

Fertilisation du haricot frais. Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation du Québec (2020-2023). Fascicule 02 : Haricot frais.

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

LE RAPPORT PEUT ÊTRE CITÉ COMME SUIT :

Landry, C., J. Forest-D., S. Houde, C.-A. Joseph et M. Grenier. 2021. Fertilisation du haricot frais. Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation du Québec (2020-2023). Fascicule 02 : Haricot frais. Présenté au ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation. 54 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.
Julie Desautels, M. Sc.
Simon Guillemette, M. Sc.
Anne-Mary Le Guennec

ÉTABLISSEMENT DES VALEURS SCIENTIFIQUES DE RÉFÉRENCE EN FERTILISATION :
Christine Landry, agr., biologiste, Ph. D.
Julie Forest-Drolet, M. Sc.
Stéphanie Houde, agr., 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 des 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 PSEFCM	10
1.3.2	DONNÉES DE CHAMBERLAND (1982) ET DUBÉ (1974)	13
1.4	DISPOSITIFS EXPÉRIMENTAUX ET TRAITEMENTS	14
1.4.1	DONNÉES PSEFCM	14
1.4.2	DONNÉES DE DUBÉ (1974) ET DE CHAMBERLAND (1982)	16
1.5	RENDEMENTS COMMERCIALISABLES	17
1.6	ASPECTS ADDITIONNELS POUR L'INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS.....	19
1.6.1	VARIÉTÉS	19
1.6.2	PRÉCÉDENTS CULTURAUX	19
1.6.3	IRRIGATION	19
1.7	ANALYSE EXPLORATOIRE.....	19
1.8	CALCULS ET ANALYSES STATISTIQUES.....	20
1.8.1	DÉTERMINATION DES CLASSES DE FERTILITÉ DES SOLS	21
1.8.2	DÉTERMINATION DES DOSES OPTIMALES DE FERTILISANTS	22
1.8.3	DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL ET QUANTITÉS D'ÉLÉMENTS NUTRITIFS EXPORTÉS	23
2.	FERTILISATION AZOTÉE	25
2.1	PORTRAIT ET REPRÉSENTATIVITÉS DES DONNÉES.....	25
2.2	DÉTERMINATION DES DOSES AGRONOMIQUES OPTIMALES	25
2.2.1	RECHERCHE D'INDICATEURS DE FERTILITÉ DU SOL	25
2.2.2	EFFET DE LA DOSE D'AZOTE SUR LE RENDEMENT COMMERCIALISABLE	26
2.3	DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL ET EXPORTATIONS EN AZOTE.....	28
2.4	NITRATE RÉSIDUEL À LA RÉCOLTE.....	30
2.5	FERTILISATION AZOTÉE PROPOSÉE ET COMPARAISON AVEC LES RECOMMANDATIONS AU CANADA ET À L'ÉTRANGER.....	32
3.	FERTILISATION PHOSPHATÉE.....	34
3.1	PORTRAIT ET REPRÉSENTATIVITÉS DES DONNÉES.....	34
3.2	DÉTERMINATION DES DOSES AGRONOMIQUES OPTIMALES	34
3.2.1	RECHERCHE D'INDICATEURS DE FERTILITÉ.....	34
3.2.2	EFFET DE LA DOSE DE PHOSPHORE SUR LE RENDEMENT COMMERCIALISABLE	35
3.3	DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL ET EXPORTATIONS EN PHOSPHORE	37
3.4	FERTILISATION PHOSPHATÉE PROPOSÉE ET COMPARAISON AVEC LES RECOMMANDATIONS AU CANADA ET À L'ÉTRANGER.....	38
4.	FERTILISATION POTASSIQUE	41
4.1	PORTRAIT ET REPRÉSENTATIVITÉ DES DONNÉES	41
4.2	DÉTERMINATION DES DOSES AGRONOMIQUES OPTIMALES	41
4.2.1	RECHERCHE D'INDICATEURS DE FERTILITÉ DU SOL	41
4.2.2	EFFET DE LA DOSE DE POTASSIUM SUR LE RENDEMENT COMMERCIALISABLE	42
4.3	DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL ET EXPORTATIONS EN POTASSIUM.....	44
4.4	FERTILISATION POTASSIQUE PROPOSÉE ET COMPARAISON AVEC LES RECOMMANDATIONS AU CANADA ET À L'ÉTRANGER	45
5.	FERTILISATION DU HARICOT FRAIS VALEURS SCIENTIFIQUES DE RÉFÉRENCE EN FERTILISATION	48

6. CONCLUSION	49
REMERCIEMENTS.....	49
7. RÉFÉRENCES	50
ANNEXE 1.....	54

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1. DESCRIPTION SOMMAIRE DES SITES D'ESSAIS DE FERTILISATION DU HARICOT	11
TABLEAU 2. PORTRAIT DES SITES DES ESSAIS DE FERTILISATION AVANT LA VALIDATION DES DONNÉES	12
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	16
TABLEAU 6. DESCRIPTION DES TRAITEMENTS DES ESSAIS DE FERTILISATION NPK DE DUBÉ (1974) ET DE CHAMBERLAND (1982)	16
TABLEAU 7. BILAN DE LA VALIDATION DES DONNÉES À L'ISSUE DE L'ANALYSE EXPLORATOIRE	20
TABLEAU 8. RÉPARTITION DES BLOCS DES ESSAIS N SELON DIFFÉRENTES CLASSES DE PROPRIÉTÉS DE SOL APRÈS LA VALIDATION DES DONNÉES	25
TABLEAU 9. VALEURS CRITIQUES DES INDICATEURS POTENTIELS DE SOLS SIGNIFICATIFS SELON LES TESTS DE CATE-NELSON POUR LES ESSAIS N	26
TABLEAU 10. CONCENTRATION ET EXPORTATIONS D'AZOTE DU HARICOT SELON LE DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL	29
TABLEAU 11. FERTILISATION AZOTÉE DU HARICOT – VALEURS SCIENTIFIQUES DE RÉFÉRENCE EN FERTILISATION	32
TABLEAU 12. COMPARAISON DES RECOMMANDATIONS EN N POUR LA PRODUCTION DE HARICOT AU CANADA ET À L'ÉTRANGER	33
TABLEAU 13. RÉPARTITION DES BLOCS DES ESSAIS P SELON DIFFÉRENTES CLASSES DE PROPRIÉTÉS DE SOL APRÈS LA VALIDATION DES DONNÉES	34
TABLEAU 14. VALEURS CRITIQUES DES INDICATEURS POTENTIELS DE SOLS SIGNIFICATIFS SELON LES TESTS DE CATE-NELSON POUR LES ESSAIS P	35
TABLEAU 15. CONCENTRATION ET EXPORTATIONS DE PHOSPHORE DU HARICOT SELON LE DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL	38
TABLEAU 16. FERTILISATION PHOSPHATÉE DU HARICOT – VALEURS SCIENTIFIQUES DE RÉFÉRENCE EN FERTILISATION	39
TABLEAU 17. COMPARAISON DES RECOMMANDATIONS EN P ₂ O ₅ POUR LA PRODUCTION DE HARICOT AU CANADA ET À L'ÉTRANGER	40
TABLEAU 18. RÉPARTITION DES BLOCS DES ESSAIS K SELON DIFFÉRENTES CLASSES DE PROPRIÉTÉS DE SOL APRÈS LA VALIDATION DES DONNÉES	41
TABLEAU 19. VALEURS CRITIQUES DES INDICATEURS POTENTIELS DE SOLS SIGNIFICATIFS SELON LES TESTS DE CATE-NELSON POUR LES ESSAIS K	42
TABLEAU 20. CONCENTRATION ET EXPORTATIONS DE POTASSIUM DU HARICOT SELON LE DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL	45
TABLEAU 21. FERTILISATION POTASSIQUE DU HARICOT – VALEURS SCIENTIFIQUES DE RÉFÉRENCE EN FERTILISATION	46
TABLEAU 22. COMPARAISON DES RECOMMANDATIONS EN K ₂ O POUR LA PRODUCTION DE HARICOT AU CANADA ET À L'ÉTRANGER	47

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1. RÉPARTITION GÉOGRAPHIQUE DES SITES D'HARICOT SELON LA SOURCE DES DONNÉES.....	9
FIGURE 2. DISTRIBUTION DES BLOCS (PSEFCM) ET DES SITES (CHAMBERLAND, 1982) DES ESSAIS DE HARICOT DANS LE TRIANGLE TEXTURAL.	14
FIGURE 3. RENDEMENTS COMMERCIALISABLES SELON L'ÉLÉMENT TESTÉ, LES SITES ET LES DOSES CROISSANTES D'ENGRAIS.	18
FIGURE 4. DÉFINITIONS DES QUADRANTS D'UN TEST DE PARTITION BINAIRE DE CATE-NELSON (1979).....	22
FIGURE 5. RÉSULTATS DES ANALYSES DE VARIANCE SUR LA RÉPONSE DE LA CULTURE AUX DOSES CROISSANTES D'AZOTE.....	28
FIGURE 6. EXPORTATIONS D'AZOTE EN FONCTION DES RENDEMENTS DU HARICOT EXPRIMÉS SELON (A) LES VARIÉTÉS ET (B) LE DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL.	29
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 HARICOT DU PSEFCM.....	31
FIGURE 8. RÉSULTATS DES ANALYSES DE VARIANCE SUR LA RÉPONSE DE LA CULTURE AUX DOSES CROISSANTES DE PHOSPHORE.....	37
FIGURE 9. EXPORTATIONS DE PHOSPHORE EN FONCTION DES RENDEMENTS DU HARICOT EXPRIMÉS SELON (A) LES VARIÉTÉS ET (B) LE DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL.	38
FIGURE 10. RÉSULTATS DES ANALYSES DE VARIANCE DE L'ESSAI K DANS CULTURE DU HARICOT.	44
FIGURE 11. EXPORTATIONS DE POTASSIUM EN FONCTION DES RENDEMENTS DU HARICOT EXPRIMÉS SELON (A) LES VARIÉTÉS ET (B) LE DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL.	45

1. PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES ESSAIS ET DES ANALYSES

1.1 Provenance des données

Dans le cadre de l'établissement des VSRF du haricot frais, les données issues du PSEFCM ont été bonifiées par l'ajout de données supplémentaires québécoises issues d'essais réalisés en 1974 par Armand Dubé, puis de 1978 à 1980 par Émile Chamberland (MAPAQ, projet no. 830-50). Les données des essais de fertilisation devaient satisfaire les 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 PSEFCM du haricot ont été menés en Montérégie de 2008 à 2011, dans les Municipalités Régionales de Comté (MRC) des Maskoutains, du Haut-Richelieu, de Beauharnois-Salaberry, des Jardins-de-Napierville, de Roussillon et de Brome-Missisquoi (Figure 1). Les données GPS de ces sites sont consignées au Tableau 1, exception faite de deux sites où elles sont manquantes. Les 17 essais de Chamberland (1982) et de Dubé (1974) se répartissent en Montérégie, Capitale-Nationale, Chaudière-Appalaches et Centre du Québec. La géolocalisation la plus précise pour ces données est la municipalité de l'essai (Tableau 1). La répartition géographique des essais de Chamberland (1982) est bénéfique car elle améliore grandement la répartition provinciale.

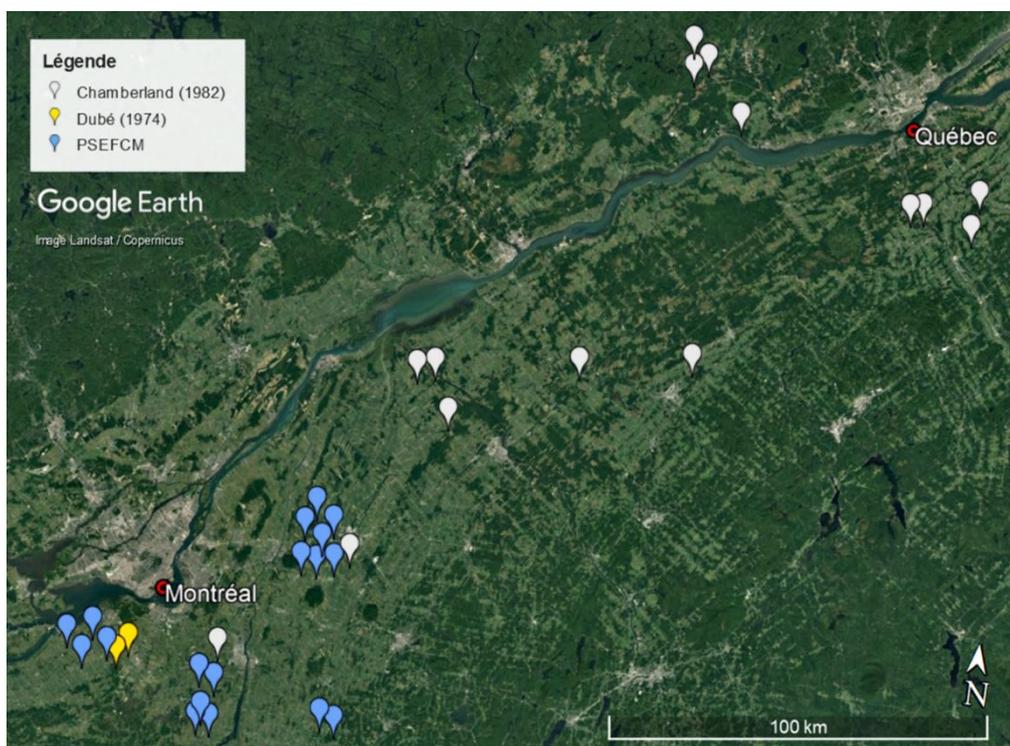


Figure 1. Répartition géographique des sites d'haricot selon la source des données. L'emplacement des repères est approximatif et vise seulement à représenter la répartition géographique des sites sur le territoire du Québec. PSEFCM : Programme de soutien aux essais de fertilisation des cultures maraîchères.

1.3 Propriétés physico-chimiques des sols

Une synthèse comparative des essais en fonction de la source des données est présentée au Tableau 1. Celle-ci permet de valider l'intégration des jeux de données pour les principaux aspects agronomiques, géographiques et expérimentaux.

1.3.1 Données PSEFCM

Les informations issues des cartes pédologiques indiquent que les essais ont été conduits sur des unités pédologiques variées (Tableau 1). Les tables pédologiques, ainsi que les commentaires fournis par les collaborateurs, indiquent cependant que les sols testés seraient facilement sujets aux problèmes de compaction et de drainage (Tableau 1). Or, le mauvais drainage de surface est un frein à la production de haricots (FQPFLT, 2018). 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. Par conséquent, les besoins en N, P et K de la culture ont pu être sous-estimés ou surestimés lorsque les conditions du sol étaient moins productives.

Les analyses de sol ont confirmé que 45,8 % des sites PSEFCM étaient établis sur des sols à texture fine (G1) et 41,7 % sur des sols à texture grossière (G3). Sur le reste des sites (12,5 %), les classes texturales variaient entre les blocs d'un même site. Par exemple, le site no 9 appartenait aux trois classes texturales (grossière, moyenne et fine). La matière organique du sol mesurée par la méthode de perte au feu a varié de 1,2 à 7,1 %, avec 50 % des sites hors de la plage optimale de 3 à 5 % (CRAAQ, 2010; Tableau 1). Sur l'ensemble des essais PSEFCM, les sols avaient des pH_{eau} fortement acides à faiblement alcalins, variant de 5,0 à 7,6 (Cescas, 1978).

Les seuils de richesse des sols en P_{M3} et K_{M3} ont été fixés à 200 kg/ha. Pour le K_{M3} , le seuil est plus bas que celui des autres cultures du PSEFCM (à l'exception du pois) établi à 400 kg K_{M3} /ha, car le haricot est sensible à la salinité du sol (Aguiar et al., 1998). Ces seuils ont servi à déterminer les doses d'engrais appliquées par traitement (voir section 1.4.1).

