

Fertilisation du blé de printemps, de l'orge et de l'avoine. Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation du Québec (2020-2023). Fascicule 04 : Blé de printemps, orge et avoine.

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

LE RAPPORT PEUT ÊTRE CITÉ COMME SUIV :

Landry, C., C.-A. Joseph, S. Houde, J. Forest-D., et M. Grenier. 2021. Fertilisation du blé de printemps, de l'orge et de l'avoine. Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation du Québec (2020-2023). Fascicule 04. Présenté au ministère de l'agriculture et des pêcheries. 121 pages.

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

ÉQUIPE DE RÉALISATION DU PROJET

RESPONSABLE SCIENTIFIQUE ET GESTIONNAIRE DE PROJET

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

BASE DE DONNÉES

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

PROGRAMMES D'ANALYSE

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

VALEURS SCIENTIFIQUES DE RÉFÉRENCE EN NUTRITION DES CULTURES

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

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

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

PARTENAIRES

 PARTENARIAT
CANADIEN pour
l'AGRICULTURE

 Canada Québec

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

MISE EN CONTEXTE

L'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) a reçu du MAPAQ le *Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation 2020-2023* (MIRVRF). Le premier volet du Mandat était de créer une base de données (BD) et d'y colliger les données validées des essais du *Programme de soutien à l'innovation horticole* (PSIH, 2004-2008, carotte seulement), du *Programme de soutien aux essais de fertilisation des cultures maraîchères* (PSEFCM, 2008-2012) et du *Programme de soutien aux essais de fertilisation* (PSEF, 2013-2018). Le second volet du Mandat consistait à déterminer les indicateurs et les intervalles des classes de fertilité de sol, ainsi que les valeurs scientifiques de référence en fertilisation (VSRF) qui leur sont associées, pour les cultures sélectionnées. Pour chaque culture, la détermination des classes de sol et de leurs VSRF se sont principalement appuyées sur les données des programmes PSIH, PSEFCM et PSEF, selon le cas. Cependant, plusieurs jeux de données ont pu être bonifiés, et incidemment la BD, grâce aux travaux d'autres équipes de recherche québécoises ou par le biais des nouveaux essais au champ du MIRVRF, lesquels visaient à bonifier les jeux de données dans certaines catégories de sol. Les VSRF déterminées par l'IRDA sont soumises au MAPAQ et entérinées par le Comité scientifique (CS), afin de produire les prochaines grilles de référence en fertilisation du Québec. Lors de ces travaux, certaines modifications peuvent être apportées sur la base de l'expertise agronomique, par exemple pour les classes de sol dans lesquelles il n'y a pas assez de données pour établir une valeur par calcul. Ainsi, les grilles publiées du MAPAQ peuvent présenter certaines différences en comparaison des résultats de l'IRDA. Au total, jusqu'à 37 grilles (azote, phosphore et potassium) pourront être produites sur la base de travaux de l'IRDA couvrant les cultures de la carotte, du pois, du haricot, du blé, de l'avoine, de l'orge, de la betterave, de l'oignon espagnol, du cornichon (azote seulement), des prairies de graminées et de légumineuses, de la citrouille et du rutabaga en sol minéral. À celles-ci pourront s'ajouter 7 grilles (azote, phosphore et potassium) traitant de l'oignon vert, du radis et de l'oignon jaune sec (potassium seulement) en sol organique. Ces grilles fourniront aux producteurs et aux agronomes québécois un nouvel outil permettant de mieux concilier la productivité et la conservation des ressources. Les intervenants qui souhaitent utiliser la grille officielle du MAPAQ sont invités à consulter le site internet et les documents publiés par le MAPAQ.

