION POTASSIQUE

4.1 Portrait et représentativité des données

La répartition des blocs des sites à travers les différentes classes de propriétés de sol est présentée au Tableau 18. À la différence des autres cultures, tout comme pour le haricot, le seuil de non-réponse en K établi par défaut était de 200 kg K_{M3} /ha (89 ppm K_{M3} en utilisant un facteur de conversion de 2,24) au lieu de 400 kg K_{M3} /ha. Cette décision s'appuie principalement sur le fait que selon les recherches antérieures (Lafond et Pageau, 2010; Cutcliffe *et al.*, 1980; Chamberland, 1982), le pois est une culture qui répond très peu ou pas à la fertilisation potassique et par conséquent, qui ne nécessite pas une forte teneur en K au niveau du sol. Le seuil était donc fixé à 200 kg K_{M3} /ha au lieu de 400 kg K_{M3} /ha. Il est toutefois important de noter que ce seuil est estimé adéquat *a priori* pour tester la réponse aux engrais potassique car il n'existe pas de seuil officiel dans la littérature scientifique. Dans les sols du groupe de textures G1, selon le seuil en K_{M3} établi, 21 % des blocs présentent une bonne capacité de réponse à la fertilisation potassique. À l'opposé, ce pourcentage passe à 72 % dans les sols de textures moyenne à légère (G2-G3). L'ajout des données de Chamberland (1982) a permis d'améliorer grandement la proportion des sols ayant une faible teneur en K_{M3} , ce qui améliore l'étude la réponse de la culture à l'engrais K. Pour les sols G1, il serait donc souhaitable d'avoir un plus grand nombre de blocs pauvres que de blocs riches en K en vue d'obtenir des réponses à la fertilisation. Enfin, bien que près de la moitié des essais ait été réalisée sur des sols de texture fine (G1), la représentativité des groupes de textures parmi les blocs est acceptable.

Tableau 18. 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) ²			Groupe de textures ³		Teneur en argile	
Seuil ¹	Blocs (%)	Seuil	G1 Blocs (%)	G2-G3 Blocs (%)	Blocs (%)		Seuil	Blocs (%)
< 5,6	22	< 100	21	72	G1	49	≤ 30 %	77
5,7 – 6,0	29	101 – 200	63	28	G2	15	> 30 %	23
6,1 – 6,5	31	201 – 300	16	-	G3	36	-	-
> 7,3	18	-	-	-	-	-	-	-

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

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

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

4.2 Détermination des doses agronomiques optimales

4.2.1 Recherche d'indicateurs de fertilité du sol

Les tests de partition de Cate-Nelson ont permis de repérer des indicateurs potentiels de fertilité de sol pouvant expliquer la réponse de la culture à la fertilisation (Tableau 19). Le K étant une base échangeable, les indicateurs choisis sont en lien avec la capacité d'échange cationique (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. Toutefois, en raison du fait que certaines propriétés de sol étaient manquantes pour les données de Chamberland (1982), certains indicateurs de sol n'ont pas pu être testés de

manière exhaustive. Lorsque possible, les indicateurs ont été testés à l'intérieur des groupes de textures G1, G2 et G3. Tel que mentionné dans les essais N et P, seuls les tests dont la valeur de P est inférieure à 0,12 sont présentés (Tableau 19) et utilisées comme seuils critiques lors de la réalisation des analyses de variance (Figure 10).

Tableau 19. Valeurs critiques des indicateurs potentiels de sols significatifs selon les tests de Cate-Nelson pour les essais K

Indicateur de sol	Groupes de textures ²	Valeur critique	RRel ³ (%)	Sensitivité	Spécificité	P ⁴
K_{M3} ¹	G1, G2, G3	72,5 ppm	79	0,68	0,59	0,041*
	G2, G3	72,5 ppm	79	0,67	0,71	0,018*
	G1, G2	106,0 ppm	72	0,56	0,89	0,024*
	G3	57,4 ppm	79	0,86	0,56	0,027*

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

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 à $P < 0,05$.

Parmi tous les indicateurs potentiels testés, seule la teneur en K_{M3} s'est avérée un bon indicateur de prédiction de la fertilité du sol ($P = 0,018$ à $0,041$; Tableau 19). Les seuils critiques trouvés à partir de ces tests sont toutefois différents du seuil de richesse de 89,3 ppm K_{M3} (équivalent à 200 kg K_{M3} /ha avec un facteur de conversion de 2,24) établi par défaut dans les essais du PSEFCM. Conformément aux travaux de Khiari *et al.* (2017), les nouvelles recommandations en fertilisation seront exprimées en parties par million, afin d'éviter tout biais de conversion, plutôt que converties en kilogrammes à l'hectare avec la constante 2,24 (CRAAQ, 2010).

Le seuil de non-réponse du groupe G3 a été beaucoup plus faible que celui des groupes G1 et G2 combinés (57,4 vs. 106,0 ppm). Le seuil plus élevé des G1-G2 suggère une réponse beaucoup plus grande à la fertilisation que dans les sols de type G3, ce qui peut apparaître surprenant. Toutefois, dans les sols G1 pris séparément, aucune réponse à la fertilisation n'a été observée, ce qui indique que les sols G2 ont beaucoup influencé la détermination du seuil de réponse du groupe G1-G2. La valeur critique trouvée dans les sols G1-G2 est donc beaucoup plus représentative des sols G2 que des sols G1.