Tableau 1. Description sommaire des sites d'essais de fertilisation du haricot

Source des données (Institution)	No. Site	Série de sol, texture ¹	Essais NPK			Essais N		Essais P		Essais K	
			Lat.	Long.	Argile %	MO ²	Rendement commercialisable ⁴	Teneur en P du sol ³	Rendement commercialisable ⁴	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 maraichères (PSEFCM, MAPAQ)	1	Ménard, LSG / Botreaux, LS / Léry, LS / St-Benoît, LS	45,21	-73,34	19	4,5	15 573	433	15 114	580	15 606
	2	Napierville, LSA	45,23	-73,40	22	3,3	11 664	164	11 886	276	12 010
	3	St-Damase, LS fin / St-Urbain, LLIA	45,52	-73,06	17	1,5	11 115	206	11 940	170	11 746
	4	nd	nd	nd	19	1,7	13 882	430	14 122	330	14 886
	5	nd	nd	nd	14	1,3	6 118	345	5 876	241	6 267
	6	Ste-Rosalie, A	45,30	-73,78	56	3,9	17 166	130	17 667	478	17 947
	7	Shefford LG / Milton LS	45,14	-72,92	25	7,1	4 448	146	4 817	125	4 930
	8	nd	nd	nd	16	2,7	5 157	216	5 322	88	5 885
	9	Lacolle, LSF/St-Valentin, LSF	45,11	-73,34	25	3,3	12 185	127	14 328	238	14 883
	10	Lacolle, LSF /St-Valentin, LSF	45,11	-73,34	19	2,7	10 185	174	10 350	244	9 466
	11	Lacolle, LSF /St-Valentin, LSF	45,11	-73,34	13	2,5	14 316	272	14 701	409	14 991
	12	Ste-Rosalie, A	45,27	-73,86	50	3,5	4 374	163	5 047	433	3 721
	13	Ste-Rosalie, A	45,29	-73,87	34	3,5	14 316	82	14 428	342	13 792
	14	St-Hyacinthe, LLI	45,66	-73,06	29	2,6	5 263	229	5 219	385	5 626
	15	St-Hyacinthe, LLIA	45,65	-73,07	34	3,4	13 822	469	14 618	410	14 529
	16	Providence, ALI	45,26	-73,72	64	4,5	7 399	92	8 127	570	7 521
Dubé et Chamberland (MAPAQ)	17	Achigan, SL	nd	nd	nd	5,5	14 308	107	13 576	50	13 857
	18	Morin, LS	nd	nd	5	3,7	7 123	94	4 794	63	5 059
	19	St-Jude, S	nd	nd	2	2,5	9 481	347	10 225	197	10 599
	20	Morin, LS	nd	nd	8	4,5	2 747	54	2 923	133	2 693
	21	Beaurivage, L	nd	nd	nd	6,9	10 853	49	11 416	168	10 584
	22	Leeds, LS	nd	nd	12	6,2	5 953	20	4 711	104	5 681
	23	Kamouraska, LA	nd	nd	nd	11,3	2 440	35	2 152	73	2 645
	24	Kamouraska, L	nd	nd	nd	11,2	3 440	55	3 428	81	3 041
	25	Neubois, L	nd	nd	22	nd	1 810	41	1 614	123	2 370
	26	Neubois, LS	nd	nd	14	5,4	3 241	15	3 997	107	3 835
	27	St-Damase, L	nd	nd	25	4,7	7 598	249	8 310	520	8 474
	28	St-Blaise, L	nd	nd	22	2,9	9 597	29	10 826	211	10 216
	29	Sorel; St-Amable, LS	nd	nd	14	7,9	9 037	146	8 340	130	7 995
	30	St-Jude, SL	nd	nd	7	10,0	6 927	82	7 113	119	7 500
	31	Pierreville, LS	nd	nd	10	5,4	8 047	61	6 820	122	7 709
	32	Pierreville, LS	nd	nd	10	4,7	20 265	249	20 368	520	21 707
	33	Kingsey, L	nd	nd	nd	5,5	13 691	87	13 680	104	13 404
Tous les sites						4,7	9 482	162	9 604	256	9 689

¹ Information 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; L : Loam; LA : loam argileux; LS : loam sableux; LLI : loam limoneux; LSF : loam sableux fin; LSA : loam sableux argileux; LLIA : loam limono-argileux; S : sable; SL : sable loameux; nd : non disponible.

² MO : matière organique analysée par perte au feu.

³ 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 Haricot de 2008 à 2012 au Québec était de 4 750 à 6 500 kg/ha (Profil sectoriel de l'industrie horticole au Québec, Édition 2016).

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

	PSEFCM	Chamberland (1982)	Dubé (1974)
Nombre de sites <i>Total, avant validation</i>	16	15	2
Période	2008 à 2011	1978 à 1980	1974
Régions administratives	Montérégie	Capitale-Nationale Chaudière-Appalaches Montérégie Centre du Québec	Chaudière-Appalaches
Période(s) de semis	Fin mai, juin et juillet	Fin mai à juin	Début juin
Durée moyenne des essais	63 jours	64 jours	nd
Doses testées (kg/ha) <i>L'intervalle testé varie également en fonction des sites et des années.</i>	N 0 à 120 P ₂ O ₅ 0 à 120 K ₂ O 0 à 120	N 0 à 30 P ₂ O ₅ 0 à 60 K ₂ O 0 à 90	N 0 à 60 P ₂ O ₅ 0 à 60 K ₂ O 0 à 180
Classes texturales représentées	Prédominance de G1 et de G3, quelques G2	G2, G3	G1, G2
P _{Mehlich-3} moyen des sols	104 ppm	48 ppm	20 ppm
ISP ₁ moyen des sols	14,5 %	4,0 % ¹	2,2 % ¹
K _{Mehlich-3} moyen des sols	167 ppm	80 ppm	34 ppm
Matière organique du sol	Walkley-Black : 3,1 % Perte au feu : 3,3 %	Walkley-Black : 4,8 %	Walkley-Black : 10,7 %
pH _{eau} du sol	6,2	6,0	5,6
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	Blocs complets aléatoires comportant 10 traitements (doses croissantes de N, P et K) - 4 répétitions	On suppose que le dispositif est le même que Chamberland (1982) : blocs aléatoires complets comportant 10 traitements NPK - 3 répétitions
Variétés culturales	Caprice Escalibur Ferrari Gold Mine	Harris Morgan Matador Minuette Slenderpack	Kinghorn Brittle Wax Pencil Pod
Espacement entre-rang	50 à 76 cm, selon les sites	1978 : 75 cm 1979 et 1980 : 50 cm	nd
Application des engrais	En bande	À la volée et incorporés	À la volée et incorporés
Précédents culturaux	Mais grain Pois	Information non disponible	nd
Irrigation	Non irrigué ou information non disponible	L'article de Chamberland (1982) laisse sous-entendre que les essais ne sont pas irrigués.	nd
Évaluation post-récolte	Aucune évaluation post-récolte n'a été prévue au protocole	Aucune évaluation post-récolte n'a été prévue au protocole	nd

¹ Les concentrations de Al (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 des séries de sol Leeds et Kingsey pour lesquelles des teneurs en Al provenant d'analyses de sol entre 2013 et 2015 ont été choisies.

nd : information non disponible.

1.3.2 Données de Chamberland (1982) et Dubé (1974)

Les essais de Chamberland (1982) et de Dubé (1974) étaient répartis sur des sols de textures moyennes à grossières et offraient un intervalle appréciable de teneurs en matière organique (entre 2,0 et 10,8 % dosé par la méthode Walkley-Black; Tableau 1; Chamberland, 1982). Le pH des sols variait entre 5,0 et 7,0. Sur cinq sites, le pH était sous 5,4 alors que l'intervalle de pH jugé acceptable se situe entre 5,5 et 7,5 (Aguiar et al., 1998). 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; CPVQ, 1992).

La teneur en matière organique du sol a été dosée par la méthode Walkley-Black (MO_{WB}) et a été convertie en matière organique dosée par la méthode de perte au feu (MO_{PAF}) en utilisant l'équation de conversion du Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (CEAEQ, 2003) :

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

Le P des essais a été dosé par la méthode Bray II (Chamberland, 1982) et a été converti en P_{M3} en utilisant l'équation de N. Samson (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 celle de Khiari et al. (2000) et 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 de 4 à 191 ppm P_{M3} (moyenne et médiane respectives de 45 et de 30 ppm). Ces sols étaient considérablement moins pourvus en P que ceux du PSEFCM (moyenne de 104 ppm P_{M3}). D'une part, cela représente une bonification importante du jeu de données, mais cette répartition pourrait résulter en une surestimation de la réponse car les sols des essais de Chamberland (1982) sont majoritairement très peu pourvus en P. Les informations disponibles ne comportaient pas les teneurs en Al des sols permettant de calculer l'indice de saturation en phosphore (ISP_1). Les teneurs en Al (ppm) ont donc 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). Les séries de sol Leeds et Kingsey font exception, car elles ne figuraient pas dans Tabi et al. (1990). Pour ces deux séries, les teneurs en Al sont issues de données plus récentes (2013 à 2015) 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 selon les années (M. Leblanc, 2020, communication personnelle).

Le K 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 Tran (1993), 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 Tran, 2008). Pour cette raison, il a été considéré que $K_{AA} = K_{M3}$. Ainsi, les teneurs en K_{M3} des sols s'évaluaient entre 15 et 300 ppm (moyenne et médiane respectives de 75 et de 55 ppm).

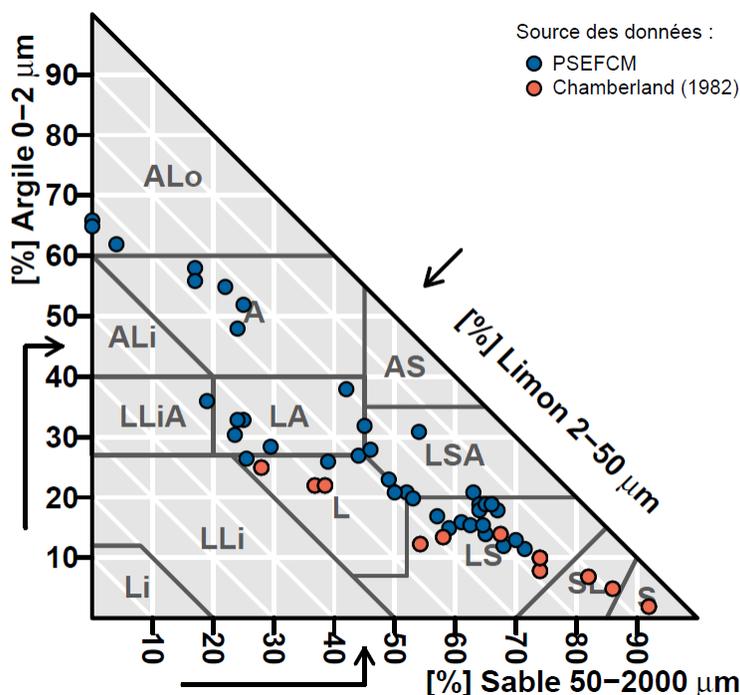


Figure 2. Distribution des blocs (PSEFCM) et des sites (Chamberland, 1982) des essais de haricot dans le triangle textural. Cinq sites de Chamberland (1982) ne figurent pas dans le triangle, car les données de granulométrie étaient manquantes. Aucune donnée granulométrique n'était disponible pour les sites de Dubé (1974). ALo : Argile lourde; ALi : Argile limoneuse; A : Argile; LLiA : Loam limono-argileux; LA : Loam argileux; AS : Argile sableuse; L : Loam; LLi : Loam limoneux; LSA : Loam sablo-argileux; LSA : Loam sableux; SL : Sable loameux; S : Sable. PSEFCM : Programme de soutien aux essais de fertilisation des cultures maraîchères.

1.4 Dispositifs expérimentaux et traitements

1.4.1 Données PSEFCM

La réponse du haricot aux apports d'engrais N, P et K a été testée en plein champ par des essais de fertilisation réalisés chez les producteurs. Les divers traitements testés (doses d'engrais) étaient disposés selon un plan en tiroirs (split-plot) comprenant trois blocs complètement aléatoires (trois répétitions). Chaque bloc du dispositif était constitué de trois parcelles principales représentant chacune un élément nutritif (N, P et K) à l'essai, à l'intérieur desquelles se trouvaient quatre sous-parcelles où les doses de N (T1 à T4), de P (T5 à T8) ou de K (T9 à T12) étaient testées. Les semis ont eu lieu de la fin mai à juillet et la durée moyenne des essais a été de 63 jours.

Hormis les essais N, le choix des traitements (dose d'apport de fertilisant) a été effectué en fonction de la classe de fertilité (faible ou élevée) du sol, définie pour l'élément testé (section 1.3.1). Des doses plus élevées de P_{2O_5} et de K_2O ont été testées dans les sols dits à « faibles teneurs » en P_{M3} et en K_{M3} respectivement. Ces doses ont subi quelques modifications dans les protocoles au fil des années (tableaux 3, 4 et 5). Toutefois, l'analyse des sols étant réalisée *a posteriori* de l'implantation des essais, 25 % des sites d'essais P et K ont été mal classés de part et d'autre des seuils présumés de non-réponse de la culture (200 kg P_{M3} /ha, 200 kg K_{M3} /ha) et n'ont pas reçu les doses de fertilisants prévues au protocole (ex.: doses élevées appliquées sur un site très bien pourvu en P ou en K). Ceci peut faire en sorte que la réponse de la culture à la fertilisation ne puisse être adéquatement étudiée. Par exemple, en cas de mauvais classement dans les sols à faibles teneurs, même les niveaux de

traitement les plus élevés pourraient être insuffisants pour l’atteinte d’un plateau de production. Au contraire, dans les sols à fortes teneurs mal classés, le plateau de production pourrait être atteint dès l’application du plus faible niveau de traitement. Enfin, pour tous les essais, seul l’apport en l’élément testé variait, les autres éléments nutritifs majeurs étant fixés au troisième niveau de traitement de chaque élément afin qu’ils ne soient pas limitants.

1.4.1.1 Essais N

Les doses de N testées pour les essais PSEFCM sont présentées au Tableau 3. Les traitements correspondaient à quatre doses de N incluant un témoin 0 N. Les doses de N ont été revues à la hausse à trois reprises de 2008 à 2011.

Les engrais ont été appliqués en bande entre l’émergence et le stade cotylédon. Cette fenêtre d’application d’engrais est courte et restrictive, mais elle découle d’une contrainte expérimentale : le semis est effectué par le producteur chez qui l’essai se déroule et les engrais sont appliqués manuellement par l’équipe ensuite. Ainsi, afin d’assurer un placement adéquat de l’engrais, il faut attendre l’émergence de la plantule. Dans la pratique toutefois, l’engrais est appliqué au semis, bien que la FQPFLT (2018) mentionne que l’application de N peut être combinée avec un sarclage de post-levée tant que les haricots ne dépassent pas 10 à 15 cm de hauteur et que les mauvaises herbes n’ont pas dépassé le stade cotylédon.

Lors des essais, aucun fractionnement n’était prévu au protocole, bien que cette pratique soit de plus en plus recommandée (Hochmuth et Hanlon, 2018; Unilet, s.d.) et adoptée par les producteurs de haricots (Communication personnelle FQPFLT, 2019). En effet, il est déconseillé d’apporter plus de 80 à 100 kg N/ha en début de saison pour diminuer les risques de lessivage. De plus, des apports en début de saison et au stade floraison stimuleraient la croissance et le rendement (FQPFLT, 2018).

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
2008	4	En bande ¹ (apport total)	0	20	40	60
2009-2010	8	En bande (apport total)	0	30	60	90
2011	4	En bande (apport total)	0	60	90	120

¹ Après l’émergence des plantules pour ne pas porter préjudice à l’émergence, mais avant que les plantules aient dépassé le stade des cotylédons.

1.4.1.2 Essais P

Les doses de P₂O₅ testées dans les essais PSEFCM sont présentées au Tableau 4. Pour tous les essais P, la totalité de l’apport prévu était appliquée en bande et incorporé après l’émergence des plantules. Les doses de P ont été revues à la hausse à trois reprises dans les sols à faibles teneurs en P.

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
2008 à 2011	11	≤ 200 kg P _{M3} /ha	En bande ¹ (apport total)	0	30	60	120
2008 et 2010	5	> 200 kg P _{M3} /ha	En bande (apport total)	0	20	40	80

¹ Après l’émergence des plantules pour ne pas porter préjudice à l’émergence, mais avant que les plantules aient dépassé le stade des cotylédons.

1.4.1.3 Essais K

Les doses de K₂O testées dans les essais PSEFCM sont présentées dans le Tableau 5. Le fractionnement de la dose de K₂O était prévu de façon à éviter les risques de toxicité et de salinité causée par un apport trop élevé en N et K (Delgado et al., 1994) avec des applications à la volée avant le semis.

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
2008-2011	4	≤ 200 kg K _{M3} /ha	À la volée avant le semis	0	0	30	90
			En bande ¹	0	30	30	30
			Apport total	0	30	60	120
2008-2011	12	> 200 kg K _{M3} /ha	À la volée avant le semis	0	0	0	40
			En bande	0	20	40	40
			Apport total	0	20	40	80

¹ Après l'émergence des plantules pour ne pas porter préjudice à l'émergence, mais avant que les plantules aient dépassé le stade des cotylédons.