NOTE AU LECTEUR

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

TABLE DES MATIÈRES

1.	Présentation générale des essais et des analyses	11
1.1	PROVENANCE DES DONNÉES	11
1.2	LOCALISATION DES SITES	11
1.3	PROPRIÉTÉS PHYSICO-CHIMIQUES DES SOLS.....	13
1.3.1	ESSAIS DE BLÉ DE PRINTEMPS	13
1.3.2	ESSAIS D'ORGE.....	15
1.3.3	ESSAIS D'AVOINE	15
1.4	DISPOSITIFS EXPÉRIMENTAUX ET TRAITEMENTS	16
1.4.1	PROGRAMME DE SOUTIEN AUX ESSAIS DE FERTILISATION (PSEF) – ESSAIS DE BLÉ DE PRINTEMPS, D'ORGE ET D'AVOINE.....	16
1.4.2	AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE CANADA – ESSAIS DE BLÉ DE PRINTEMPS	19
1.4.3	LES MOULINS DE SOULANGES – ESSAIS DE BLÉ DE PRINTEMPS.....	19
1.4.4	CENTRE DE RECHERCHE SUR LES GRAINS (CEROM) – ESSAIS DE BLÉ DE PRINTEMPS	19
1.4.5	AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE CANADA – ESSAIS D'AVOINE	21
1.5	RENDEMENTS EN GRAINS ET EN PAILLE	21
1.6	ASPECTS ADDITIONNELS POUR L'INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS	22
1.6.1	VARIÉTÉ CULTURALE.....	22
1.6.2	PRÉCÉDENT CULTURAL	24
1.7	ANALYSE EXPLORATOIRE.....	24
1.8	CALCULS ET ANALYSES STATISTIQUES.....	26
1.8.1	DÉTERMINATION DES CLASSES DE FERTILITÉ DES SOLS	26
1.8.2	DÉTERMINATION DES DOSES OPTIMALES DE FERTILISANTS	27
1.8.3	DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL, QUANTITÉS D'ÉLÉMENTS NUTRITIFS EXPORTÉS ET TENEUR EN PROTÉINES DES GRAINS	28
2.	Fertilisation azotée.....	30
2.1	PORTRAIT ET REPRÉSENTATIVITÉ DES DONNÉES	30
2.2	DÉTERMINATION DES DOSES AGRONOMIQUES OPTIMALES	31
2.2.1	RECHERCHE D'INDICATEURS DE FERTILITÉ DU SOL	31
2.2.2	EFFET DE LA DOSE D'AZOTE SUR LE RENDEMENT EN GRAINS	32
2.2.3	CONSIDÉRATION DE LA VERSE	42
2.2.4	CRITÈRES D'ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES GRAINS	49
2.3	DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL ET EXPORTATIONS EN AZOTE.....	55
2.4	NITRATE RÉSIDUEL À LA RÉCOLTE.....	59
2.5	FERTILISATION AZOTÉE PROPOSÉE ET COMPARAISON AVEC LES RECOMMANDATIONS AU CANADA ET À L'ÉTRANGER.....	61
2.5.1	BLÉ.....	61
2.5.2	ORGE	64
2.5.3	AVOINE	66
3.	Fertilisation phosphatée	69
3.1	PORTRAIT ET REPRÉSENTATIVITÉ DES DONNÉES	69
3.1	DÉTERMINATION DES DOSES AGRONOMIQUES OPTIMALES	70
3.1.1	RECHERCHE D'INDICATEURS DE FERTILITÉ DU SOL	70
3.1.2	ÉTUDE DE L'EFFET DE LA DOSE DE PHOSPHORE SUR LE RENDEMENT EN GRAINS	71
3.1.3	CONSIDÉRATION DE LA VERSE	73
3.1.4	CONSIDÉRATION DE LA QUALITÉ DES GRAINS	75
3,3	DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL ET EXPORTATIONS EN PHOSPHORE	76
3.4	FERTILISATION PHOSPHATÉE PROPOSÉE ET COMPARAISON AVEC LES RECOMMANDATIONS AU CANADA ET À L'ÉTRANGER.....	80