4.2.2 Effet de la dose de potassium sur le rendement commercialisable

Les résultats des analyses de variance sont présentés à la Figure 10. Aucun des modèles testés n'a permis de mesurer un effet significatif des doses de K_2O sur le ROM ($P = 0,164$ à $0,770$). Cela indique que la plus petite dose testée (30 kg K_2O /ha) a permis d'atteindre un niveau de rendement agronomique équivalente au témoin. Les travaux de recherches de Chamberland (1982) au Québec, de McKenzie *et al.* (2002) en Alberta et de Cutcliffe *et al.* (1980) à l'Île du Prince Edouard ont également rapporté une absence de réponse à la fertilisation potassique dans la culture de pois vert. Des observations similaires ont été faites par Lafond et Pageau (2010) sur du pois sec au Québec.

MODÈLE

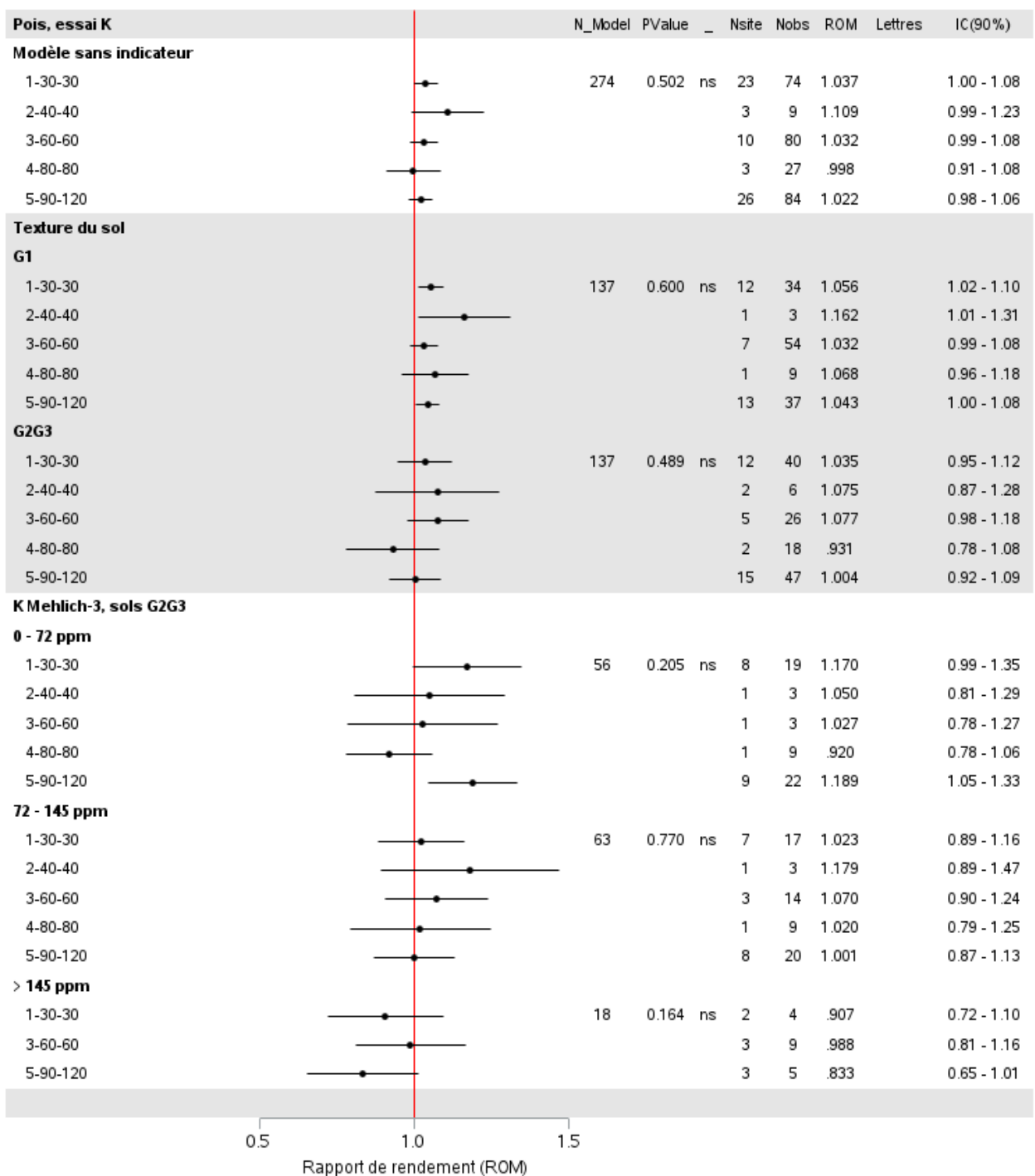


Figure 10. Résultats des analyses de variance sur la réponse de la culture aux doses croissantes de potassium

G1 : sols à texture fine; G2, sols à texture moyenne; G3 : sols à texture grossière; N_model : nombre d'observations du modèle; Nsite : nombre de sites; Nobs : nombre d'observations; ROM : rapport de rendement (rendement parcelle fertilisée/rendement parcelle témoin); IC : Intervalle de confiance; Lettres : résultats du test de comparaison des moyennes lorsque la valeur de p est significative; ns : non significatif.