1.4.2 Données de Dubé (1974) et de Chamberland (1982)

1.4.2.1 Essais NPK

Les essais NPK de Dubé (1974) et de Chamberland (1982) comportent dix traitements, soit neuf traitements de fertilisation et un témoin sans engrais (Tableau 6). Les informations concernant le mode et la période d'application des engrais des essais de Dubé (1974) ne sont pas disponibles. Dans les essais de Chamberland (1982), 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) de 1980 (Chamberland, 1982).

Tableau 6. Description des traitements des essais de fertilisation NPK de Dubé (1974) et de Chamberland (1982)

Traitement	Dose appliquée (kg/ha)					
	Dubé, 1974 ¹			Chamberland, 1982		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
T2	0	40	120	0	40	60
T3	30	40	120	15	40	60
T4	60	40	120	30	40	60
T5	30	0	120	15	0	60
T6	30	20	120	15	20	60
T7	30	60	120	15	60	60
T8	30	40	0	15	40	0
T9	30	40	60	15	40	30
T10	30	40	180	15	40	90
Mode d'application	Information non disponible			À la volée et incorporé avant le semis		

¹ Source : Deslauriers (2014).

1.5 Rendements commercialisables

Dans les essais N, P et K du PSEFCM, les rendements commercialisables étaient environ 1,9 fois plus élevés que les rendements de référence du MAPAQ (2017). En comparaison aux rendements de référence du MAAARO (2020), les valeurs obtenues sont d'environ 1,5 fois plus élevés. Selon la Financière Agricole du Québec (2012), le rendement moyen réel du haricot au Québec était de 6,3 t/ha en 2010. Six des 16 sites sont dans l'intervalle de rendement de référence et les autres sites ont eu une productivité supérieure (Figure 3). Les pertes enregistrées à la récolte étaient faibles (autour de 5 %), bien que supérieures aux valeurs rapportées de 0,1 % par le MAPAQ (2017).

Pour les données de Dubé (1974) et de Chamberland (1982), seuls les rendements commercialisables sont disponibles. Les rendements moyens étaient de 8 000 kg/ha, bien qu'ils couvraient un large intervalle de rendements majoritairement entre 3 700 et 11 000 kg/ha (1^e et 3^e quartiles). Selon Statistiques Canada (s.d.), les rendements totaux moyens en haricot pour les années 1974 à 1980 au Québec sont évalués entre 2 000 et 5 600 kg/ha pour les haricots frais et entre 4 000 et 5 500 kg/ha pour les haricots de conserve (rendements en lb/ac convertis en kg/ha en multipliant par un facteur de 1,1209).

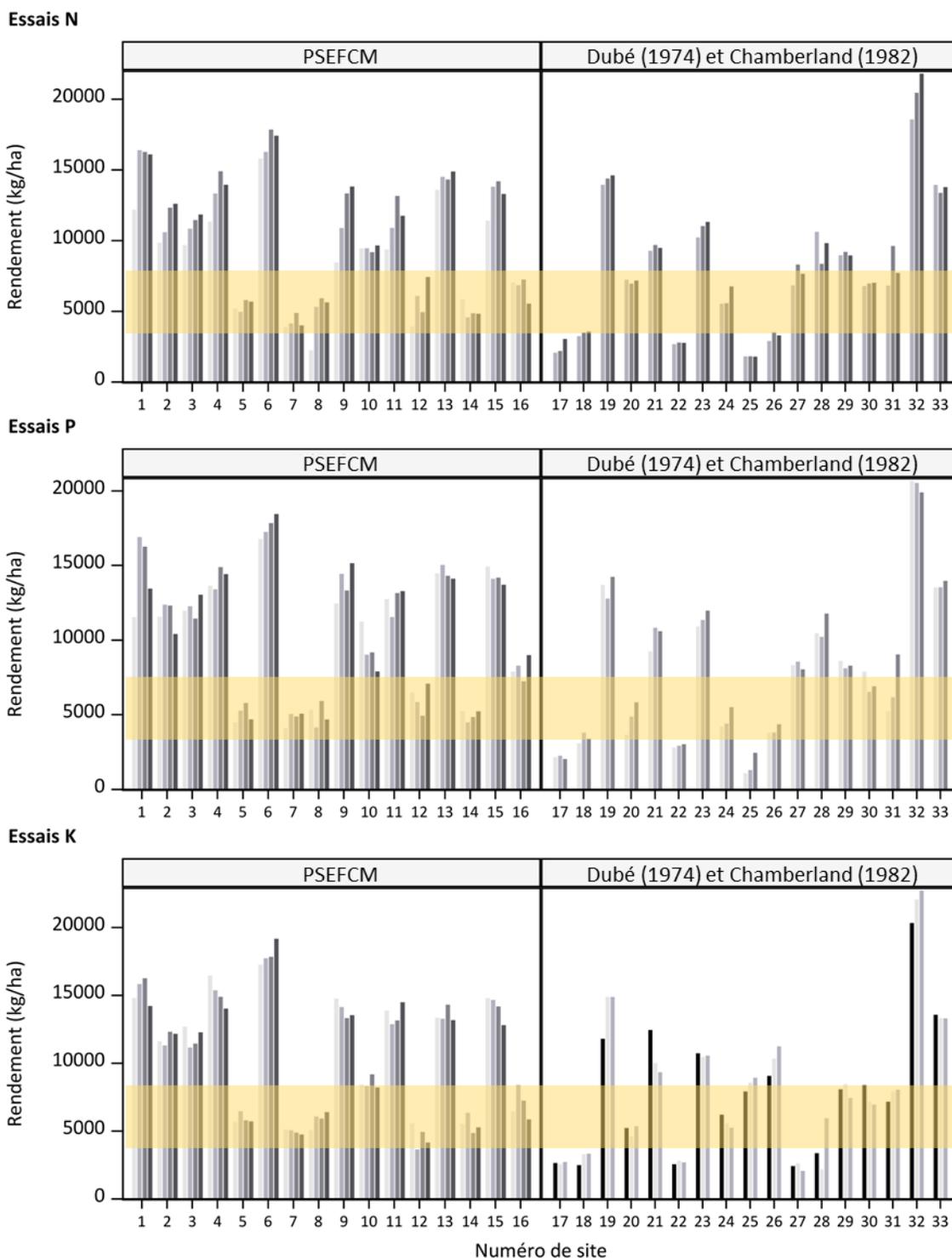


Figure 3. Rendements commercialisables selon l'élément testé, les sites et les doses croissantes d'engrais. Consulter la section 1.4 pour connaître les doses testées. La bande jaune illustre les rendements de référence pour la période des essais (MAPAQ 2017 et Statistiques Canada pour la période 1974 à 1980). PSEFCM : Programme de soutien aux essais de fertilisation des cultures maraîchères.

1.6 Aspects additionnels pour l'interprétation des résultats

1.6.1 Variétés

Dans le PSEFCM, huit variétés culturales ont été testées. Chamberland (1982) a testé trois variétés culturales différentes, alors que l'information est manquante pour les essais de Dubé (1974). Les variétés testées ne se répètent pas entre les sources de données, possiblement en raison des trente années qui séparent les périodes de réalisation des essais.

1.6.2 Précédents culturaux

Dans le cas des données de Dubé (1974) et de Chamberland (1982), aucune information n'était disponible sur les précédents culturaux. Quant aux essais du PSEFCM, ils ont été réalisés sur des retours de maïs-grain (69 %), de pois (25 %) ou de soya (6 %).

1.6.3 Irrigation

Dans le cas des données PSEFCM, une majorité des sites n'a pas été irriguée tandis que l'information n'était pas disponible pour certains sites. Pour les données de Dubé (1974) et de Chamberland (1982), aucune information concernant l'irrigation n'est fournie. Pourtant, l'eau est un aspect important de la productivité du haricot. En 2017, les haricots irrigués représentaient 12 % du volume total des haricots produits au Québec, pour 335 ha (Communication personnelle, FQPFLT, 2019). L'irrigation du haricot est déterminante du stade du bouton floral jusqu'à la récolte afin d'obtenir une bonne production en rendement et en qualité (FQPFLT, 2018; Unilet, s.d.). Ces aspects n'ayant pas été testés, aucune analyse supplémentaire n'a pu être effectuée.

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, particulièrement les coefficients de variation associés aux données de chacun des sites. Par la suite, une attention plus particulière est alors 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 78 % des données ont été validées après l'analyse exploratoire. Le reste a été identifié comme étant problématique et, par conséquent, a été exclu des analyses subséquentes. Les problématiques rencontrées étaient majoritairement liées au terrain (zone mal drainée, patron de rendements localisé et non contrôlé par le blocage), à la densité de population (une mauvaise levée a engendré de faibles rendements), à des données aberrantes et au non-respect du protocole.

Pour les données de Dubé (1974) et de Chamberland (1982), 98 % des données ont été validées. N'ayant aucune photo, commentaire, ou observation consignée, l'évaluation des données a reposé sur un examen visuel du patron de rendement par bloc. De plus, les résultats du test de régression robuste du logiciel SAS 9.4 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA) ont été considérés. L'application des engrais s'est faite à la volée dans Chamberland (1982), contrairement à l'application en bande du PSEFCM, ce qui pourrait entraîner une surestimation de la recommandation vu l'efficacité moindre des engrais appliqués à la volée (Ham et al., 1973; Randall et Hoeft, 1988). De plus, l'intégration des données de Dubé (1974) a suscité beaucoup d'hésitation au vu des rendements inférieurs aux autres sites (autour de 3000 kg/ha) et le peu d'information entourant les essais. Ces données ont été conservées, mais elles ont fait l'objet d'une attention particulière à l'analyse des résultats. Les recommandations d'engrais étant faites sur une base relative, les faibles rendements ont finalement été jugés comme peu influents. 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	288	2	64	14	225
	Dubé (1974) et Chamberland (1982)	17	198	3	3	14	195
	Total	33	486	5	67	28	420
P	PSEFCM	16	288	2	65	14	223
	Dubé (1974) et Chamberland (1982)	17	198	3	3	14	195
	Total	33	486	5	68	28	418
K	PSEFCM	16	288	2	64	14	224
	Dubé (1974) et Chamberland (1982)	17	198	3	3	14	195
	Total	33	486	5	67	28	419

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

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

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

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

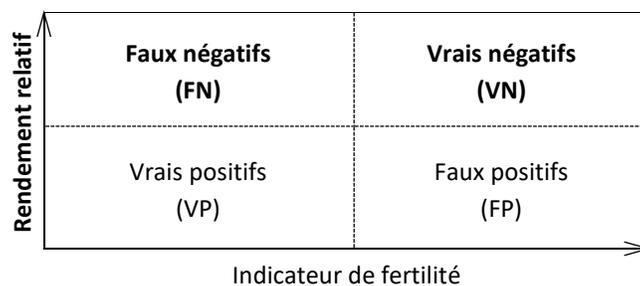


Figure 4. Définitions des quadrants d'un test de partition binaire de Cate-Nelson (1979).

1.8.2 Détermination des doses optimales de fertilisants

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

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

Ainsi, le ROM est le rapport de rendement, le $\text{Rendement}_{\text{Témoin}}$ est le rendement commercialisable des parcelles témoins sans apport de l’élément testé (ex. N) et le $\text{Rendement}_{\text{Fertilisé}}$ 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 confiance 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, dans le cas du haricot, seules les gousses ont été considérées comme biomasse d'exportation puisque la gousse est cueillie, alors que les feuilles et la tige reste au champ. De plus, les rendements totaux ont été considérés (plutôt que commercialisables), car le triage des haricots s'effectue en post-récolte. Toutefois, pour certains sites, seuls les rendements commercialisables étaient disponibles. Les pertes (rendement total – rendement commercialisable) étant minimales dans cette culture (< 5 %), il a été décidé de conserver ces sites dans 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*. Celle-ci regroupe les individus ayant présenté les rendements les plus élevés et des concentrations équilibrées entre les éléments nutritifs qui composent les tissus. Ce faisant, les individus présentant de mauvais rendements, de même que ceux carencés ou en excès (prélèvement de luxe) pour certains éléments, ont été écartés du calcul. Le calcul considère

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

La répartition du nombre de blocs selon différentes propriétés de sol est présentée au Tableau 8. Tel que discuté à la section 1.3.2, plusieurs résultats d'analyse sont inconnus pour les données de Dubé et de Chamberland (*nd*). Autrement, les analyses de sol (0-20 cm) révèlent que plus de 80 % des blocs avaient un pH_{eau} dans les limites acceptables pour la culture (entre 5,5 et 7,5; Aguiar et al., 1998), et 33 % avaient un pH_{eau} considéré idéal (6,1 à 6,5; MAAARO, 2010). Près de la moitié des sites présentaient une teneur en matière organique par perte au feu (MO_{PAF}) inférieure à 4 %. Les analyses du nitrate au semis (N-NO₃, 0-30 cm) sont manquantes pour environ 40 % des blocs. Les données disponibles montrent une bonne répartition des blocs à travers les différentes classes. Les deux tiers des essais ont été menés sur des sols avec une teneur en argile inférieure à 30 %. De manière générale, les sols étaient donc propices à l'obtention d'une bonne 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}		MO _{PAF} ²			N-NO ₃ au semis (0-30 cm)		Groupe de textures ³			Argile	
Seuil ¹	Blocs (%)	Seuil (%)	G1 Blocs (%)	G2-G3 Blocs (%)	Seuil (ppm)	Blocs (%)		Blocs (%)	Seuil (%)	Blocs (%)	
< 5,0	0	< 3	9	35	0 – 5	6	G1	29	≤ 30	67	
5,1 – 5,5	19	3 – 4	57	10	5 – 10	21	G2	21	> 30	20	
5,6 – 6,0	29	4 – 5	27	11	10 – 20	14	G3	50	nd	13	
6,1 – 6,5	33	> 5	7	10	20 – 30	11	-	-	-	-	
6,6 – 7,3	19	nd	-	17	> 30	7	-	-	-	-	
> 7,4	0	-	-	-	nd	41	-	-	-	-	

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

² Matière organique dosée 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.

La répartition des sols dans le triangle textural (Figure 2) démontre que plusieurs textures différentes sont représentées dans les essais. Le haricot peut se cultiver dans plusieurs types de texture de sol. Cependant, il convient d'adapter le travail du sol à la texture (Aguiar, 1998; FQPFLT, 2018). Par conséquent, la distribution des sites parmi les différentes propriétés physico-chimiques de sol semble adéquate pour réaliser des essais de fertilisation. Les différents intervalles couverts par l'étendue des données permettent également une analyse des paramètres comme potentiels indicateurs de fertilité.

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 du sol 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) et de Dubé (1974) 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 les tests de Cate-Nelson, la matière organique dosée par la méthode par perte au feu (MO_{PAF}) est l'indicateur potentiel le plus significatif, même lorsque subdivisé par groupe de textures (Tableau 9). Le seuil critique obtenu dans le cadre de cette étude est fixé à 5,48 % pour les trois classes texturales combinées (*P* = 0,032). Le même seuil a été obtenu pour la combinaison des sols G2 et G3 (*P* = 0,004), tandis que le seuil diminue à 3,75 % lorsqu'on considère les sols des groupes G1-G2 combinés (*P* = 0,032). Ces seuils sont proches de celui de 4 % considéré dans le CRAAQ (2010) pour les sols minéraux. Finalement, le nitrate au semis est ressorti comme indicateur potentiel dans les sols lourds (G1 et G1-G2), bien que les résultats soient moins évidents que ceux de la MO_{PAF}.

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

Indicateur de sol ¹	Groupes de textures ²	Valeur critique	RRel ³ (%)	Sensitivité	Spécificité	<i>P</i> ⁴
N-NO ₃ au semis 0-30 cm	G1	10,90 ppm	78	0,40	1,00	0,103 ^t
	G1-G2	9,55 ppm	72	0,71	0,63	0,116 ^t
MO _{PAF}	G1-G2-G3	5,48 %	80	0,39	0,84	0,032*
	G2-G3	5,48 %	80	0,50	0,85	0,004**
	G1-G2	3,75 %	75	0,61	0,80	0,032*

¹ N-NO₃ : Nitrate; MO_{PAF} : matière organique dosée par la méthode par perte au feu.