4.	Fertilisation potassique	80
4.1	PORTRAIT ET REPRÉSENTATIVITÉ DES DONNÉES	83
4.2	DÉTERMINATION DES DOSES AGRONOMIQUES OPTIMALES	83
4.2.1	RECHERCHE D'INDICATEURS DE FERTILITÉ DU SOL	83
4.2.2	EFFET DE LA DOSE DE POTASSIUM SUR LES RENDEMENTS EN GRAINS	84
4.2.3	CONSIDÉRATION DE LA VERSE	86
4.2.4	CRITÈRES D'ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES GRAINS	87
4.3	DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL ET EXPORTATIONS	88
4.4	FERTILISATION POTASSIQUE PROPOSÉE ET COMPARAISON AVEC LES RECOMMANDATIONS AU CANADA ET À L'ÉTRANGER	91
5.	Conclusion.....	93
6.	Fertilisation du blé de printemps — Valeurs scientifiques de référence en fertilisation	94
7.	Fertilisation de l'orge — Valeurs scientifiques de référence en fertilisation	95
8.	Fertilisation de l'avoine — Valeurs scientifiques de référence en fertilisation	96
	REMERCIEMENTS.....	97
9.	Références	98
	ANNEXE I.....	103
	ANNEXE II.....	106
	ANNEXE II.....	110
	ANNEXE IV	116