À partir du modèle sans indicateur (Figure 10A), une diminution des ROM est observée suivant un apport de K₂O supérieur ou égal à 60 kg/ha (non significatif, $P = 0,502$). Cet effet négatif de la fertilisation potassique, bien que non significatif, a également été observé dans tous les groupes de textures (Figure 10B). En effet, le pois est une culture particulièrement sensible à la salinité du sol et des engrais (Aguiar *et al.*, 1998, Cordovilla *et al.*, 1995; Delgado *et al.*, 1994). Cela décourage l'application de fortes doses de potassium, ces engrais ayant des indices de salinité élevés (CRAAQ, 2010). Les études de Cordovilla *et al.* (1995) et de Delgado *et al.* (1994) montrent que le pois est la culture la plus sensible aux problèmes de salinité parmi les légumineuses testées.

Pour les groupes de textures G2-G3 ayant une teneur en K supérieure à 145 ppm, la fertilisation potassique entraîne majoritairement une diminution des rendements, bien que non significative, car les ROM moyens sont inférieurs à 1 (Figure 10C). Les faibles valeurs des bornes minimales des intervalles de confiance (jusqu'à 0,65) indiquent que les pertes de rendement peuvent atteindre jusqu'à 35 % suivant l'ajout de K₂O dans les sols déjà bien pourvus en K. En Ontario, le seuil de non-réponse du pois à la fertilisation potassique est établi à 121 ppm de K (dosé par la méthode de l'acétate d'ammonium; OMAFRA, 2010). Les résultats de Deslauriers (2014) rapportent une diminution de rendement à l'apport d'une dose de 30 kg K₂O/ha sur des sols ayant une teneur en K_{M3} aussi faible que 100 kg/ha (45 ppm K_{M3}).

4.3 Diagnostic nutritionnel et exportations en potassium

L'humidité et la concentration en K₂O dans les tissus du pois ont été respectivement 79 % et de 3,43 kg K₂O/t humide (Tableau 20). Le taux d'humidité obtenu est le même que celui présenté dans l'actuel *Guide de référence en fertilisation* du CRAAQ (2010). Toutefois, la concentration en K₂O est plus élevée dans le cadre de cette étude que la valeur de $2,94 \pm 0,24$ kg K₂O/t humide rapportée par le CRAAQ (2010). Cette différence pourrait s'expliquer, entre autres, par un effet de variété, particulièrement considérant que les données présentées dans le CRAAQ (2010) proviennent des États-Unis et datent de 1999. Or, des changements de variété ont possiblement été enregistrés au cours des 20 dernières années. Les exportations moyennes et médianes du pois, pour la population de tête, sont de 29 kg K₂O/ha et varient de 25 à 33 kg K₂O/ha (Tableau 20; Figure 11B). Les exportations en K sont donc faibles et peu variables. De même que pour l'azote et le phosphore, les exportations du pois varient en fonction du cultivar et du rendement, tel qu'illustré à la Figure 11.

Tableau 20. Concentrations et exportations de K₂O du pois selon le diagnostic nutritionnel

	Humidité		Exportations ¹				
	(%)	(kg K ₂ O/ t humide)		(kg K ₂ O/ha)			
		Moy	Éc-T	Moy	Med	Min	Max
Haut rendement et équilibre nutritionnel (« population de tête »)	79	3,43	0,27	29	29	25	33
Faible rendement et équilibre nutritionnel	80	3,74	0,32	20	21	9	28
Faible rendement et déséquilibre nutritionnel	79	3,32	0,52	16	16	7	28
Haut rendement et déséquilibre nutritionnel	78	3,60	0,36	29	28	28	35