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* < 0,01; * significatif à *P* < 0,05; 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 haricot sont présentés à la Figure 5. Les ROM se situant à droite de la ligne rouge (ROM > 1) témoignent d'une augmentation de rendement due à un apport d'engrais, par rapport à une parcelle témoin non fertilisée en N. Inversement, les ROM à gauche de cette ligne (ROM < 1) témoignent d'une diminution de rendement. 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. 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, $n = 315$) démontre un effet significatif des doses de N sur le ROM et le test de comparaison de moyennes indique que le groupe de doses 40-60 N permet l'atteinte des meilleurs rendements ($P = 0,011$). Les intervalles de confiance indiquent que l'apport de ces doses entraîne des gains de rendement de l'ordre de 13 à 22 % par rapport à un témoin 0 N. Similairement, les études de Peck et McDonald (1984) ont montré qu'une dose de 40-80 kg N/ha serait suffisante pour atteindre le rendement maximum dans la culture de haricot. L'analyse par groupe de textures (G1 vs G2-G3; Figure 5B) nous informe que les effets de la dose sur le rendement tendent à différer selon la texture du sol. Effectivement, dans des sols plus légers (G2-G3), le haricot répond davantage aux apports de N ($P = 0,017$) que dans les sols lourds ($P = 0,072$). Dans le premier cas, la dose optimale est de 40-60 N, tandis qu'une dose de 15-20 N suffit dans les sols G1. Dans tous les cas, les ROM obtenus avec la dose 40-60 N sont statistiquement similaires à ceux obtenus avec la dose 90-120 N. Les résultats obtenus pour le modèle sans indicateur (Figure 5A) sont en accord avec ceux obtenus par Deslauriers (2014) où les meilleurs rendements étaient obtenus avec le groupe-dose 90-120 N sans que ceux-ci ne soient toutefois statistiquement différents des rendements obtenus avec la dose 40-60 N. Cependant, contrairement à cette étude, Deslauriers (2014) n'a rapporté aucun effet des groupes de textures sur la réponse du haricot aux apports de N.

Enfin, le modèle C révèle que les sols plus légers (G2-G3) répondent à la fertilisation azotée de façon plus importante ($P = 0,002$) jusqu'à 5,48 % de matière organique. Au-delà de ce seuil, aucune réponse aux apports de N n'a été observée. Ces résultats suggèrent que les sols légers de plus de 5,48 % de matière organique peuvent fournir à la plante suffisamment de N pour son démarrage et la formation des nodules nécessaire pour la fixation de l'azote. Selon le CRAAQ (2010), la fourniture en N du sol dans les sols minéraux est évaluée à environ 15 kg/ha au-dessus de 4 %. Aucune interaction entre la teneur en matière organique et la texture n'a été relevée pour les sols argileux (G1).

Le haricot a la capacité de fixer le N du sol par les nodules formés sur ses racines. Cette fixation symbiotique peut commencer avant la floraison, mais s'exprime pleinement pendant la phase de remplissage des gousses. Environ 60 jours après le semis, il est rapporté que le haricot a la capacité de fixer 3 kg N/ha/jour d'origine atmosphérique, soit environ 75 % des besoins de pleine croissance du haricot (Unilet, s.d.).

En absence de fertilisation minérale azotée, 50 % à 90 % de l'azote accumulé dans le haricot inoculé avec une souche de *Rhizobium* est fourni par la fixation symbiotique (Kucey, 1989; Lalande et al., 1986; Guinet et al., 2019). Cependant, il n'est généralement pas inoculé (FQPFLT, 2018), ce qui peut retarder la formation de nodules, ou simplement entraîner une absence de nodule (Kellman, 2008). Des apports de N en départ de végétation et en début floraison sont généralement conseillés pour stimuler la croissance et le rendement (FQPFLT, 2018; Unilet, s.d.). Inversement, il est important d'éviter toute surfertilisation en N ayant pour conséquence la réduction du bon développement des nodules (Peck et McDonald, 1984) et par conséquent, la réduction de la fixation de N par la plante (Guinet et al., 2019). Selon ces derniers auteurs, une inhibition de la fixation symbiotique du haricot peut être observée dès un apport d'azote minéral de 50 kg N/ha.

MODÈLE

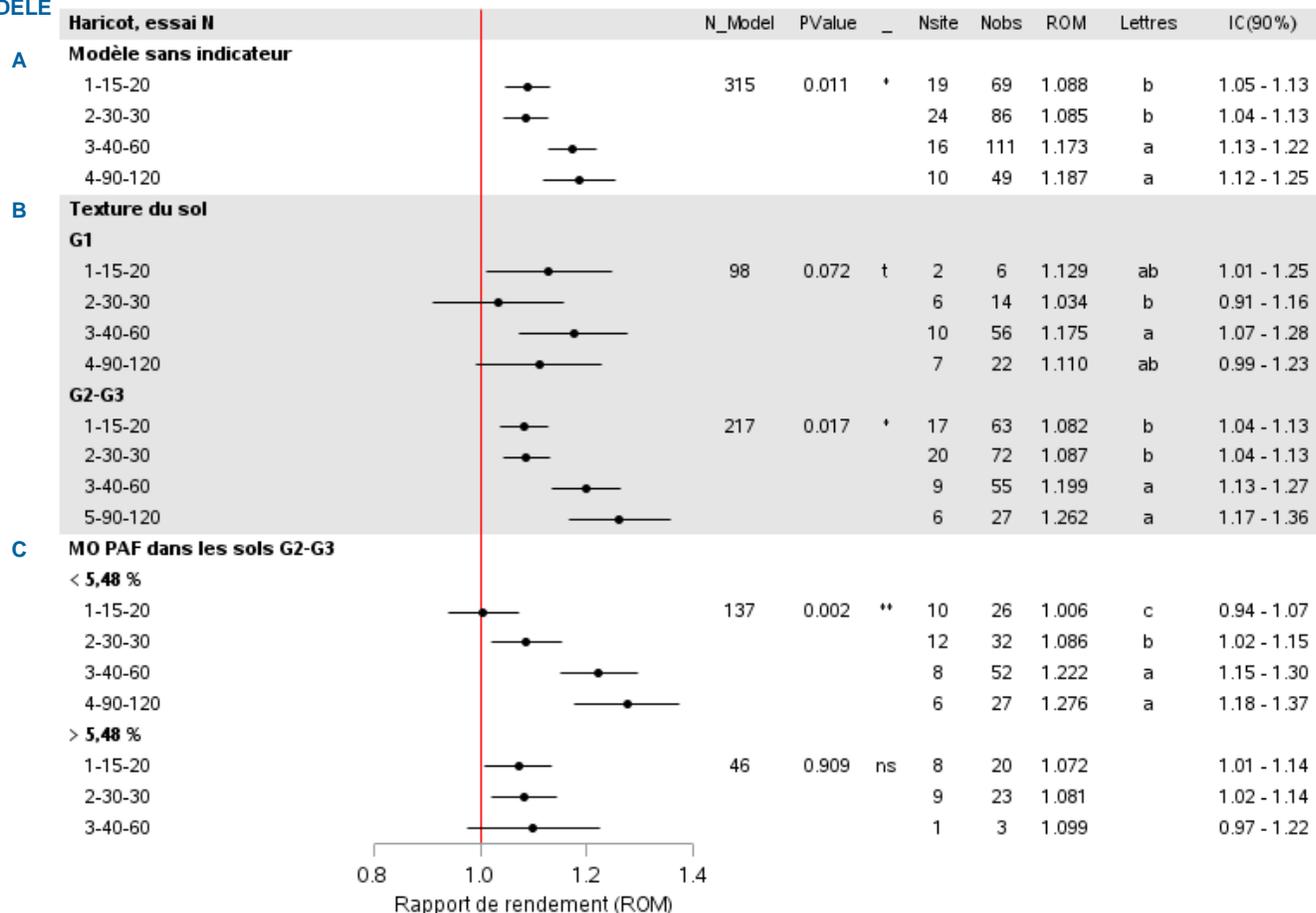


Figure 5. Résultats des analyses de variance sur la réponse de la culture aux doses croissantes d'azote.

G1 : sols à texture fine; G2 : sols à texture moyenne; G3 : sols à texture grossière; MO_{PAF} : matière organique par perte au feu; N_model : nombre d'observations du modèle; Nsite : nombre de sites; Nobs : nombre d'observations; ROM : rapport de rendement (rendement parcelle fertilisée/rendement parcelle témoin); IC : Intervalle de confiance; Lettres : résultats du test de comparaison des moyennes.

2.3 Diagnostic nutritionnel et exportations en azote

Les exportations en N du haricot 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 respectives de 63 et 64 jours 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 9,6 et 10,2 % pour une valeur moyenne de $9,9 \pm 0,2$ %. Entre les variétés et tous traitements confondus, l'écart-type était plutôt de 1,2 %. 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.

L'analyse des tissus rapporte des concentrations en éléments nutritifs et un pourcentage d'humidité similaires à ceux présentés dans le guide de référence en fertilisation du Québec (CRAAQ, 2010), soit de 2,93 kg N/t humide et une humidité de 91 % (Tableau 10). Les exportations, quant à elles, varient de 47 à 57 kg N/ha pour la population de tête, avec des valeurs moyennes et médianes de 52 kg N/ha. La Figure 6 présente l'évolution des exportations en N du haricot en fonction des rendements commercialisables et du diagnostic nutritionnel en indiquant quels individus ont été identifiés comme étant à l'équilibre nutritionnel et à rendements élevés (population de tête). Les présents résultats, issus entièrement d'essais réalisés en conditions québécoises, constituent une précision importante à l'actuelle valeur d'exportation utilisée, cette dernière étant issue d'une référence américaine.

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

	Humidité		Exportations ¹				
	(%)	(kg N/t humide)	(kg N/ha)				
		Moy.	Éc-type	Moy	Med	Min	Max
Haut rendement et équilibre nutritionnel (« population de tête »)	91	2,93	0,20	52	52	47	57
Faible rendement et équilibre nutritionnel	91	2,77	0,42	40	39	26	51
Faible rendement et déséquilibre nutritionnel	90	3,01	0,87	32	32	6	71
Haut rendement et déséquilibre nutritionnel	91	3,22	0,17	56	56	53	62

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

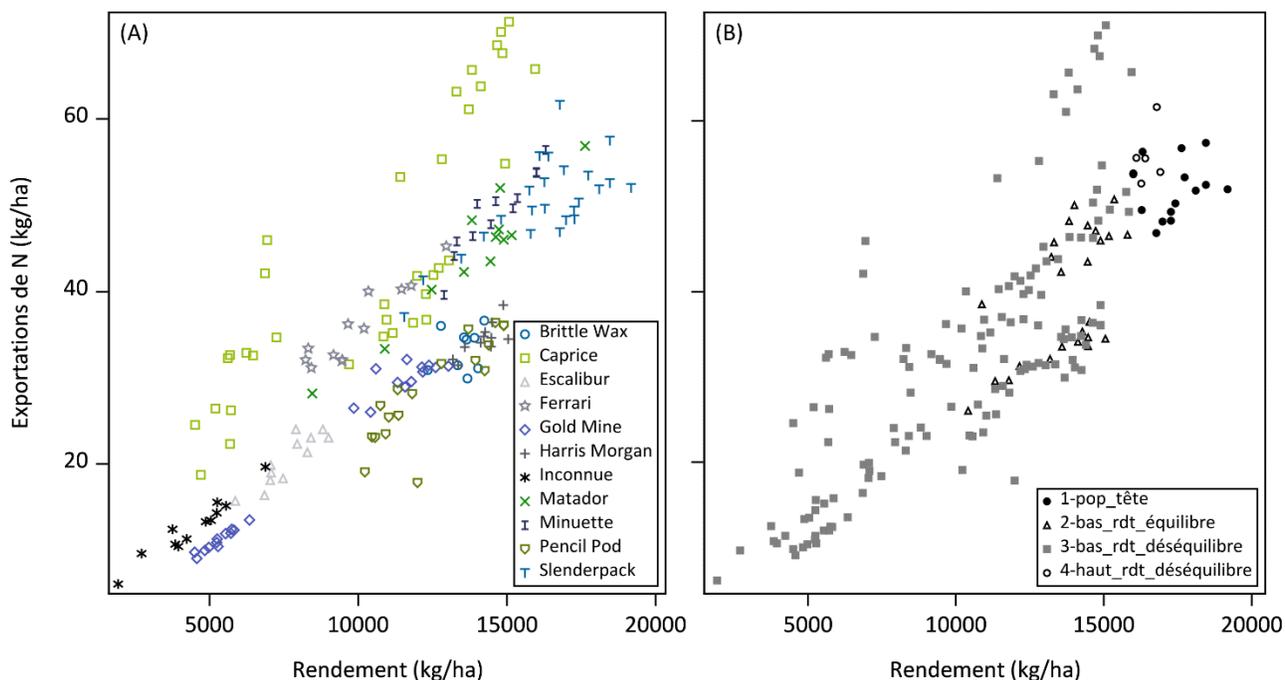


Figure 6. Exportations d'azote en fonction des rendements du haricot exprimés selon (A) les variétés et (B) le diagnostic nutritionnel.

2.4 Nitrate résiduel à la récolte

Les teneurs en nitrate (N-NO_3) résiduel des strates 0-30 et 30-60 cm du sol ont été analysées (parcelles fertilisées en N vs témoin 0 N) afin d'évaluer les risques de pertes de N vers l'environnement (Figure 7). Les teneurs sont des estimations et ne concernent que les données issues du PSEFCM car les essais de Chamberland (1982) et de Dubé (1974) 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 les sols à texture fine (G1) et moyenne (G2), les teneurs en nitrate ne sont pas significativement différentes du témoin, peu importe la dose ou la profondeur. Les sols à texture grossière (G3) présentent des teneurs plus élevées de N-NO_3 la strate 0-30 cm, bien que non significativement différentes du témoin 0 N.

Dans la strate 30-60 cm, cependant, les doses ≥ 60 kg N/ha ont significativement augmenté la teneur en nitrate résiduel. Bien que le nombre d'observations soit inférieur dû à la subdivision par groupe de textures, une tendance indique qu'une fertilisation azotée plus importante dans ces sols augmente le risque de perdre du N vers l'environnement. En effet, selon des études récentes, une dose élevée (80 à 100 kg N/ha) est liée à un risque élevé de pertes par lessivage (Unilet, s.d.) et peuvent ainsi contribuer à la contamination des ressources en eau (Corriveau, 2009). La dose de 60 kg N/ha recommandée dans les sols G2 et G3 ayant une matière organique $\leq 5\%$ (Tableau 11) peut donc entraîner un risque supérieur de lessivage du nitrate, particulièrement en sol G3. Toutefois, étant une légumineuse, il est tout à fait probable 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.

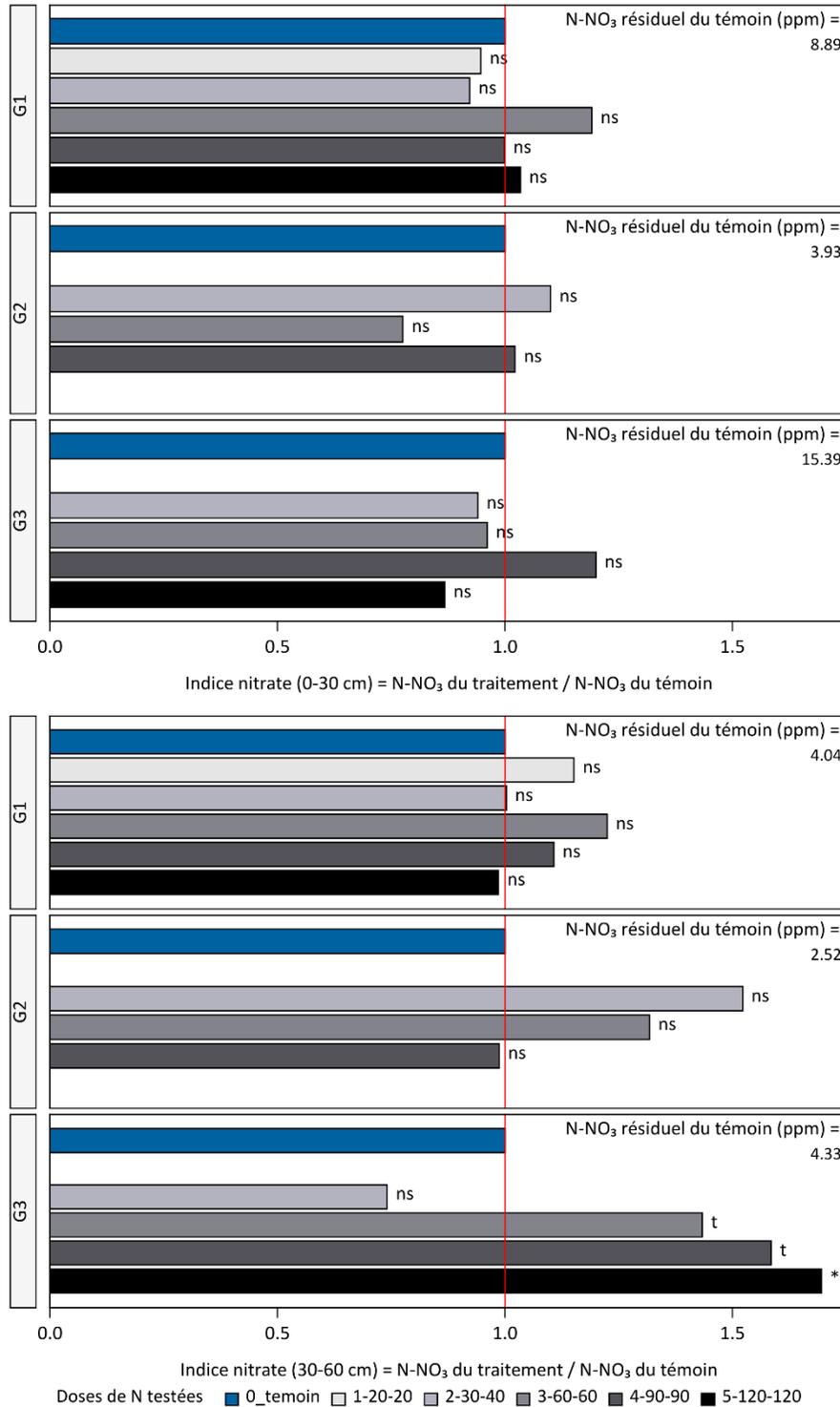


Figure 7. Nitrate résiduel (N-NO₃) à la récolte dans les couches de sol 0-30 cm (A) et 30-60 cm (B) en fonction des groupes de textures de sol et des doses d'azote dans les essais de haricot du PSEFCM. G1 : sols à texture fine; G2 : sols à texture moyenne; G3 : sols à texture grossière. Les statistiques ont été réalisées sur les données transformées (log), alors que le graphique présente les données brutes tels qu'analysées 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 à $P < 0,12$; * significatif à $P < 0,05$; ** significatif à $P < 0,01$.