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1. DESCRIPTION DES TRAITEMENTS DES ESSAIS DE FERTILISATION AZOTÉE DE BLÉ DU PSEF	17
TABLEAU 2. DESCRIPTION DES TRAITEMENTS DES ESSAIS DE FERTILISATION AZOTÉE D'ORGE DU PSEF	17
TABLEAU 3. DESCRIPTION DES TRAITEMENTS DES ESSAIS DE FERTILISATION AZOTÉE D'AVOINE DU PSEF	17
TABLEAU 4. DESCRIPTION DES TRAITEMENTS DES ESSAIS DE FERTILISATION PHOSPHATÉE DE CÉRÉALES (BLÉ, ORGE, AVOINE) DU PSEF	18
TABLEAU 5. DESCRIPTION DES TRAITEMENTS DES ESSAIS DE FERTILISATION POTASSIQUE DE CÉRÉALES (BLÉ, ORGE, AVOINE) DU PSEF	18
TABLEAU 6. DESCRIPTION DES TRAITEMENTS DES ESSAIS DE FERTILISATION AZOTÉE DE BLÉ PANIFIABLE D'AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE CANADA	19
TABLEAU 7. DESCRIPTION DES TRAITEMENTS DES ESSAIS DE FERTILISATION AZOTÉE DE BLÉ PANIFIABLE DES MOULINS DE SOULANGES	19
TABLEAU 8. DESCRIPTION DES TRAITEMENTS DES ESSAIS DE FERTILISATION AZOTÉE DE BLÉ PANIFIABLE DU CEROM	20
TABLEAU 9. DESCRIPTION DES TRAITEMENTS DES ESSAIS DE FERTILISATION PHOSPHATÉE DE BLÉ PANIFIABLE DU CEROM	20
TABLEAU 10. DESCRIPTION DES TRAITEMENTS DES ESSAIS DE FERTILISATION POTASSIQUE DE BLÉ PANIFIABLE DU CEROM	20
TABLEAU 11. DESCRIPTION DES TRAITEMENTS DES ESSAIS DE FERTILISATION AZOTÉE D'ORGE BRASSICOLE DE SEMICAN	20
TABLEAU 12. DESCRIPTION DES TRAITEMENTS DES ESSAIS DE FERTILISATION AZOTÉE D'AVOINE D'AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE CANADA ...	21
TABLEAU 13. STATISTIQUES DESCRIPTIVES SUR LES DONNÉES NON VALIDÉES (AVANT L'ANALYSE EXPLORATOIRE) DES RENDEMENTS EN GRAINS DU BLÉ, DE L'ORGE ET DE L'AVOINE POUR LES ESSAIS N, P ET K.....	22
TABLEAU 14. CARACTÉRISTIQUES ET REPRÉSENTATIVITÉ DES VARIÉTÉS DE BLÉ UTILISÉES SELON LA SOURCE AVANT LA VALIDATION DES DONNÉES.....	23
TABLEAU 15. CARACTÉRISTIQUES ET REPRÉSENTATIVITÉ DES VARIÉTÉS D'ORGE UTILISÉES SELON LA SOURCE AVANT LA VALIDATION DES DONNÉES ..	23
TABLEAU 16. CARACTÉRISTIQUES ET REPRÉSENTATIVITÉ DES VARIÉTÉS D'AVOINE UTILISÉES SELON LA SOURCE AVANT LA VALIDATION DES DONNÉES	24
TABLEAU 17. BILAN DE LA VALIDATION DES DONNÉES À L'ISSUE DE L'ANALYSE EXPLORATOIRE	26
TABLEAU 18. RÉPARTITION DES BLOCS DES ESSAIS N DE BLÉ, D'ORGE ET D'AVOINE POUR DIFFÉRENTES CLASSES DE PROPRIÉTÉS DE SOL APRÈS LA VALIDATION DES DONNÉES.....	30
TABLEAU 19. VALEURS CRITIQUES DES INDICATEURS DE SOL SIGNIFICATIFS SELON LES TESTS DE CATE-NELSON POUR LES ESSAIS N DU BLÉ, DE L'ORGE ET DE L'AVOINE.....	32
TABLEAU 20. FRÉQUENCE DE CHAQUE DOSE SELON LES GROUPES DE DOSES DANS LES CATÉGORIES DE SOL RETENUES	34
TABLEAU 21. DESCRIPTION DES ÉCHELLES D'ÉVALUATION DE LA VERSE DES DIFFÉRENTS ESSAIS ET CORRESPONDANCES CONSIDÉRÉES POUR LA CRÉATION D'UNE ÉCHELLE UNIFORMISÉE ET SIMPLIFIÉE EN VUE DES ANALYSES	43
TABLEAU 22. CONCENTRATIONS EN N (A) ET EXPORTATIONS EN N (B) EN FONCTION DU DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL ET RENDEMENTS MOYENS ASSOCIÉS À LA POPULATION DE TÊTE (C) DANS LES GRAINS ET LA PAILLE DU BLÉ, DE L'ORGE ET DE L'AVOINE.....	57
TABLEAU 23. FERTILISATION AZOTÉE DU BLÉ DE PRINTEMPS – VALEURS SCIENTIFIQUES DE RÉFÉRENCE EN FERTILISATION	62
TABLEAU 24. COMPARAISON DES RECOMMANDATIONS EN N POUR LA PRODUCTION DU BLÉ, DE L'ORGE ET DE L'AVOINE AU CANADA ET AUX ÉTATS-UNIS	63
TABLEAU 25. FERTILISATION AZOTÉE DE L'ORGE – VALEURS SCIENTIFIQUES DE RÉFÉRENCE EN FERTILISATION	65
TABLEAU 26. FERTILISATION AZOTÉE DE L'AVOINE – VALEURS SCIENTIFIQUES DE RÉFÉRENCE EN FERTILISATION	67
TABLEAU 27. RÉPARTITION DES BLOCS DES ESSAIS P DE BLÉ DE PRINTEMPS, D'ORGE ET D'AVOINE SELON DIFFÉRENTES CLASSES DE PROPRIÉTÉS DE SOL APRÈS LA VALIDATION DES DONNÉES	69
TABLEAU 28. VALEURS CRITIQUES DES INDICATEURS POTENTIELS DE SOLS SIGNIFICATIFS SELON LES TESTS CATE-NELSON POUR LES ESSAIS P DE BLÉ DE PRINTEMPS, D'ORGE ET D'AVOINE	70