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

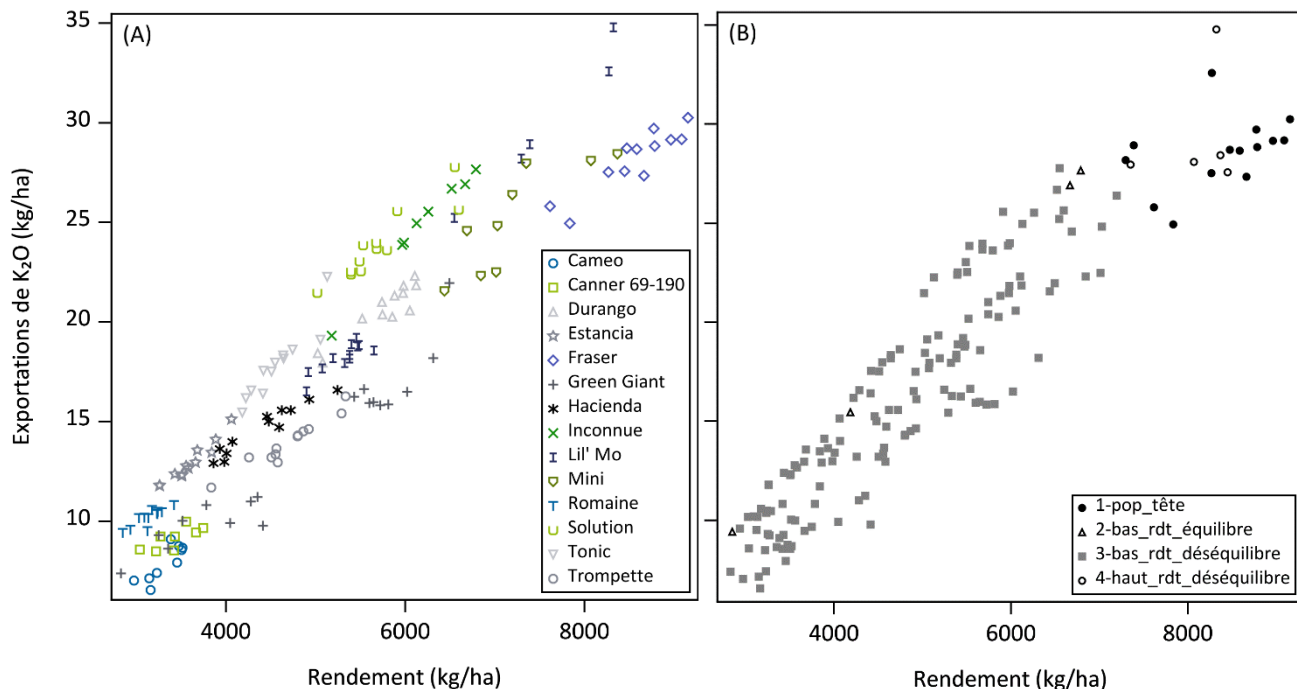


Figure 11. Exportations de K₂O en fonction des rendements du pois, exprimés selon (A) les variétés et (B) le diagnostic nutritionnel.

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

Les doses de K₂O recommandées en fonction des résultats obtenus pour la production du pois sont présentées au Tableau 21. Au total, trois classes de fertilité du sol ont été obtenues pour le K, soit une classe pour les sols G1 et deux pour les sols des groupes G2 et G3 combinés. Ces nouvelles recommandations sont plus précises par rapport aux antérieures, car elles tiennent compte de la texture des sols en combinaison avec la fertilité potassique. Cette précision pourrait en partie expliquer la diminution des doses agronomiques optimales présentées. Pour terminer, 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.

Ainsi, pour tous les sols du groupe de textures G1, la recommandation en K₂O est de 30 kg/ha indépendamment de la richesse en K_{M3} du sol. Cette recommandation correspond à la plus petite dose testée ayant mené à un gain, en absence de différence significative entre les traitements fertilisés. Pour les sols des groupes de textures G2 et G3 et pour une teneur en $K_{M3} < 145$ ppm, la plus petite dose testée (30 kg K₂O/ha) ayant mené à un gain de rendement en l'absence de différence entre les traitements est également recommandée. Une seule classe de fertilité du sol a été définie en dessous du seuil critique de 145 ppm : dans les deux sous-classes de 0-72 ppm et 72-145 ppm testées, l'effet de la dose était non significatif (Figure 10), exposant que les recommandations devraient être minimales, soit la plus petite dose ayant mené à un gain de rendement. Pour ces deux classes de sols, les recommandations correspondent également aux exportations en K₂O du pois de valeurs moyenne et

médiane de 29 kg/ha. Il s'agit donc d'une fertilisation visant à empêcher l'appauvrissement des sols à moyen ou à long terme.

Enfin, dans les sols ayant une teneur en $K_{M3} > 145$ ppm, il est recommandé d'éviter tout apport supplémentaire de K_2O afin de prévenir des pertes de rendement. En raison des pertes considérables de rendement enregistrées dans les sols présentant un niveau de suffisance en K, il s'avère nécessaire de faire une recommandation prudente en vue d'éviter tout risque de sur fertilisation en K pouvant entraver la productivité de la culture.



Dans les sols du groupe de textures G1, le second groupe de doses testées (40 kg /ha de K_2O) pourrait être recommandée bien qu'il n'y ait pas de différence statistique (au seuil $P < 0,12$) et que ce groupe contienne peu d'observations (Figure 10) pour les raisons suivantes :

- La dose de 40 kg /ha montre une plus forte augmentation du ROM.
- La borne supérieure de l'intervalle de confiance est beaucoup plus élevée que celle de la plus petite dose testée (1,31 vs. 1,10).

Cela suggère que l'utilisation de la dose de 40 kg/ha pourrait favoriser l'obtention de meilleurs rendements. Une telle décision ne serait toutefois pas appuyée par les résultats d'analyses statistiques des données disponibles dans cette étude au seuil prédéterminé de signification.

Tableau 21. Fertilisation potassique du pois – Valeurs scientifiques de référence en fertilisation

Groupe de textures ¹	Classe de fertilité K_{M3} ² (ppm)	Mode et période d'application	VSRF ³ (kg K_2O /ha)
G1	.	À la volée avant le semis et incorporé	30 ⁴
G2, G3	≤ 145	À la volée avant le semis et incorporé	30 ⁴
	> 145		0 ⁵

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 VSRF : Valeurs scientifiques de référence en fertilisation.

⁴ Dose agronomique optimale déterminée sur la base des intervalles de confiance.

⁵ Dose nulle recommandée en raison des pertes de rendements enregistrées dans les sols à haute teneur en K.

De manière générales, les doses agronomiques proposées dans le cadre du MIRVRF sont inférieures aux recommandations de K_2O faites en Amérique du Nord (Canada et États-Unis) (Tableau 22). Seul le Minnesota (États-Unis) fait figure d'exception, car les recommandations en K_2O sont similaires à celles de cette étude pour, cependant, des objectifs de rendements relativement faibles (< 2130 kg /ha). Par rapport à la grille actuellement utilisée au Québec, il y a une grande différence à la fois au niveau de la détermination des classes de fertilité du sol et des recommandations en K_2O . Les doses de K_2O suggérées sont plus faibles que celles utilisées au Québec actuellement tel que proposé par les résultats de la présente étude. L'absence de différence significative et l'effet négatif de la fertilisation potassique sur la production de pois indépendamment de la richesse en K_{M3} du sol ne permet pas de justifier les fortes doses de K_2O appliquées actuellement au Québec atteignant jusqu'à 120 kg/ha. Dans une étude sur le pois sec, Lafond et Pageau (2010) ont également fait des observations similaires.