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

À la lumière des résultats présentés aux sections précédentes, des recommandations de fertilisation en N ont été émises pour le haricot (Tableau 11). Ces recommandations ont été précisées par rapport aux anciennes par l'intégration d'un indicateur à deux niveaux intégrant la matière organique du sol et la texture du sol. Cette précision accrue combinée à l'application des engrais en bande permettra une utilisation plus efficace des engrais azotés, sans compromettre les rendements.

Dans certains cas (sols G1 et sols G2-G3 de MO > 5 %), la dose recommandée est inférieure à la quantité de N exportée du champ (52 kg N/ha). Toutefois, il convient de mentionner que les exportations en N d'une légumineuse n'entraînent pas nécessairement un appauvrissement du sol et ne dépend pas uniquement de la fertilisation azotée, car sa nutrition azotée provient aussi bien du sol que de l'atmosphère. En effet, par le biais de la fixation symbiotique, la culture du haricot peut enrichir le sol d'environ 25 kg N/ha lorsque les racines et les tiges sont laissées au champ, comme c'est le cas dans les essais du PSEFCM (CRAAQ, 2010).

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

Groupe de textures ¹	Classe de fertilité Matière organique (%) ²	Mode et période d'application	VSRF ³ (kg N/ha)
G1	-	En bande au semis	20 ⁴
G2, G3	≤ 5,5	En bande au semis	60 ⁵
	> 5,5		0 - 20 ⁶

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

² Déterminée par la méthode par perte au feu.

³ VSRF : Valeurs scientifiques de référence en fertilisation.

⁴ Dose agronomique optimale (médiane du groupe de doses 15-20 N) dans cette catégorie de sols.

⁵ Dose agronomique optimale (médiane du groupe de doses 40-60 N) dans cette catégorie de sols.

⁶ Plus petite dose ayant mené à un gain de rendement en l'absence de différence significative entre les traitements fertilisés dans cette catégorie de sols.



- Étant donné le potentiel de lessivage supérieur de la dose 60 N dans les sols plus légers, un fractionnement pourrait être suggéré au producteur sous la forme d'une note de bas de tableau, ou directement dans la recommandation. Une période adéquate pour ce fractionnement pourrait être au stade 10-15 cm du haricot (ou au 1^{er} sarclage), tel que mentionné par la Fédération québécoise des producteurs de fruits et légumes de transformation (FQPFLT, 2018). À partir du stade de floraison, l'application de N n'est toutefois plus de mise car la plante devient de plus en plus autonome à travers la fixation symbiotique.
- Dans les sols G1 et les sols G2-G3 de ≤ 5,5 % de MO_{PAF}, la recommandation pourrait être formulée de manière à suggérer au producteur qu'il peut également appliquer 0 N en raison de la fixation symbiotique de l'azote du haricot (ex. : 0 - 60).

Dans l'ensemble, l'intervalle 20 à 60 N des recommandations du MIRVRF est similaire à l'intervalle 0 à 65 N exposé au Tableau 12 pour les autres grilles canadiennes et de certains états américains. La grille de la Nouvelle-Angleterre est la seule à proposer un fractionnement, alors que sa dose recommandée (55 kg N/ha) se rapproche beaucoup de la dose la plus élevée proposée dans le cadre du MIRVRF. Cet élément renforce l'idée qu'un fractionnement de la dose 60 N devrait être intégré à la grille MAPAQ finale. Au Minnesota, la grille intègre le même indicateur de fertilité que dans le présent rapport (matière organique) à un seuil toutefois inférieur (3,1 vs. 5 %). Enfin, la grille du Mid-Atlantic reprend le même mode d'apport que suggéré dans le cadre du MIRVRF, soit une application en bande, contrairement aux autres grilles qui préconisent les applications à la volée. Il est intéressant de constater que la plupart des recommandations du Tableau 12 sous-entendent que la dose 0 peut également être appliquée sans engendrer de pertes de rendement, probablement en raison de la fixation symbiotique de l'azote faite par le haricot.

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

Provinces/États	Mode et période d'application	Fractionnement	Indicateurs		Dose N (kg/ha)	Source
			Fertilité du sol	Autres		
Québec (CAN)	En bande ou à la volée avant le semis	Non	-	-	45-60	CRAAQ (2010)
Ontario (CAN)	À la volée avant le semis, ou en bande au semis	-	-	Objectif de rendement	30-40	MAAARO (2010)
Prairies canadiennes (CAN)	À la volée et incorporé, avant le semis	Oui	-	-	29-39	Alberta Agriculture Rural Development (2014)
Minnesota (É-U)	-	Non	MO	Objectif de rendement	0-65	Rosen et Eliason (2005)
Nouvelle Angleterre (É-U)	À la volée ou intégré au semoir	Oui	-	-	55	University of Massachusetts Amherst (2020)
Michigan (É-U)		Non	-	-	45	Warncke et al. (1992)
Mid-Atlantic (É-U)	1er apport : À la volée et incorporé 2e apport : En bande 3-5 semaines après la levée	Non	-	-	45-90	PennState Extension (2020)
Centre et Nord de la France (FRA)	En bande au semis	Oui	N	Objectif de rendement	100-160	UNILET (s.d.)

3. FERTILISATION PHOSPHATÉE

3.1 Portrait et représentativités des données

La répartition des sites à travers les différentes classes de propriétés de sol est présentée au Tableau 13. L'ajout des données de Dubé (1974) et de Chamberland (1982) a augmenté la proportion du nombre de blocs ayant une faible concentration en P_{M3} . Ainsi, près de la moitié des sites sont établis sur des sols ayant une teneur en P_{M3} inférieure à 50 ppm. 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 56 % et 67 % des blocs des sols G1 et G2-G3 respectivement. Par rapport aux valeurs d'ISP₁ rencontrées dans les MRC où les essais ont été conduits, les données couvrent toutes les plages de valeur avec une bonne représentation des sols non saturés, ce qui est souhaitable en contexte d'essais de fertilisation.

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

pH _{eau}	Saturation en P (ISP ₁ , %)				Teneur en P_{M3} (ppm)		Groupe de textures ²		Saturation en P des MRC (ISP ₁) ^{3,4}					
	Seuil ¹	Blocs (%)	G1		G2-G3		Seuil	Bloc (%)	Seuil	Blocs (%)	(%)	-----% du territoire-----		
< 5,0	1	≤ 3,8	23	≤ 6,5	51	< 50	45	G1	29	< 7,5	81	54	43	64
5,1 – 5,5	20	3,9 - 7,6	33	6,6 -13,1	16	51 – 100	26	G2	22	7,6-13,0	11	20	29	19
5,6 – 6,0	28	7,7 - 15,2	26	13,2 - 20	12	101 – 150	6	G3	49	13,1-20,0	6	12	16	11
6,1 – 6,5	33	> 15,2	18	> 20	13	151– 200	13	-	-	> 20	2	11	12	4
6,6 – 7,3	17	-	-	nd	8	201 – 250	5	-	-	nd	0	3	0	2
≥ 7,4	1	-	-	-	-	nd	6	-	-	-	-	-	-	-

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

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

³ Adapté du Bilan de Phosphore – Portrait des années 2011 à 2013 du MDDELCC (2016).

⁴ MRC (1) de Beauharnois (2) des Jardins-de-Napierville (3) des Maskoutains (4) du Haut-Richelieu ; nd : non disponible.

3.2 Détermination des doses agronomiques optimales

3.2.1 Recherche d'indicateurs de fertilité

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. Par ailleurs, lorsque possible, les indicateurs ont également été 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'ISP et la disponibilité du P, comme en témoigne la grande différence entre les seuils critiques 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) et de Dubé (1974) étaient incomplètes pour certaines propriétés de sol, seuls les indicateurs dont les données étaient disponibles à l'ensemble des sites ont été considérés.

Les tests de Cate-Nelson (voir section 2.2.1 p. 25) ont révélé des indicateurs potentiels pour la création de classes de fertilité du sol (Tableau 14). L'ISP₁ a été l'indicateur potentiel le plus significatif, surtout pour les sols légers (G2-G3) et avec une forte tendance ($P = 0,051$) pour les sables (G3). La teneur en P_{M3} du sol s'avère également être un indicateur de fertilité potentiel, particulièrement avec les sols légers (G2-G3) mais aussi les sols sableux (G3). La teneur en argile est aussi un indicateur potentiel de fertilité. Toutefois, il apparaît moins intéressant par rapport aux deux autres mentionnés précédemment puisqu'il ne permet pas une distinction élaborée des groupes de textures. C'est donc l'ISP₁ qui sera considéré préférentiellement pour l'établissement des classes de fertilité du 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 P

Indicateur de sol ¹	Groupes de textures ²	Valeur critique	RRel ³ (%)	Sensitivité	Spécificité	P ⁴
Teneur en argile	G1-G2-G3	13,8 %	70	0,69	0,62	0,016 *
ISP ₁	G1-G2-G3	6,3 %	84	0,55	0,74	0,005 **
	G2-G3	6,6 %	86	0,56	0,82	< 0,001 ***
	G1-G2	6,3 %	87	0,48	0,77	0,082 ^t
	G3	10,1 %	85	0,45	0,81	0,051 ^t
P Mehlich-3	G1-G2-G3	54,6 ppm	80	0,53	0,74	0,011 *
	G2-G3	47,7 ppm	85	0,54	0,78	0,008 **
	G1-G2	29,2 ppm	73	0,69	0,70	0,064 ^t
	G3	52,1 ppm	79	0,59	0,73	0,046 *

¹ 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*).

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 $P < 0,001$; ** significatif à $P < 0,01$; t : tendance à $P < 0,12$.

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 haricot sont présentés à la Figure 8 (voir 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 ($n = 314$; Figure 8A). Ce modèle démontre que les ROM diffèrent selon la dose de P₂O₅ appliquée ($P = 0,011$). Sans égard au groupe de textures et à l'ISP₁, le rendement maximal peut être atteint avec la dose de 30 kg P₂O₅/ha.

Ensuite, des ANOVA ont été effectuées en divisant le jeu de données selon différentes combinaisons de groupes de textures (Figure 8B). Selon ces modèles, les essais menés sur des sols G3 ont démontré un ROM significativement plus élevé avec la dose 60 kg P₂O₅/ha ($P = 0,002$), entraînant des rendements de 6 à 24 % supérieurs par rapport à un témoin non fertilisé. Toujours dans le modèle B, mais pour les sols G1, aucune différence significative n'est observée entre les ROM selon les doses de P₂O₅. Cependant, les intervalles de confiance témoignent d'écart de rendement par rapport au témoin variant entre -14 et 13 % pour la dose 20 kg P₂O₅/ha, et de -2 à 20 % pour la dose de 30 kg P₂O₅/ha. Par conséquent, cette dernière dose (30 kg/ha) a été

retenue afin de minimiser les risques de perte de rendement encourus par le producteur. Enfin, des ANOVA ont été effectuées de part et d'autre du seuil de 6,6 % d'ISP₁ pour les essais menés sur les sols G2-G3 (Figure 8C), puis en multipliant par 0,5 et par 2 le seuil de 6,6 % (méthode de Cope et Rouse, 1973; Khiari et al., 2000; Figure 8D). Selon le modèle C, dans les sols ayant un ISP₁ sous 6,6 %, un apport de 60 kg P₂O₅/ha entraîne une augmentation des rendements de 24 à 54 % par rapport au témoin ($P = 0,006$). Au-delà d'un ISP₁ de 6,6 % dans les sols G2-G3, aucune réponse du ROM à la fertilisation n'a été observée pour les sols. Le seuil de non-réponse observé dans les sols de texture moyenne et grossière est faible et peut être expliqué par les faibles exportations en P₂O₅ de la culture (voir la section 3.3).

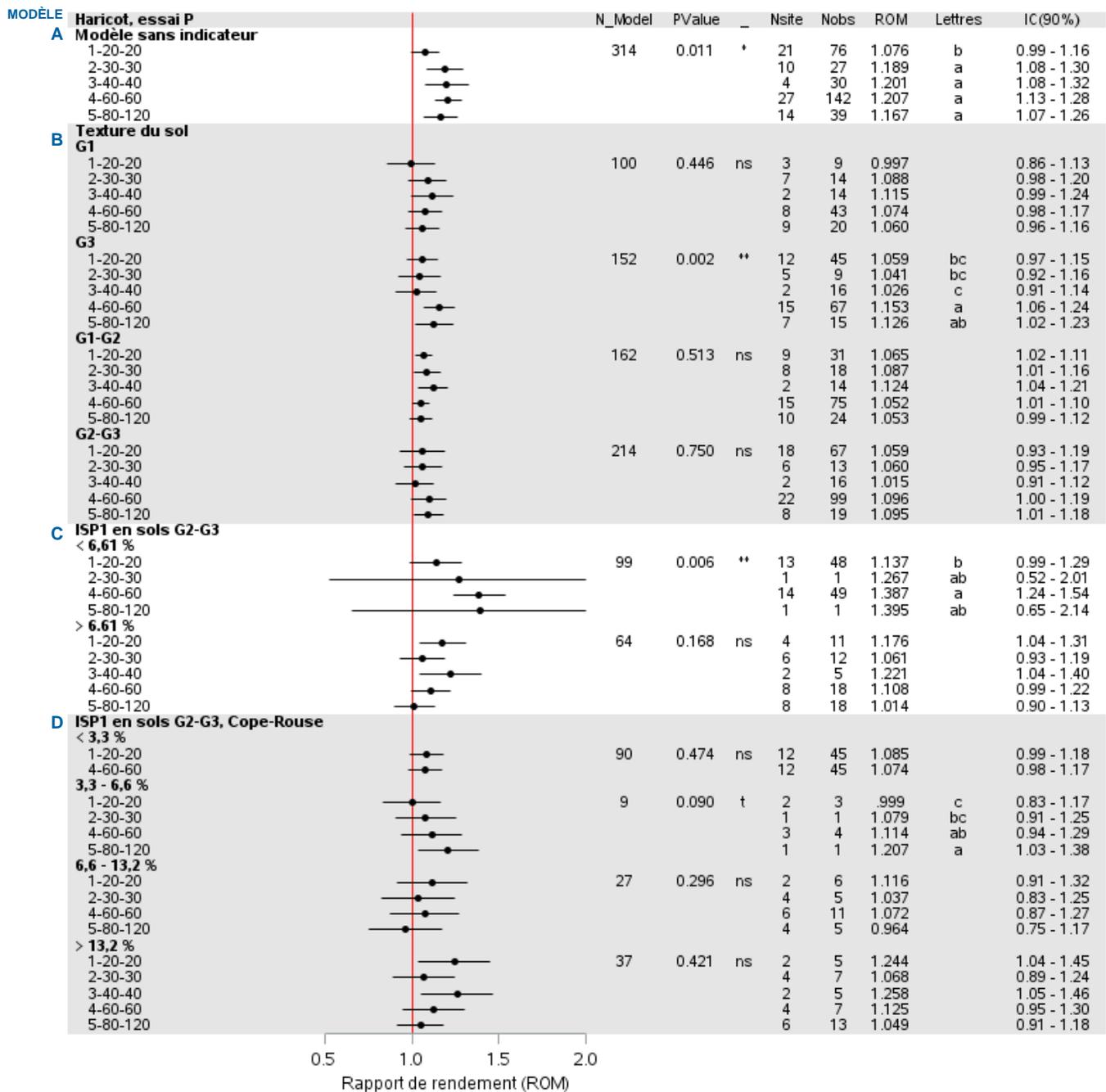


Figure 8. Résultats des analyses de variance sur la réponse de la culture aux doses croissantes de phosphore. G1 : sols à texture fine; G2 : sols à texture moyenne; G3 : sols à texture grossière; N_model, nombre d'observations du modèle; Nsite : nombre de sites; Nobs : nombre d'observations; ROM : rapport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

3.3 Diagnostic nutritionnel et exportations en phosphore

L'analyse des tissus de la population de tête rapporte des teneurs de 0,83 kg P₂O₅/t à une humidité de 91 % (Tableau 15). Les exportations moyennes sont de 15 kg P₂O₅/ha et varient entre 12 et 19 kg P₂O₅/ha. Ces valeurs moyennes d'humidité et de concentration en P₂O₅ sont comparables à celles du Guide de référence en

fertilisation du Québec (CRAAQ, 2010) où on rapporte des concentrations de 0,87 kg P₂O₅/t humide et une humidité de 90 %. À noter que les exportations peuvent varier en fonction de la variété culturale et du diagnostic nutritionnel (Figure 9).