TABLEAU 29. (A) CONCENTRATION ET (B) EXPORTATIONS DE PHOSPHORE DES CÉRÉALES (BLÉ, ORGE ET AVOINE) SELON LE DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL ET (C) RENDEMENTS MOYENS ASSOCIÉS À LA POPULATION DE TÊTE DANS LES GRAINS ET LA PAILLE.....	78
TABLEAU 30. FERTILISATION PHOSPHATÉE DU BLÉ DE PRINTEMPS, DE L'ORGE ET DE L'AVOINE – VALEURS SCIENTIFIQUES DE RÉFÉRENCE EN FERTILISATION	81
TABLEAU 31. COMPARAISON DES RECOMMANDATIONS EN P ₂ O ₅ POUR LA PRODUCTION DE BLÉ DE PRINTEMPS, D'ORGE ET D'AVOINE AU CANADA ET À L'ÉTRANGER	82
TABLEAU 32. RÉPARTITION DES BLOCS DES ESSAIS K SELON DIFFÉRENTES CLASSES DE PROPRIÉTÉS DE SOL APRÈS LA VALIDATION DES DONNÉES	83
TABLEAU 33. VALEURS CRITIQUES DES INDICATEURS DE SOLS SIGNIFICATIFS SELON LES TESTS DE CATE-NELSON POUR LES ESSAIS K DANS LES ESSAIS DE BLÉ, D'ORGE ET D'AVOINE.....	84
TABLEAU 34. CONCENTRATIONS EN K ₂ O (A) ET EXPORTATIONS EN K ₂ O (B) EN FONCTION DU DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL ET RENDEMENTS MOYENS ASSOCIÉS À LA POPULATION DE TÊTE (C) DANS LES GRAINS ET LA PAILLE DU BLÉ, DE L'ORGE ET DE L'AVOINE.....	90
TABLEAU 35. FERTILISATION POTASSIQUE DU BLÉ DE PRINTEMPS, DE L'ORGE ET DE L'AVOINE – VALEURS SCIENTIFIQUES DE RÉFÉRENCE EN FERTILISATION	91
TABLEAU 36. COMPARAISON DES RECOMMANDATIONS EN K ₂ O POUR LA PRODUCTION DE BLÉ, D'ORGE ET D'AVOINE EN AMÉRIQUE DU NORD	92