Tableau 22. Comparaison des recommandations en K₂O pour la production de pois 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	-	110	CRAAQ (2010)
			101-200	-	90	
			201-300	-	75	
			301-400	-	60	
			401-500	-	50	
			501-600	-	40	
> 600	-	20				
Ontario (CAN)	À la volée avant le semis, ou en bande au semis	Non	K _{AA}	Objectif de rendement	0-120	MAAARO (2010)
Prairies canadiennes (CAN)	-	Non	-	-	Le K est appliqué uniquement sur des sols ayant des déficiences extrême	Alberta Agriculture and Rural Development (2014)
Les Maritimes (CAN)	-	Non	-	-	Le K peut être appliqué avant le semis et incorporé	Atlantic Provinces Advisory Committee on Vegetable Crops (1989)
Minnesota (É-U)	-	Non	K _{AA}	Objectif de rendement	0-110	Rosen et Eliason (2005)
Nouvelle Angleterre (É-U)	À la volée ou intégré au semoir	Non	-	-	0-170	University of Massachusetts Amherst (Amherst) (2018)
Michigan (É-U)	À la volée, au semis	Non	K _{AA}	-	0-180	Warncke <i>et al.</i> (1992)
Mid-Atlantic (É-U)	À la volée et incorporé	Non	K _{M3}	-	0-135	PennState Extension (2020)

¹ K_{AA} : dosé par la méthode à l'acétate d'ammonium; K_{M3} : dosé par la méthode Mehlich-3 (Mehlich, 1984).

5. FERTILISATION DU POIS

Valeurs scientifiques de référence en fertilisation

AZOTE		
Groupe de textures ¹	Mode et période d'application	VSRF ² (kg N/ha)
G1, G2 et G3	À la volée avant le semis et incorporé	0 – 15 ³

PHOSPHORE			
Groupe de textures ¹	Classe de fertilité ISP ₁ ^{4,5} (%)	Mode et période d'application	VSRF ² (kg P ₂ O ₅ /ha)
G1	≤ 7,6	À la volée avant le semis et incorporé	25 ⁶
	7,7 – 15,2		20 ⁷
	> 15,2		0
G2, G3	≤ 3,6	À la volée avant le semis et incorporé	60 ⁸
	3,7 – 13,1		30 ⁹
	13,2 – 26,2		20 ⁷
	> 26,2		0

POTASSIUM			
Groupe de textures ³	Classe de fertilité K _{M3} ¹⁰ (ppm)	Mode et période d'application	VSRF ² (kg K ₂ O/ha)
G1	.	À la volée avant le semis et incorporé	30 ⁹
G2, G3	≤ 145	À la volée avant le semis et incorporé	30 ⁹
	> 145		0 ¹¹

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

² VSRF : Valeurs scientifiques de référence en fertilisation.

³ Plus petite dose testée en absence de réponse à la fertilisation.

⁴ ISP₁ : saturation en P = [P_{M3} (ppm) / Al_{M3} (ppm)] × 100, éléments extraits au Mehlich-3 (1984) et dosé par spectroscopie d'émission au plasma (SEP ou ICP : *Inductively coupled plasma*).

⁵ Les catégories ont été déterminées selon les seuils environnementaux (CRAAQ, 2010) et des seuils obtenus avec le test de Cate-Nelson.

⁶ Dose moyenne pondérée du groupe de doses 20 – 30 P. Dose agronomique optimale déterminée sur la base des intervalles de confiance.

⁷ Exportations en P₂O₅ de la culture.

⁸ Dose agronomique optimale (médiane du groupe de doses 40 – 60 P) dans cette catégorie de sols.

⁹ Dose agronomique optimale déterminée sur la base des intervalles de confiance.

¹⁰ K_{M3} : dosé par la méthode Mehlich-3 (Mehlich, 1984).

¹¹ Dose nulle recommandée en raison des pertes de rendements enregistrées dans les sols à haute teneur en K.

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 classes de fertilité et les apports d'éléments majeurs. Ces recommandations reposent sur l'analyse des données validées d'expérimentations scientifiques québécoises réalisées au champ, appuyée de l'expertise agronomique et de principes scientifiques reconnus dans le domaine de la nutrition des cultures. Dans l'ensemble, ces recommandations sont inférieures à celles des grilles antérieures (CRAAQ, 2010) sans compromettre les rendements. Dans le cas des recommandations en phosphore (P), celles-ci ont pu être précisées par l'intégration d'un double indicateur qui considère le groupe de textures du sol et son indice de saturation en P (ISP). En effet, la texture du sol influence grandement la mise en disponibilité du P du sol, tandis que l'ISP est reconnu pour être un meilleur indicateur agroenvironnemental de la disponibilité du P que la seule considération de sa concentration dans le sol. Par conséquent, la considération du groupe de textures des sols est une amélioration importante et complémentaire à l'utilisation des seuils critiques environnementaux du REA conformément à la réglementation en vigueur, aussi intégrés dans les recommandations de l'IRDA. De plus, pour la fertilisation phosphatée, les apports sont 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 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 du pois. Nos gratitudee sont exprimées plus spécifiquement à M. Gabriel Deslauriers, agronome et conseiller pour le Groupe PleineTerre, pour son appui et le partage des données des essais de fertilisation d'Émile Chamberland portant sur le pois.