Tableau 15. Concentration et exportations de phosphore du haricot selon le diagnostic nutritionnel

	Humidité		Exportations ¹				
	(%)	(kg P ₂ O ₅ /t humide)		(kg P ₂ O ₅ /ha)			
		Moy	Éc-T	Moy	Med	Min	Max
Haut rendement et équilibre nutritionnel (« population de tête »)	91	0,83	0,13	15	14	12	19
Faible rendement et équilibre nutritionnel	91	0,92	0,12	13	12	9	18
Faible rendement et déséquilibre nutritionnel	90	0,95	0,20	10	10	2	19
Haut rendement et déséquilibre nutritionnel	91	1,05	0,04	18	18	17	20

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

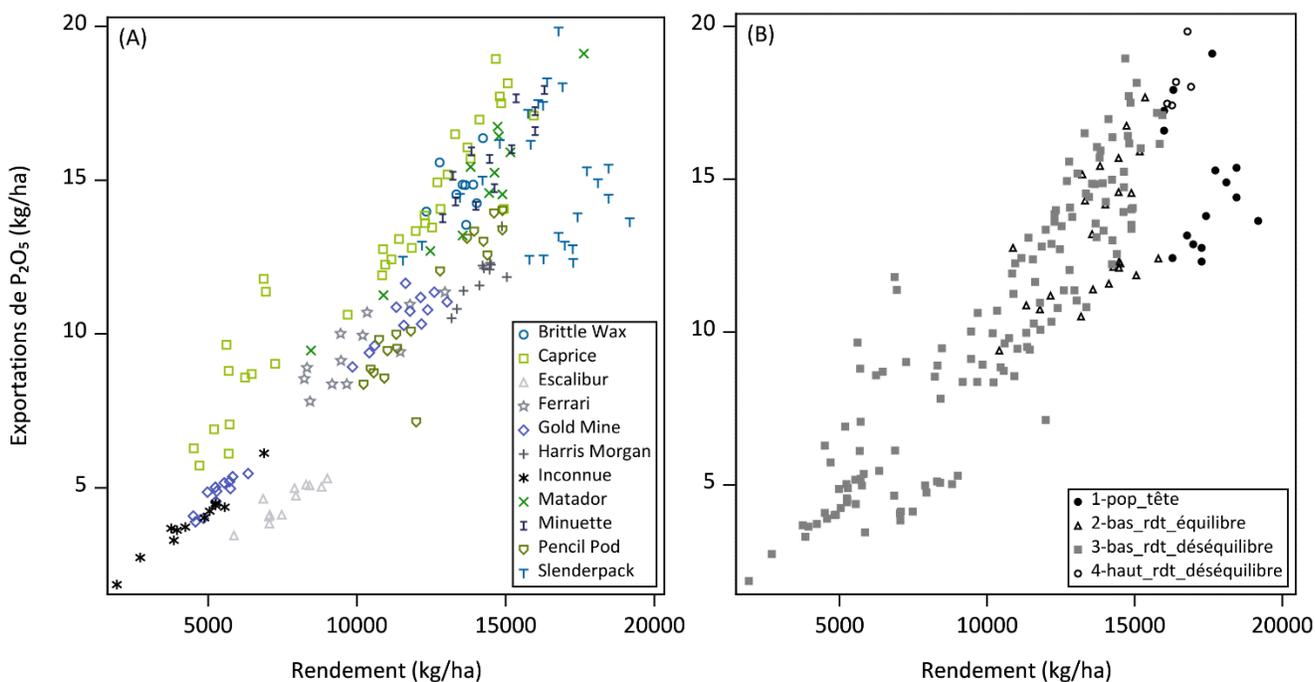


Figure 9. Exportations de phosphore en fonction des rendements du haricot exprimés selon (A) les variétés et (B) le diagnostic nutritionnel.

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

À la lumière des résultats présentés aux sections précédentes, des recommandations de fertilisation en P₂O₅ ont été émises pour le haricot (Tableau 16). Ces nouvelles recommandations considèrent la saturation en P du sol, 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 des seuils environnementaux du REA. Enfin, l'application des engrais est suggérée exclusivement en bande, laquelle est une meilleure pratique agronomique que l'application à la volée. Ces éléments pourraient expliquer la diminution des doses agronomiques optimales.

Dans les sols G1, puisque aucune différence entre les ROM des différents traitements n'est observée, la dose recommandée en deçà du seuil d'ISP_{critique} du REA (7,6 %) est de 30 kg P₂O₅/ha. Cette dose a été préférée à celle de 20 kg P₂O₅/ha en raison des intervalles de confiance qui indiquent un risque de perte de rendement plus grand à cette dose, allant jusqu'à près de 15 %. De 7,6 à 15,2 % d'ISP₁, la recommandation est équivalente aux exportations, tel que le recommande le REA (CRAAQ, 2010; MDDELCC, 2017). Finalement, au-delà du deux fois le seuil critique, à 15,2 %, aucun apport en P₂O₅ n'est recommandé afin de diminuer les risques environnementaux sans craindre d'engendrer de mauvais rendement.

Pour les sols G2 et G3, les analyses ont démontré que le haricot est plus sensible aux apports de P₂O₅. Ainsi, sur un sol ayant un ISP₁ inférieur à 6,6 %, les recommandations s'élèvent à 60 kg P₂O₅/ha, soit la plus petite dose qui a entraîné les meilleurs ROM. Pour les sols ayant des ISP₁ entre 6,6 et 13,2 %, l'absence de réponse entraînerait une recommandation de la plus petite dose testée. Toutefois, les sols de texture moyenne à grossière sont plus sensibles aux apports en P que les sols lourds. Ainsi, la dose retenue a été fixée à 30 kg P₂O₅/ha pour la combinaison des groupes G2-G3 avec un ISP entre 6,6 et 13,2 %. Au-delà du seuil de 13,2 % et jusqu'à un ISP₁ de 26,4 %, une dose équivalente aux exportations (15 kg P₂O₅/ha) est recommandée. L'objectif est de s'assurer de ne pas appauvrir le sol à long terme, surtout en considérant le fait que les nouvelles recommandations sont inférieures à ce qui est recommandé actuellement. Dans les sols à ISP₁ > 26,4 %, aucun apport en P₂O₅ n'est recommandé afin de diminuer les risques environnementaux, et ce, sans craindre d'engendrer de mauvais rendement.

Tableau 16. Fertilisation phosphatée du haricot – 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 ₂ O ₅ /ha)
G1	≤ 7,6	En bande du semis jusqu'au 1 ^{er} sarclage	30 ⁵
	7,7 – 15,2		15 ⁶
	> 15,2		0
G2, G3	≤ 6,6	En bande du semis jusqu'au 1 ^{er} sarclage	60 ⁵
	6,7 – 13,2		30
	13,3 – 26,4		15 ⁶
	> 26,4		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 agronomique optimale déterminée sur la base des intervalles de confiance afin de minimiser le risque de perte pour les producteurs.

⁶ Exportations en P₂O₅ de la culture étant donné l'absence de réponse à la fertilisation dans cette catégorie de sols.

Les résultats obtenus initialement par Chamberland (1982) sont comparables à ceux du MIRVRF. Celui-ci mentionne que la réponse de la culture aux apports de P_2O_5 est plus marquée dans les sols pauvres en P ($< 139 \text{ kg } P_{\text{Bray}2}/\text{ha}$, équivalent à $78 \text{ kg } P_{\text{M}3}/\text{ha}$), dans lesquels il recommande $60 \text{ kg } P_2O_5/\text{ha}$, tandis qu'une dose de $20 \text{ kg } P_2O_5/\text{ha}$ suffirait dans les sols moyennement pourvus en P (139 à $203 \text{ kg } P_{\text{Bray}2}/\text{ha}$, équivalent à 78 à $124 \text{ kg } P_{\text{M}3}/\text{ha}$). Ces nouvelles recommandations représentent une diminution par rapport à celles présentées dans le GREF (CRAAQ, 2010) qui varient entre 20 et $120 \text{ kg } P_2O_5/\text{ha}$ selon la richesse du sol en P. De plus, un gain de précision a été obtenu en prenant en compte le groupe de textures de même que l'ISP₁ du sol.

Dans l'ensemble, dans les sols peu pourvus en P, les doses de P_2O_5 recommandées dans le cadre du MIRVRF sont inférieures aux recommandations existantes ailleurs au Canada et aux États-Unis (Tableau 17). Dans les sols mieux pourvus toutefois, les doses recommandées sont similaires.

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

Provinces/États	Mode et période d'application	Fractionnement	Indicateurs		Dose P_2O_5 (kg/ha)	Source
			Fertilité du sol ¹	Autre		
Québec (CAN)	-	Non	0-50 kg $P_{\text{M}3}/\text{ha}$	-	120	CRAAQ (2010)
			51-100	-	105	
			101-150	-	95	
			151-200	-	85	
			201-300	-	70	
			301-400	-	50	
Ontario (CAN)	À la volée avant le semis, ou en bande au semis	-	P_{Olsen}	Objectif de rendement	0-80	MAAARO (2010)
Prairies canadiennes (CAN)	Opt. 1: À la volée et incorporé, avant le semis Opt. 2: En bande, au semis (Réduire l'option 1 de 1/5)	11-13 kg/ha peuvent être intégrés au semoir	-	-	97-160	Alberta Agriculture Rural Development (2014)
Minnesota (É-U) ³	-	Non	$P_{\text{Bray-1}}$ ou P_{Olsen}	Objectif de rendement	0-140	Rosen et Eliason (2005)
Nouvelle Angleterre (É-U) ³	À la volée ou intégré au semoir	Non	-	-	0-110	University of Massachusetts Amherst (2020)
Michigan (É-U) ³	À la volée, au semis	Non	P_{Olsen}	-	0-120	Warncke et al. (1992)
Mid-Atlantic (É-U) ^{2,3}	-	Non	$P_{\text{M}3}$	-	0-90	PennState Extension (2020)
Centre et Nord de la France (FRA)	En bande au semis	Non	<i>Dans un grand nombre de situations, les sols sont suffisamment riches pour justifier l'impassé d'une fertilisation phospho-potassique.</i>		0	Unilet (s.d.)

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

² Les apports sont de $0 \text{ kg } P_2O_5/\text{ha}$ si la culture précédente est le pois.

³ Pour ces provinces/états, les valeurs ont été converties de livres à l'acre (lbs/ac) en kilogramme à l'hectare (kg/ha) en utilisant une constante de 1,12 dans un souci d'uniformisation et de comparaison.

4. FERTILISATION POTASSIQUE

4.1 Portrait et représentativité des données

La répartition des blocs des sites selon différentes classes de propriétés de sol est présentée au Tableau 18. À la différence des autres cultures du PSEFCM, et comme pour le pois, 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 kg/ppm) au lieu de 400 kg K_{M3} /ha. Cette décision s'appuie principalement sur le fait que selon les recherches de Chamberland (1982), le haricot est une culture sensible à la salinité des engrais, qui répond très peu ou pas à la fertilisation potassique et par conséquent, qui ne nécessite pas une forte teneur en K_{M3} au niveau du sol. 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 scientifique. En considérant l'ensemble des données sans tenir compte des groupes de textures, la proportion des sites ayant une teneur en K_{M3} inférieure au seuil de 89 ppm de K_{M3} est passée de 7 % (sites PSEFCM seulement) à 36 % à la suite de l'ajout des données de Dubé (1974) et de Chamberland (1982) au jeu de données initial. Pris séparément, les sites du groupe G1 ont une forte proportion de blocs ayant plus de 100 ppm, contrairement aux sols G2-G3 où 65 % des blocs ont moins de 100 ppm. Enfin, bien que la moitié des essais ait été réalisée sur des sols de texture grossière (G3), 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	G2-G3	Blocs (%)	Seuil	Blocs (%)	
			Blocs (%)	Blocs (%)				
< 5,6	21	< 100	11	65	G1	29	≤ 30 %	67
5,7 – 6,0	27	101 – 200	50	22	G2	21	> 30 %	20
6,1 – 6,5	35	201 – 300	39	4	G3	50	nd	13
> 7,3	11	301 – 400	-	1	-	-	-	-
nd	6	nd	-	8	-	-	-	-

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

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

³ G1 : sols à texture fine; G2 : sols à texture moyenne; G3 : sols à texture grossière. nd, non disponible.

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 Dubé (1974) et 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 utilisés comme seuils critiques lors de la réalisation des analyses de variance (Figure 9). Parmi tous les indicateurs testés, seule la teneur en K_{M3} (déclinée par texture ou non) s'est avérée un bon indicateur de prédiction de la fertilité du sol ($P = 0,001$ à $0,042$; Tableau 19). Les seuils trouvés à partir de ces tests se situent entre 40 et 60 ppm K_{M3} , et sont donc inférieurs au seuil de richesse par défaut de 89 ppm K_{M3} (200 kg K_{M3} /ha) du PSEFCM. Cela peut se révéler problématique, puisqu'une forte proportion de sites (> 75 %) avait une teneur en K_{M3} au-delà des valeurs critiques déterminés.

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

Indicateur de sol ¹	Groupes de textures ²	Valeur critique	RRel ³ (%)	Sensitivité	Spécificité	P ⁴
K_{M3}	G1-G2-G3	57,3 ppm	71	0,71	0,69	0,004**
	G2-G3	43,9 ppm	71	0,87	0,57	0,001**
	G1-G2	43,0 ppm	72	0,92	0,43	0,042*
	G3	57,3 ppm	71	0,65	0,89	0,007**

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

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

³ RRel : Rendement relatif ($100 \times$ rendement du témoin/rendement maximum par bloc).

⁴ ** significatif à $P < 0,01$; * significatif à $P < 0,05$; t : tendance à $P < 0,12$.

En comparant les seuils critiques de réponse à la fertilisation potassique obtenus dans les tests de Cate-Nelson (Tableau 19), il est surprenant de constater une valeur plus faible dans les sols G1-G2 (43,0 ppm) que dans les sols G3 (57,3 ppm), alors que les analyses des variances (section 4.2.2) montrent que ces derniers sont plus sensibles à l'excès de K. Le seuil obtenu pour toutes les textures confondues est également le même que celui des sols G3. Deux éléments peuvent expliquer ce fait : 1) la moitié des sites d'essais de l'étude sont du groupe G3 et 2) la non-réponse des sols G1 annulent l'effet lors de la détermination des seuils, donnant davantage d'influence aux sols G3. En raison de ces contradictions, les groupes de textures ne seront pas retenus comme indicateurs dans le cadre de l'élaboration des VSRF.

4.2.2 Effet de la dose de potassium sur le rendement commercialisable

Les résultats des analyses de variance (ANOVA) sont présentés à la Figure 10. Le modèle sans indicateur (Figure 10A) montre qu'il n'existe aucun effet significatif de la fertilisation potassique sur le rapport de rendement (ROM; $P = 0,406$). On s'attend donc à avoir une très faible réponse de la culture à l'apport des doses croissantes de K_2O .

Par souci d'uniformité avec ce qui est présenté actuellement dans le GREF du CRAAQ (2010) et avec ce qui est utilisé par les agronomes, les conseillers et les producteurs au Québec, le modèle du K extrait par la méthode Mehlich-3 (K_{M3}) a été retenu. Conformément aux conclusions de recherche de Khiari et al. (2017), les valeurs limites des classes de fertilité des sols seront présentée en parties par million (ppm, équivalent au mg/kg) plutôt qu'en kg/ha, afin d'éviter tout biais de conversion induit par l'usuelle constante 2,24 (CRAAQ, 2010). En considérant la teneur en K_{M3} des sols comme indicateur, aucune réponse positive n'a été mesurée de part et d'autre du seuil agronomique de 57,3 ppm trouvé dans le test de Cate-Nelson (Figure 10B). Toutefois, il est important de constater une valeur de P significative pour les sols ayant une concentration en $K_{M3} > 57$ ppm Nelson ($P = 0,002$; Figure 10B). Cette différence significative traduit le fait que pour les sols bien pourvus en K,

l'apport d'une dose de 90 kg K₂O/ha et plus peut nuire à la productivité de la culture et entraîner des pertes pouvant atteindre plus de 20 % du rendement. C'est donc un effet significatif négatif.