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

- AGUIAR, J., LAEMMLER, F., BAAMEUR, A., & MAYBERRY, K., 1998. SNAP BEAN PRODUCTION IN CALIFORNIA. [HTTPS://ESCHOLARSHIP.ORG/UC/ITEM/35M050V5](https://escholarship.org/uc/item/35m050v5). CONSULTÉ LE 2020-07-02.
- ALBERTA AGRICULTURE AND RURAL DEVELOPMENT, 2014. COMMERCIAL VEGETABLE PRODUCTION ON THE PRAIRIES, EDMONTON, ALBERTA.
- ALBERTA AGRICULTURE AND FORESTRY, 2016. ALBERTA IRRIGATION MANAGEMENT MANUAL. (EN LIGNE) [HTTP://WWW1.AGRIC.GOV.AB.CA/\\$DEPARTMENT/DEPTDOCS.NSF/ALL/IRR14310/\\$FILE/2016_IRR_MANAG_MANUAL.PDF](http://www1.agric.gov.ab.ca/$DEPARTMENT/DEPTDOCS.NSF/ALL/IRR14310/$FILE/2016_IRR_MANAG_MANUAL.PDF) CONSULTÉ LE 2020-07-13.
- ADVISORY COMMITTEE ON VEGETABLE CROPS, 1989. PEAS. DANS : VEGETABLE CROPS PRODUCTION GUIDE FOR THE ATLANTIC PROVINCES. 7 PAGES.
- 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.
- BECKIE, H. J., S.A. BRANDT. 1997. NITROGEN CONTRIBUTION OF FIELD PEA IN ANNUAL CROPPING SYSTEMS. 1. NITROGEN RESIDUAL EFFECT. *CANADIAN JOURNAL OF PLANT SCIENCE* 77(3): 311-322.
- BRADY, N. C., & WEIL, R. R., 1984. SOIL REACTION: ACIDITY AND ALKALINITY. THE NATURE AND PROPERTIES OF SOILS. MACMILLAN PUBL. CO., NEW YORK, 189-222.
- 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)
- 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.
- CHAMBERLAND, E. 1982. PRÉDICTION DES BESOINS EN ENGRAIS N, P ET K DES LÉGUMES CULTIVÉS EN SOL MINÉRAL : POIS ET HARICOTS. *CANADIAN JOURNAL SOIL OF SCIENCE* 62 (4) : 663-672.
- COPE, J. T., ROUSE, R. D., WALSH, L. M. ET BEATON, J. D. (1973). INTERPRETATION OF SOIL TEST RESULTS. *SOIL TESTING AND PLANT ANALYSIS*, 35-54.
- CORDOVILLA, M. P., A. OCAÑA, F. LIGERO & C. LLUCH, 1995. SALINITY EFFECTS ON GROWTH ANALYSIS AND NUTRIENT COMPOSITION IN FOUR GRAIN LEGUMES - RHIZOBIUM SYMBIOSIS, *JOURNAL OF PLANT NUTRITION*, 18:8, 1595-1609, DOI: 10.1080/01904169509365006.
- CENTRE DE RÉFÉRENCE EN AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE DU QUÉBEC (CRAAQ), 2010. GUIDE DE RÉFÉRENCE EN FERTILISATION. 2E ÉDITION. CRAAQ, QUÉBEC. 473 P.
- CHEMINING'WA, G. N., & VESSEY, J. K., 2006. THE ABUNDANCE AND EFFICACY OF RHIZOBIUM LEGUMINOSARUM BV. VICIAE IN CULTIVATED SOILS OF THE EASTERN CANADIAN PRAIRIE. *SOIL BIOLOGY AND BIOCHEMISTRY*, 38(2), 294-302.
- CORNELL UNIVERSITY, 2020. SOIL TEST CONVERSIONS. DERIVING CORNELL MORGAN EQUIVALENTS FROM MEHLICH-3, AND MORGAN AND MODIFIED MORGAN SOIL TESTS FROM OTHER LABORATORIES NUTRIENT MANAGEMENT SPEAR PROGRAM. PAGE WEB: [HTTP://NMSP.CALS.CORNELL.EDU/PUBLICATIONS/SOILCONVERSION.HTML](http://nmsp.cals.cornell.edu/publications/soilconversion.html). (CONSULTÉ LE 2020-07-10)
- CULMAN, S., MANN, M., SHARMA, S., SAEED, M. T., FULFORD, A., LINDSEY, L., & JOERN, B., 2019. CONVERTING BETWEEN MEHLICH-3, BRAY P, AND AMMONIUM ACETATE SOIL TEST VALUES. THE OHIO STATE UNIVERSITY, OHIO.
- CUTCLIFFE, J.A. ET MUNRO, D.C. 1980. EFFECTS OF NITROGEN PHOSPHORUS, POTASSIUM, AND LIME ON YIELD AND MATURITY OF GREEN PEAS. *CAN. J. PLANT Sci.* 60: 599-604.
- DELGADO, M. J., LIGERO, F., & LLUCH, C., 1994. EFFECTS OF SALT STRESS ON GROWTH AND NITROGEN FIXATION BY PEA, FABA-BEAN, COMMON BEAN AND SOYBEAN PLANTS. *SOIL BIOLOGY AND BIOCHEMISTRY*, 26(3), 371-376.

- DESLAURIERS, G., 2014. MÉTA-ANALYSE D'ESSAIS DE FERTILISATION N, P ET K SUR LE HARICOT ET LE POIS [MÉMOIRE DE MAÎTRISE EN SOLS ET ENVIRONNEMENT]. UNIVERSITÉ LAVAL.
- 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.
- ENVIRONNEMENT CANADA, 2020. NORMALES CLIMATIQUES 1981-2010. CLIMAT DU QUÉBEC. [EN LIGNE] [HTTP://WWW.ENVIRONNEMENT.GOUV.QC.CA/CLIMAT/NORMALES/CLIMAT-QC.HTM](http://www.environnement.gouv.qc.ca/climat/normales/climat-qc.htm). CONSULTÉ LE 2020-07-14.
- FÉDÉRATION QUÉBÉCOISE DES PRODUCTEURS DE FRUITS ET LÉGUMES DE TRANSFORMATION (FQPFLT), 2018. GUIDE DE PRODUCTION DES LÉGUMES DE TRANSFORMATION – POIS. [EN LIGNE] [HTTPS://WWW.LEGUMES-TRANSFORMATION.QC.CA/WP-CONTENT/UPLOADS/2018/02/GUIDE-COMPLET-POIS-VERSION-PDF-COMPLET-SITE-WEB.PDF](https://www.legumes-transformation.qc.ca/wp-content/uploads/2018/02/guide-complet-pois-version-pdf-complet-site-web.pdf). CONSULTÉ LE 2020-06-02. CONSULTÉ LE 2020-07-02
- GARTLEY, K. L., SIMS, J. T., OLSEN, C. T., & CHU, P., 2002. COMPARISON OF SOIL TEST EXTRACTANTS USED IN MID-ATLANTIC UNITED STATES. *COMMUNICATIONS IN SOIL SCIENCE AND PLANT ANALYSIS*, 33(5-6), 873-895.
- HARTMANN, H.T., A.M. KOFRANEK, V.E. RUBATZKY, AND W.J. FLOCKER. 1988. *PLANT SCIENCE: GROWTH, DEVELOPMENT AND UTILIZATION OF CULTIVATED PLANTS*. 2ND ED. PRENTICE HALL CAREER AND TECHNOLOGY, ENGLEWOOD CLIFFS, NJ.
- 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].
- JOHNSTON, A., KARAMANOS, R. ET MCKENZIE, R. 2002. FIELD PEA RESPONSES TO PHOSPHORUS FERTILIZATION. *NEWS AND VIEWS*. [HTTPS://WWW.LEGUMEMATRIX.COM/IMAGES/563/FIELD%20PEA%20RESPONSE%20TO%20PHOSPHATE.PDF](https://www.legumematrix.com/images/563/field%20pea%20response%20to%20phosphate.pdf)
- KHIARI, L., PARENT, L. E., PELLERIN, A., ALIM, A. R. A., TREMBLAY, C., SIMARD, R. R., & FORTIN, J., 2000. AN AGRI - ENVIRONMENTAL PHOSPHORUS SATURATION INDEX FOR ACID COARSE - TEXTURED SOILS. *JOURNAL OF ENVIRONMENTAL QUALITY*, 29(5), 1561-1567.
- KHIARI L, PARENT L-É, TREMBALY 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. 2001B. CRITICAL COMPOSITIONAL NUTRIENT INDEXES FOR SWEET CORN AT EARLY GROWTH STAGE. *AGRON. J.*, 93, 809–814.
- 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
- LAFOND, J. ET PAGEAU, D. 2010. FERTILISATION PHOSPHATÉE ET POTASSIQUE DANS LA CULTURE DU POIS SEC. *CAN. J. PLANT SCI*. 90: 629-636.
- LANDRY, C., 2023, EN COURS DE RÉDACTION. RAPPORT SYNTHÈSE - MANDAT IRDA DE RÉVISION DES VALEURS SCIENTIFIQUES DE RÉFÉRENCE EN FERTILISATION 2020-2023 (MIRVRF).
- 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.
- MCKENZIE, R. H., MIDDLETON, A. B., BREMER, E., SOLBERG, E. D., DEMULDER, J., FLORE, N., ET CLAYTON, G. W. 2002. PEA NUTRIENT REQUIREMENTS IN ALBERTA. *AGDEX* 142/532_2. EDMONTON, AB. [HTTPS://WWW1.AGRIC.GOV.AB.CA/\\$DEPARTMENT/DEPTDOCS.NSF/BA3468A2A8681F69872569D60073FDE1/0216F3872F131C4B87256BF3006E2C82/\\$FILE/142_532-2.PDF](https://www1.agric.gov.ab.ca/$DEPARTMENT/DEPTDOCS.NSF/BA3468A2A8681F69872569D60073FDE1/0216F3872F131C4B87256BF3006E2C82/$FILE/142_532-2.PDF)
- MDDELCC, 2016. BILAN DE PHOSPHORE : PORTRAIT DES ANNÉES 2011 À 2013. DISPONIBLE [EN LIGNE] [HTTP://WWW.ENVIRONNEMENT.GOUV.QC.CA/MILIEU_AGRI/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).
- MDDELCC, 2017. GUIDE DE RÉFÉRENCE DU RÈGLEMENT SUR LES EXPLOITATIONS AGRICOLES. 185 PAGES. [EN LIGNE] [HTTP://WWW.MDDELCC.GOUV.QC.CA/MILIEUAGRICOLE/GUIDE-REFERANCE-REA.PDF](http://www.mddecc.gouv.qc.ca/milieuagricole/guide-referance-rea.pdf) (CONSULTÉ 2020-07-02).