Lorsqu'analysés en fonction des groupes de textures (Figure 10C, D), les résultats montrent que ce sont plus particulièrement les sols du groupe G3 qui sont sensibles à un apport important de K₂O dans les sols déjà riches en K, en comparaison aux groupes G1 et G2. Cette réduction de rendement observée est probablement due à la sensibilité du haricot à la salinité des engrais (Université de Massachusetts Amherst, 2018), les engrais potassiques ayant des indices de salinité particulièrement élevés (CRAAQ, 2010).

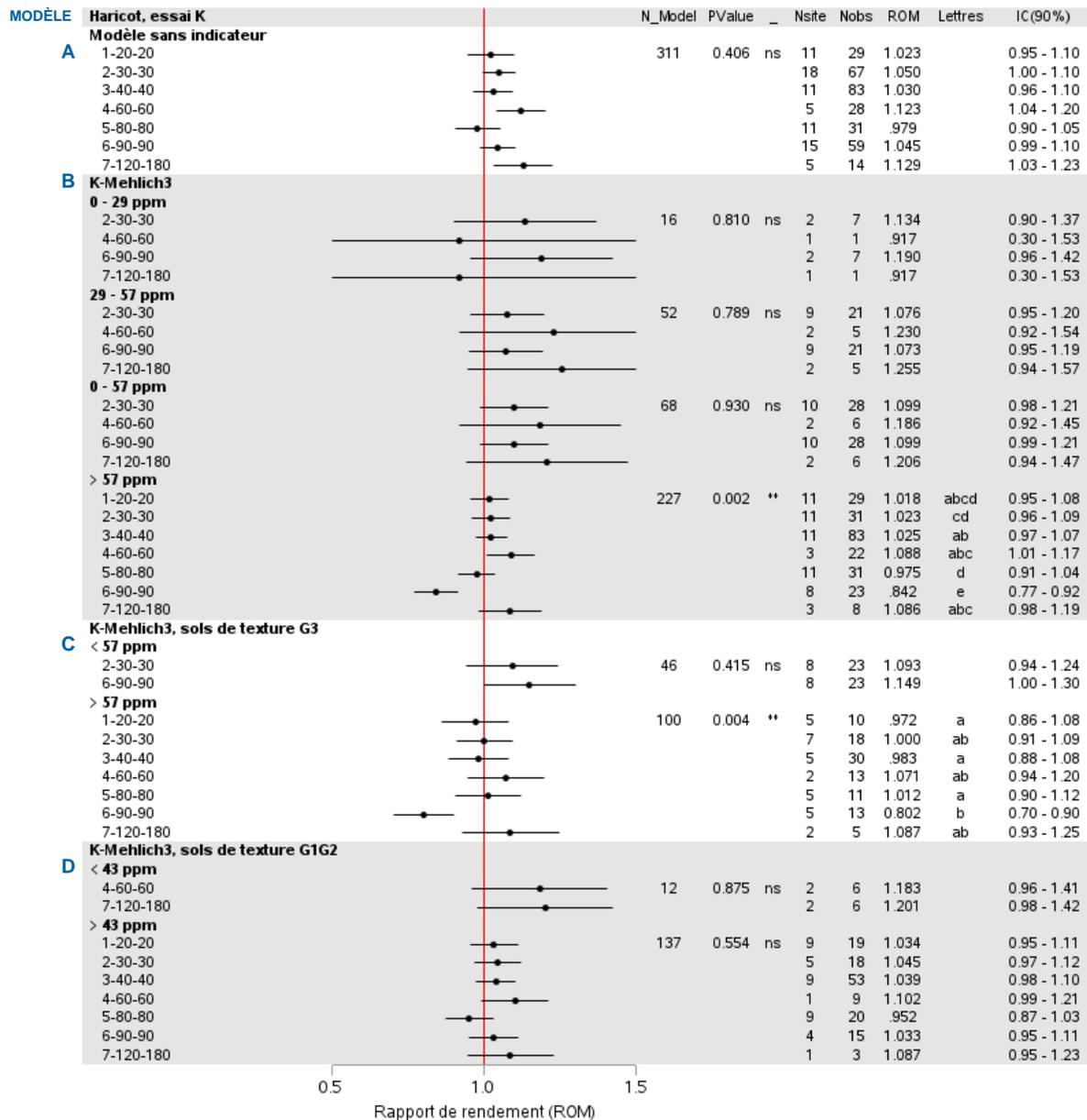


Figure 10. Résultats des analyses de variance de l'essai K dans culture du haricot. G1 : sols à texture fine; G2 : sols à texture moyenne; G3 : sols à texture grossière; N_model : nombre d'observations du modèle; Nsite : nombre de sites; Nobs : nombre d'observations; ROM : rapport de rendement (rendement parcelle fertilisée/rendement parcelle témoin); IC : Intervalle de confiance; Lettres : résultats du test de comparaison des moyennes.

4.3 Diagnostic nutritionnel et exportations en potassium

Les exportations du haricot (Tableau 20) varient entre 40 et 63 kg K₂O/ha, avec des valeurs moyenne et médiane de 48 et de 43 kg K₂O/ha, respectivement. Les valeurs moyennes calculées sur la population de tête sont de 91 % pour l'humidité et de 2,68 kg K₂O/t humide pour les teneurs en K₂O des tissus (Tableau 20). Ces valeurs sont comparables à celles du Guide de référence en fertilisation du Québec qui sont de 90 % et de 2,54, respectivement (CRAAQ, 2010). L'utilisation de ces nouvelles valeurs validées sous les conditions pédoclimatiques québécoises représente quand même un atout pour les producteurs. Il ressort également que

les exportations en K₂O varient en fonction du cultivar et en fonction du rendement (Figure 11), traduisant que l'utilisation de ces données d'exportations par les agronomes et les conseillers agricoles doit se faire en tenant compte du potentiel ou de l'objectif de rendement de leur champ et de la variété cultivée.

Tableau 20. Concentration et exportations de potassium du haricot 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 »)	91	2,68	0,59	48	43	40	63
Faible rendement et équilibre nutritionnel	91	3,21	0,40	46	43	35	63
Faible rendement et déséquilibre nutritionnel	90	3,19	0,73	33	35	6	63
Haut rendement et déséquilibre nutritionnel	91	3,02	0,13	52	51	50	57

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

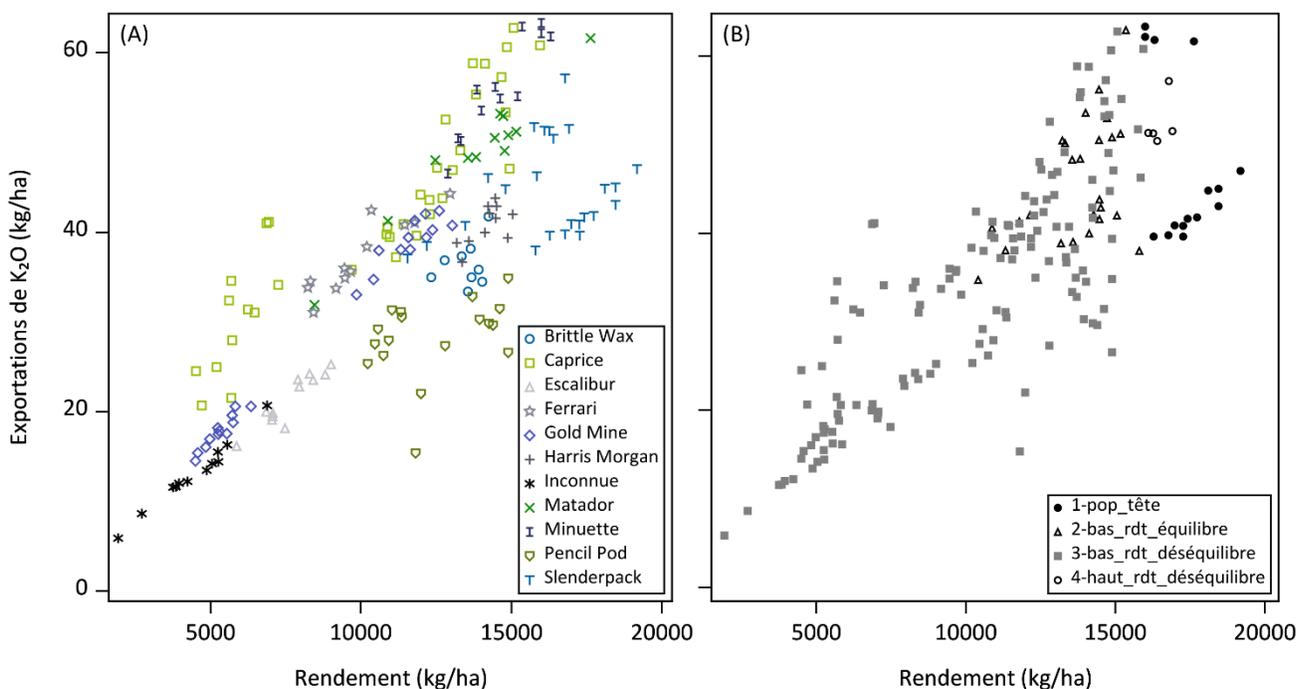


Figure 11. Exportations de potassium en fonction des rendements du haricot exprimés selon (A) les variétés et (B) le diagnostic nutritionnel.

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

Les doses de K₂O recommandées pour la production du haricot sont présentées au Tableau 21. Ces nouvelles recommandations préconisent l'application des engrais en bande. Celle-ci permet une efficacité accrue des engrais qui a probablement contribué à la diminution des doses agronomiques optimales. Enfin, dans l'objectif

de minimiser les biais de conversion reliés au facteur 2,24, l'indicateur de fertilité potassique (K_{M3}) est désormais exprimé sur la base de sa concentration en ppm dans le sol plutôt qu'en kg/ha.

Ainsi, pour un sol ayant une teneur en K_{M3} inférieure à 30 ppm, la recommandation en K_2O est de 45 kg K_2O /ha. Il s'agit d'une fertilisation d'entretien visant à empêcher d'appauvrir le sol à long terme. Pour les sols ayant une teneur comprise entre 31 et 60 ppm K_{M3} , la plus petite dose testée (30 kg K_2O /ha) est recommandée en l'absence d'une différence significative entre les traitements fertilisés. Enfin, dans les sols ayant une teneur en $K_{M3} > 60$ ppm, il est recommandé d'éviter tout apport supplémentaire de K_2O afin de prévenir des pertes de rendement. Cette recommandation est d'autant plus vraie dans les sols légers (G3) où une diminution significative des rendements a été observée en raison de l'apport de K_2O . En raison des pertes considérables de rendement enregistrées dans les sols présentant un niveau de suffisance en K_{M3} , il s'avère nécessaire de faire une recommandation prudente en vue d'éviter tout risque de surfertilisation en K pouvant entraîner des problèmes de salinité pour la culture.

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

Groupe de textures ¹	Classe de fertilité K_{M3} (ppm) ²	Mode et période d'application	VSRF ³ (kg K_2O /ha)
G1, G2, G3	≤ 30	En bande au semis	45 ⁴
	31 – 60		30 ⁵
	> 60 [*]		0 ⁶

* Attention, la fertilisation potassique au-delà du seuil de 60 ppm de K_{M3} peut entraîner des pertes de rendement dans les sols de texture grossière (G3).

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

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

³ VSRF : Valeurs scientifiques de référence en fertilisation.

⁴ Exportations en K_2O de la culture étant donné l'absence de réponse à la fertilisation dans cette catégorie de sols.

⁵ Plus petite dose ayant mené à un gain de rendement en l'absence de différence significative entre les traitements fertilisés.

⁶ Dose nulle recommandée en raison des pertes de rendements significatives enregistrées dans les sols à haute teneur en K.

En comparaison aux recommandations en K_2O faites en Amérique du Nord (Canada et les États-Unis) et en Europe, les doses agronomiques proposées dans le cadre du MIRVRF sont généralement inférieures (Tableau 22). Les seules exceptions sont les Prairies canadiennes, où des apports de 33 à 66 kg K_2O /ha sont recommandés. Aucune classe de fertilité du sol n'y est spécifiée (Tableau 22). Dans le Minnesota (États-Unis), des recommandations en K_2O sont similaires à celles de cette étude, mais pour des objectifs de rendements relativement faibles. Par rapport à la grille actuellement utilisée au Québec, il y a une grande différence au niveau de la détermination des classes de fertilité du sol et par conséquent, une diminution considérable des doses de K_2O recommandées.

Tableau 22. Comparaison des recommandations en K₂O pour la production de haricot au Canada et à l'étranger

Provinces/ États	Mode et période d'application	Fractionnement	Indicateurs		Dose K ₂ O (kg/ha)	Source
			Fertilité du sol ¹	Autre		
Québec (CAN)	-	Non	0-100 kg K _{M3} /ha	-	120	CRAAQ (2010)
			101-200	-	100	
			201-300	-	80	
			301-400	-	65	
			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)	Opt. 1: À la volée et incorporé, avant le semis Opt. 2: En bande, avant le semis (Réduire l'opt. 1 de 1/2)	Non	-	-	17-66	Alberta Agriculture and Rural Development (2014)
Minnesota (É-U) ²	-	Non	K _{AA}	Objectif de rendement	0-170	Rosen et Eliason (2005)
Nouvelle Angleterre (É-U) ²	À la volée ou intégré au semoir	Non	-	-	0-110	University of Massachusetts Amherst (Amherst)
Michigan (É-U) ²	À la volée, au semis	Non	K _{AA}	-	0-180	Warncke et al. (1992)
Mid-Atlantic (É-U) ²	À la volée et incorporé	Non	K _{M3}	-	0-90	PennState Extension (2020)
Centre et Nord de la France (FRA)	En bande au semis	Non	« Dans un grand nombre de situations, les sols sont suffisamment riches pour justifier l'impasse d'une fertilisation phospho-potassique. »		0	UNILET (s.d.)

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

² Pour ces provinces/états, les valeurs ont été converties de livres à l'acre (lbs/ac) en kilogramme à l'hectare (kg/ha) en utilisant une constante de 1,12 dans un souci d'uniformisation et de comparaison.

5. FERTILISATION DU HARICOT FRAIS

Valeurs scientifiques de référence en fertilisation

AZOTE			
Groupe de textures ¹	Classe de fertilité MO _{PAF} (%) ²	Mode et période d'application	VSRF ³ (kg N/ha)
G1	-	En bande au semis jusqu'au 1 ^{er} sarclage	20 ⁴
G2, G3	≤ 5,5	En bande au semis jusqu'au 1 ^{er} sarclage	60 ⁵
	> 5,5		0 – 20 ⁶

PHOSPHORE			
Groupe de textures	Classe de fertilité ISP ₁ (%) ^{7,8}	Mode et période d'application	VSRF (kg P ₂ O ₅ /ha)
G1	≤ 7,6	En bande au semis jusqu'au 1 ^{er} sarclage	30 ⁹
	7,7 – 15,2		15 ¹⁰
	> 15,2		0
G2, G3	≤ 6,6	En bande au semis jusqu'au 1 ^{er} sarclage	60 ⁹
	6,7 – 13,2		30
	13,3 – 26,4		15 ¹⁰
	> 26,4		0

POTASSIUM			
Groupe de textures	Classe de fertilité K _{M3} (ppm) ¹¹	Mode et période d'application	VSRF (kg K ₂ O/ha)
G1, G2 et G3	≤ 30	En bande au semis jusqu'au 1 ^{er} sarclage	45 ¹²
	31 – 60		30 ⁶
	> 60*		0 ¹³

* Attention, la fertilisation potassique au-delà du seuil de 60 ppm de K_{M3} peut entraîner des pertes de rendement dans les sols de texture grossière (G3).

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

² MO_{PAF} : Matière organique déterminée par la méthode par perte au feu.

³ VSRF : Valeurs scientifiques de référence en fertilisation.

⁴ Dose agronomique optimale (médiane du groupe de doses 15-20 N) dans cette catégorie de sols.

⁵ Dose agronomique optimale (médiane du groupe de doses 40-60 N) dans cette catégorie de sols.

⁶ Plus petite dose ayant mené à un gain de rendement en l'absence de différence significative entre les traitements fertilisés dans cette catégorie de sols.

⁷ 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*).