- 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.
- 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, 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.
- PAVEK, P.L.S. 2012. PLANT FACT SHEET FOR PEA (PISUM SATIVUM L.). USDA-NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE. PULLMAN, WA. DISPONIBLE [EN LIGNE] [HTTPS://PLANTS.USDA.GOV/FACTSHEET/PDF/FS_PISA6.PDF](https://plants.usda.gov/factsheet/pdf/fs_pisa6.pdf) (CONSULTÉ LE 2020-07-15).
- PELLERIN, A., PARENT, L.-É., TREMBLAY, C., FORTIN, J., TREMBLAY, G., LANDRY, C. P., & KHIARI, L. 2006. AGRI-ENVIRONMENTAL MODELS USING MEHLICH-III SOIL PHOSPHORUS SATURATION INDEX FOR CORN IN QUEBEC. CANADIAN JOURNAL OF SOIL SCIENCE, 86(5), 897-910.
- PENNSSTATE EXTENTION, 2020. 2020/2021 MID-ATLANTIC COMMERCIAL VEGETABLE PRODUCTION RECOMMENDATIONS. 439 PAGES.
- 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.
- SAADALLAH, K., ABDELLY, C., & DREVON, J. J. (2003). FIXATION BIOLOGIQUE DE L'AZOTE EN CONDITIONS DE SALINITE ET DE DEFICIENCE EN PHOSPHORE CHEZ DEUX VARIETES DE HARICOT: COCO BLANC SENSIBLE ET BAT 477 TOLERANTE. COLLOQUES-INRA, 203-216.
- 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. [EN LIGNE] DOI [HTTPS://DOI.ORG/10.25318/3210036501-FRA](https://doi.org/10.25318/3210036501-fra) CONSULTÉ LE 27 MAI 2020.
- TABI, M., TARDIF, L., CARRIER, D., LAFLAMME, G., & ROMPRÉ, M., 1990. INVENTAIRE DES PROBLÈMES DE DÉGRADATION DES SOLS AGRICOLES DU QUÉBEC. RAPPORT SYNTHÈSE. MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, DES PÊCHERIES ET DE L'ALIMENTATION DU QUÉBEC.
- TRAN, T. S., GIROUX, M., GUILBEAULT, J., & AUDESSE, P., 1990. EVALUATION OF MEHLICH - III EXTRACTANT TO ESTIMATE THE AVAILABLE P IN QUEBEC SOILS. COMMUNICATIONS IN SOIL SCIENCE AND PLANT ANALYSIS, 21(1-2), 1-28.
- UNIVERSITY OF MASSACHUSETTS AMHERST, 2018. NEW ENGLAND VEGETABLE MANAGEMENT GUIDE [EN LIGNE] [HTTPS://NEVEGETABLE.ORG/CROPS/PEA](https://nevegetable.org/crops/pea) (CONSULTÉ LE 2020-06-16)
- WARNCKE, D. D., CHRISTENSON, D. R., JACOBS, L. W., VITOSH, M. L., & ZANDSTRA, B. H., 1992. FERTILIZER RECOMMENDATIONS FOR VEGETABLE CROPS IN MICHIGAN. EXTENSION BULLETIN E-COOPERATIVE EXTENSION SERVICE, MICHIGAN STATE UNIVERSITY (USA).
- ZIADI, N., SEN TRAN, T., 2008. MEHLICH 3-EXTRACTABLE ELEMENTS. IN: CARTER, M.R., GREGORICH, E.G. (EDS.), SOIL SAMPLING AND METHODS OF ANALYSIS. CRC PRESS, BOCA RATON, FLORIDA, U.S.A., PP. 81–88

Annexe 1

Sommaire des données exclues de l'analyse et justifications

Code du site	Donnée exclue	Raison justifiant l'exclusion
4	Site	Les rendements commercialisables sont inférieurs aux rendements de référence minimum de l'année et à ceux du producteur chez qui l'essai a été conduit.
5	Site	Les photos démontrent que les plants sont très jaunes à la récolte. Les rendements commercialisables sont inférieurs aux rendements de référence minimum de l'année.
12	Site	Les rendements sont sous les rendements de référence de l'année. Un problème est survenu avec la batteuse; du matériel s'est accumulé de façon importante dans la batteuse sans que le collaborateur ne s'en rende compte.
10	Essai N : bloc 1 Essai P : bloc 2 Essai K : bloc 3	Un patron de rendement non contrôlé par le dispositif affecte la partie centrale du dispositif. Une relation linéaire entre rendement et population est observable.
11	Essai P	Des oies ont endommagé les parcelles de l'essai P. Le semis était superficiel et sur des résidus de maïs.
2	110	Le rendement de cette parcelle est aberrant (10 fois supérieur à la moyenne de toutes les parcelles). Erreur de saisie.
28	Site	Très grande variabilité des rendements (rendement relatif à la médiane oscillant entre 50 et 200 %). La procédure de régression robuste a identifié plusieurs observations de ce site comme aberrantes.