⁸ Catégories déterminées selon les seuils environnementaux (CRAAQ, 2010) et ceux obtenus avec le test de Cate-Nelson.

⁹ Dose agronomique optimale déterminée sur la base des intervalles de confiance afin de minimiser le risque de perte pour les producteurs.

¹⁰ Exportations en P₂O₅ de la culture étant donné l'absence de réponse à la fertilisation dans cette catégorie de sol.

¹¹ K_{M3} : K extrait par la méthode Mehlich-3 (1984).

¹² Exportations en K₂O de la culture étant donné l'absence de réponse à la fertilisation dans cette catégorie de sol.

¹³ Dose nulle recommandée en raison des pertes de rendements significatives enregistrées dans les sols à haute teneur en K_{M3}.

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 du haricot frais, en plus de mettre à jour les modes et périodes d'application, ainsi que les classes de fertilité et doses optimales d'apports des 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 fertilisation des cultures. Dans l'ensemble, les doses optimales proposées sont inférieures à celles des grilles antérieures (CRAAQ, 2010), sans compromettre les rendements. Par ailleurs, elles intègrent des pratiques agronomiques qui favorisent une meilleure utilisation des engrais, telles que l'application en bande plutôt que l'application à la volée. Ces améliorations ont certainement contribué à réduire les apports recommandés. Désormais, les apports azotés sont modulés sur la base d'un double indicateur qui considère le groupe de textures du sol et la teneur matière organique. De même, la fertilisation phosphatée est précisée par le groupe de textures du sol et son indice de saturation en P (ISP). En effet, la texture du sol influence grandement le dynamisme et biodisponibilité du P, tandis que l'ISP est reconnu pour être un meilleur indicateur agroenvironnemental de la biodisponibilité du P que la concentration du P considérée seule. Par conséquent, la considération du groupe de textures des sols est une amélioration importante et complémentaire à l'utilisation des seuils critiques environnementaux du REA conformément à la réglementation en vigueur, aussi intégrés dans les recommandations de l'IRDA. Enfin, un biais important a été corrigé pour l'indicateur de fertilité du sol en potassium (K) par l'usage de la concentration du sol en ppm telle que mesurée par le laboratoire, plutôt que de la valeur convertie en kg/ha obtenue par calcul avec le facteur de conversion de 2,24. Les travaux de l'IRDA permettront aux acteurs du milieu agricole de bénéficier de recommandations 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 les divers intervenants et spécialistes pour leur collaboration facilitant la prise en compte des contraintes et des pratiques culturelles dans la culture du haricot. 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 et d'Armand Dubé portant sur le haricot.

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

7. RÉFÉRENCES

- ALBERTA AGRICULTURE AND RURAL DEVELOPMENT, 2014. COMMERCIAL VEGETABLE PRODUCTION ON THE PRAIRIES, EDMONTON, ALBERTA.
- AGRICULTURES ET TERRITOIRES, 2012. TOUT SAVOIR SUR LA CULTURE DU HARICOT SOUS ABRIS ET EN PLEIN CHAMP. CHAMBRE D'AGRICULTURE DU VAUCLUSE, DÉCEMBRE 2012, 16 PAGES [EN LIGNE] [HTTPS://OCCITANIE.CHAMBRE-AGRICULTURE.FR/FILEADMIN/USER_UPLOAD/OCCITANIE/076_INST-OCCITANIE/DOCUMENTS/PRODUCTIONS_TECHNIQUES/AGRICULTURE_BIOLOGIQUE/ESPACE_RESSOURCE_BIO/MARAICHAGE_BIO/ITK-PROVENCE-HARICOT-2012.PDF](https://occitanie.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/OCCITANIE/076_INST-OCCITANIE/DOCUMENTS/PRODUCTIONS_TECHNIQUES/AGRICULTURE_BIOLOGIQUE/ESPACE_RESSOURCE_BIO/MARAICHAGE_BIO/ITK-PROVENCE-HARICOT-2012.PDF) (CONSULTÉ LE 2020-07-02)
- AGUIAR, J., LAEMMLEN, 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.
- 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.
- 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)
- CANTIN, J., 2007. LES TESTS DE NITRATE DE SOL AFIN D'AJUSTER LA FERTILISATION AZOTÉE DU MAÏS. COLLOQUE SUR L'AZOTE. CENTRE DE RÉFÉRENCES EN AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE DU QUÉBEC ET ORDRE DES AGRONOMES DU QUÉBEC. 28 MARS. DRUMMONDVILLE. PAGES 37-60.
- CATE, R. B., NELSON, L.A., 1971. A SIMPLE STATISTICAL PROCEDURE FOR PARTITIONING SOIL TEST CORRELATION DATA INTO TWO CLASSES. *SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA PROCEEDINGS* 35, 658– 660.
- CENTRE DE RÉFÉRENCE EN AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE DU QUÉBEC (CRAAQ), 2010. GUIDE DE RÉFÉRENCE EN FERTILISATION. 2E ÉDITION. CRAAQ, QUÉBEC. 473 P.
- 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 OF SOIL SCIENCE*, 62(4), 663-672.
- CONSEIL DES PRODUCTIONS VÉGÉTALES DU QUÉBEC (CPVQ), 1980. GRILLES DE FERTILISATION. 60 PP. MIN. AGRIC. PÊCH. ET ALIM. QUÉBEC.
- CONSEIL DES PRODUCTIONS VÉGÉTALES DU QUÉBEC (CPVQ), 1992. HARICOT. FEUILLET TECHNIQUE. AGDEX 255. QUÉBEC. 6 PAGES.
- 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.
- 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://NMS.P.CALS.CORNELL.EDU/PUBLICATIONS/SOILCONVERSION.HTML](http://nmsp.cals.cornell.edu/publications/soilconversion.html). (CONSULTÉ LE 2020-07-10)
- CORRIVEAU, J. (2009). *ÉTUDE DES CONCENTRATIONS TOXIQUES DE NITRITE DANS LES COURS D'EAU D'UN BASSIN VERSANT AGRICOLE* (THÈSE DE DOCTORAT). UNIVERSITÉ DU QUÉBEC, INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE. 137 PAGES.
- 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*.
- 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.
- FÉDÉRATION QUÉBÉCOISE DES PRODUCTEURS DE FRUITS ET LÉGUMES DE TRANSFORMATION (FQPFLT), 2018. GUIDE DE PRODUCTION DES LÉGUMES DE TRANSFORMATION – HARICOT. [EN LIGNE] [HTTPS://WWW.LEGUMES-TRANSFORMATION.QC.CA/WP-CONTENT/UPLOADS/2018/02/GUIDE-COMPLET-HARICOTS-VERSION-PDF-SITE-WEB-1.PDF](https://www.legumes-transformation.qc.ca/wp-content/uploads/2018/02/guide-complet-haricots-version-pdf-site-web-1.pdf). CONSULTÉ LE 2020-06-02.
- FINANCIÈRE AGRICOLE DU QUÉBEC, 2012. RENDEMENTS RÉELS DE L'ANNÉE 2010 EN ASSURANCE RÉCOLTE. [FICHER NUMÉRIQUE] [HTTPS://WWW.FADQ.QC.CA/FILEADMIN/FR/STATISTIQUES/ASSURANCE-RECOLTE/RENDEMENTS-REELS-2010.PDF](https://www.fadq.qc.ca/fileadmin/fr/statistiques/assurance-recolte/rendements-reels-2010.pdf) (CONSULTÉ LE 2020-06-30)
- 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.
- GUINET, M., NICOLARDOT, B., DUREY, V., REVELLIN, C., LOMBARD, F., PINET, E., BIZOUARD, F., VOISIN, A.S., 2019. FIXATION SYMBIOTIQUE DE L'AZOTE ET EFFET PRÉCÉDENT : TOUTES LES LÉGUMINEUSES À GRAINES SE VALENT-ELLES?. *INNOVATIONS AGRONOMIQUES*, INRA, 2019, 74, pp.55-68.
- HAM, G.E., NELSON, W.W., EVANS, S.D. AND FRAZIER, R.D., 1973. INFLUENCE OF FERTILIZER PLACEMENT ON YIELD RESPONSE OF SOYBEANS. *AGRON. J.*, 65: 81-84.
- HOCHMUTH, G. J. & HANLON, E. A., 2018. COMMERCIAL VEGETABLE FERTILIZATION PRINCIPLES. INSTITUTE OF FOOD AND AGRICULTURAL SCIENCES (IFAS), UNIVERSITY OF FLORIDA. EN LIGNE. [HTTPS://EDIS.IFAS.UFL.EDU/CV009](https://edis.ifas.ufl.edu/cv009) (CONSULTÉ LE 2020-07-09)
- 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].
- KELLMAN, A. W., 2008. RHIZOBIUM INOCULATION, CULTIVAR AND MANAGEMENT EFFECTS ON THE GROWTH, DEVELOPMENT AND YIELD OF COMMON BEAN (*PHASEOLUS VULGARIS* L.) [THÈSE DOCTORALE]. UNIVERSITÉ LINCOLN.
- 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.-É., TREMBLAY, N. 2001B. CRITICAL COMPOSITIONAL NUTRIENT INDEXES FOR SWEET CORN AT EARLY GROWTH STAGE. *AGRON. J.*, 93, 809–814.
- KUCEY, R. M. N., 1989. CONTRIBUTION OF N₂ FIXATION TO FIELD BEAN AND PEA N UPTAKE OVER THE GROWING SEASON UNDER FIELD CONDITIONS IN SOUTHERN ALBERTA. *CANADIAN JOURNAL OF SOIL SCIENCE*, 69(3), 695-699.
- LALANDE, R., ANTOUN, H., PARÉ, T., & JOYAL, P., 1986. EFFETS DE L'INOCULATION AVEC DES SOUCHES DU RHIZOBIUM LEGUMINOSARUM BIOVAR PHASEOLI SUR LE RENDEMENT ET LA TENEUR EN AZOTE DU HARICOT (*PHASEOLUS VULGARIS*). *NATURALISTE CANADIEN*, 113.
- 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.

- MAAARO, 2020. HARICOTS. DANS : PRODUITS HORTICOLES. SUPERFICIE, PRODUCTION, VALEUR, PRIX ET RENDEMENT PAR CULTURE - IMPÉRIAL ET MÉTRIQUE (1979-2018). [FICHER NUMÉRIQUE] [HTTP://WWW.OMAFRA.GOV.ON.CA/FRENCH/STATS/HORT/BEANS.XLS](http://www.OMAFRA.GOV.ON.CA/FRENCH/STATS/HORT/BEANS.XLS) (CONSULTÉ LE 2020-07-09)
- MAPAQ, 2017. PROFIL SECTORIEL DE L'INDUSTRIE BIOALIMENTAIRE AU QUÉBEC. ÉDITION 2017. QUÉBEC, 132 PAGES. DISPONIBLE [EN LIGNE] [HTTPS://WWW.MAPAQ.GOUV.QC.CA/FR/PRODUCTIONS/MD/PUBLICATIONS/PAGES/DETAILS-PUBLICATION.ASPX?GUID=%7BD5A66A16-A1FF-48FE-9BB7-C8B6F19CF33C%7D](https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/productions/md/publications/pages/details-publication.aspx?guid=%7BD5A66A16-A1FF-48FE-9BB7-C8B6F19CF33C%7D). (CONSULTÉ LE 2020-06-30)
- MDDELCC, 2016. BILAN DE PHOSPHORE : PORTRAIT DES ANNÉES 2011 À 2013. DISPONIBLE [EN LIGNE] [HTTP://WWW.ENVIRONNEMENT.GOUV.QC.CA/MILIEU_AGRICOLE/PHOSPHORE/PORTRAIT2011-2013/BILAN-PORTRAIT2011-2013.PDF](http://www.environnement.gouv.qc.ca/milieu_agri/agricole/phosphore/portrait2011-2013/bilan-portrait2011-2013.pdf) (CONSULTÉ LE 2020-06-19).
- 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.
- PECK, N. H., R. F. SANSTED, D. 1. LATHWELL, AND T. E. SHULTZ., 1963. POTASSIUM FERTILIZATION OF SNAP BEANS. NEW YORK STATE AGR. EXP. FARM RES. 29: 8-9.
- PECK, N. H.; MACDONALD, G. E. 1984. SNAP BEAN PLANT RESPONSES TO NITROGEN FERTILIZATION. AGRONOMY JOURNAL, MADISON, V. 76, P. 247-253, MAR./APR.
- 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 P.
- RANDALL, G.W. AND HOEFT, R.G., 1988. PLACEMENT METHODS FOR IMPROVED EFFICIENCY OF P AND K FERTILIZERS: A REVIEW. JOURNAL OF PRODUCTION AGRICULTURE, 1: 70-79.
- 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.
- SAS/STAT, VERSION 9.4 DE SAS (SYSTEM POUR WINDOWS 10x64). COPYRIGHT 2002-2012 SAS INSTITUTE INC., CARY, NC, USA.
- SAS INSTITUTE INC. 2018. SAS/STAT® 15.1 User's GUIDE. CARY, NC: SAS INSTITUTE INC.
- STATISTIQUE CANADA, S.D. TABLEAU 32-10-0263-01. FRUITS ET LÉGUMES, FRAIS ET POUR LA CONSERVE, SUPERFICIE RENDEMENT PRODUCTION ET VALEUR. DOI: [HTTPS://DOI.ORG/10.25318/3210026301-FRA](https://doi.org/10.25318/3210026301-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.
- UNILET, S.D.. LA FERTILISATION. DANS HARICOTS ET FLAGEOLETS. [EN LIGNE] [HTTP://WWW.UNILET.FR/CULTURES/HARICOTS/HARICOTS.PHP?PAGE=FERTILISATION](http://www.unilet.fr/cultures/haricots/haricots.php?page=fertilisation) (CONSULTÉ LE 2020-07-09)

WARNCKE, D.D., CHRISTENSON, D.R., JACOBS, L.W., VITOSH, M.L. ET ZANDSTRA, B.H., 1992. FERTILIZER RECOMMENDATIONS FOR VEGETABLE CROPS IN MICHIGAN, DEPARTMENT OF CROP AND SOIL SCIENCES AND DEPARTMENT OF HORTICULTURE MICHIGAN STATE UNIVERSITY, EXTENSION BULLETIN E-550B.

UNIVERSITY OF MASSACHUSETTS AMHERST, 2018. NEW ENGLAND VEGETABLE MANAGEMENT GUIDE [EN LIGNE] [HTTPS://NEVEGETABLE.ORG/CROPS/BEAN-SNAP-LIMA-AND-DRY](https://nevegetable.org/crops/bean-snap-lima-and-dry) (CONSULTÉ LE 2020-06-16)

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	Données exclues	Raisons justifiant l'exclusion
4	111, 223	Erreurs de saisie par le collaborateur dans le fichier-site.
5	101, 103, 109, 332	Données aberrantes confirmées par les résultats des tests de la régression robuste.
7	Site	Un commentaire de la coordination de l'année mentionne le non-respect du protocole à l'établissement du site (au semis).
8	Site	Selon un commentaire du site et les données de population, les parcelles font partie d'un patron de faibles rendements localisé et non contrôlé par les blocs.
9	102, 103, 220, 221 213	Lors de l'application des engrais, les mauvais traitements (sacs d'engrais) ont été appliqués.
10	101, 106, 109, 110, 111, 112, 222,	Baissière identifiée avec le patron de rendements faibles, qui concorde avec les commentaires laissés sur les parcelles. Passage du tracteur sur les parcelles. Problème de levée, décalage général.
11	Bloc 1	Confirmation du commentaire terrain des rendements faibles de tout le bloc 1. Même si le patron est contrôlé par le bloc, le commentaire confirme que l'évaluation de l'effet fertilisant ne peut s'exprimer de façon optimale. « <i>Parcelles affectées par l'eau, surtout dans les sous-parcelles azote.</i> »
12	Bloc 3	Valeur aberrante confirmée par l'analyse spatiale des rendements. Voir commentaires du site : problèmes de drain (non contrôlés par le bloc) et peu de cohérence entre population et rendement, année difficile pour le haricot.
14	110, 214	Données aberrantes confirmées par les résultats des tests de la régression robuste.
15	105, 336	Données aberrantes confirmées par les résultats des tests de la régression robuste.
16	102, 103, 106	Problème de levée.
27	pH, MO, P, K, Ca, Mg	Les résultats des analyses de sol (pH, MO, P, K, Ca, Mg) sont identiques pour les sites 27 et 32, possiblement dû à une erreur de transcription dans le fichier original.
32	pH, MO, P, K, Ca, Mg	Les résultats des analyses de sol (pH, MO, P, K, Ca, Mg) sont identiques pour les sites 27 et 32, possiblement dû à une erreur de transcription dans le fichier original.
33	Bloc 2	Patron de rendements problématique.