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1. RÉPARTITION GÉOGRAPHIQUE DES SITES DE CÉRÉALES SELON LA CULTURE ET LA SOURCE DE DONNÉES.	12
FIGURE 2. DISTRIBUTION DES BLOCS DES ESSAIS DE CÉRÉALES DANS LE TRIANGLE DES TEXTURES.	13
FIGURE 3. RÉSULTATS DES ANALYSES DE VARIANCE SUR LA RÉPONSE DU BLÉ DE PRINTEMPS AUX DOSES CROISSANTES D'AZOTE.	35
FIGURE 4. RÉSULTATS DES ANALYSES DE VARIANCE SUR LA RÉPONSE DE LA CULTURE AUX DOSES CROISSANTES D'AZOTE EN CONSIDÉRANT LA TENEUR EN NITRATE AU PRINTEMPS (0-30 CM).....	36
FIGURE 5. RÉSULTATS DES ANALYSES DE VARIANCE SUR LA RÉPONSE DE L'ORGE AUX DOSES CROISSANTES D'AZOTE.....	38
FIGURE 6. RÉSULTATS DES ANALYSES DE VARIANCE SUR LA RÉPONSE DE L'AVOINE AUX DOSES CROISSANTES D'AZOTE.....	41
FIGURE 7. PROPORTION DE VERSE DANS LES ESSAIS N DU BLÉ DE PRINTEMPS.	44
FIGURE 8. PROPORTION DE VERSE DANS LES ESSAIS N DE L'ORGE EN FONCTION DES DOSES DE N.	46
FIGURE 9. PROPORTION DE VERSE DANS LES ESSAIS N DE L'AVOINE EN FONCTION DES DOSES DE N, DES GROUPES DE TEXTURES DE SOLS, DES SITES ET DES SOURCES DE DONNÉES.....	49
FIGURE 10. EFFET DE LA DOSE SUR LA TENEUR EN PROTÉINES DU BLÉ SELON (A) LE TYPE DE MARCHÉ ET (B) LE GROUPE DE TEXTURES.	50
FIGURE 11. EFFET DE LA DOSE DE N SUR LA TENEUR EN PROTÉINES DE L'ORGE SELON (A) LE TYPE DE MARCHÉ ET (B) LES GROUPES DE TEXTURES. ...	51
FIGURE 12. EFFET DE LA DOSE D'AZOTE SUR LA TENEUR EN PROTÉINES DE L'AVOINE SELON (A) LE TYPE D'AVOINE ET (B) LES GROUPES DE TEXTURES DANS L'AVOINE COUVERTE.	52
FIGURE 13. POIDS SPÉCIFIQUES DU BLÉ (ET ERREURS TYPES) PRÉSENTÉS EN FONCTION (A) DU GROUPE DE TEXTURES ET (B) DE L'INDICE DE VERSE.	53
FIGURE 14. POIDS SPÉCIFIQUE DES GRAINS (ET ERREURS TYPES) DANS LES ESSAIS N D'ORGE EN FONCTION DES GROUPES DE TEXTURES.	54
FIGURE 15. POIDS SPÉCIFIQUE DES GRAINS D'AVOINE (ET ERREURS TYPES) DANS LES ESSAIS N EN FONCTION (A) DES DOSES DE N ET (B) DES NIVEAUX DE VERSE ENREGISTRÉS.....	55
FIGURE 16. EXPORTATIONS D'AZOTE DU BLÉ DE PRINTEMPS, DE L'ORGE ET DE L'AVOINE EN FONCTION DES RENDEMENTS EN GRAINS SELON LES VARIÉTÉS (A, C, E) ET LE DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL (B, D, F).	58
FIGURE 17. INDICES NITRATE DES TRAITEMENTS D'AZOTE DU BLÉ, DE L'ORGE ET DE L'AVOINE AUX PROFONDEURS 0-30 ET 30-60 CM DANS LES SOLS G1 VS G2-G3, AU MOMENT DE LA RÉCOLTE.	60
FIGURE 18. RÉSULTATS DES ANALYSES DE VARIANCE SUR LA RÉPONSE DES CÉRÉALES (BLÉ DE PRINTEMPS, ORGE ET AVOINE) AUX DOSES CROISSANTES DE PHOSPHORE.....	73
FIGURE 19. TENEUR EN PROTÉINES DU BLÉ DE PRINTEMPS ET DE L'ORGE EN FONCTION DES DOSES DE PHOSPHORE.....	75
FIGURE 20. TENEUR EN PROTÉINES DE L'AVOINE EN FONCTION DES DOSES DE PHOSPHORE SELON LES GROUPES DE TEXTURES DE SOL.....	76
FIGURE 21. EXPORTATIONS DE PHOSPHORE DU BLÉ DE PRINTEMPS, DE L'ORGE ET DE L'AVOINE EN FONCTION DES RENDEMENTS EN GRAINS SELON LES VARIÉTÉS (A, C, E) ET LE DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL (B, D, F).	79
FIGURE 22. RÉSULTATS DES ANALYSES DE VARIANCE SUR LA RÉPONSE DU BLÉ, DE L'ORGE ET DE L'AVOINE AUX DOSES CROISSANTES DE POTASSIUM.	85
FIGURE 23. TENEUR EN PROTÉINES DES GRAINS EN FONCTION DES DOSES DE K ₂ O APPLIQUÉES DANS LE BLÉ, L'ORGE ET L'AVOINE.	87
FIGURE 24. EXPORTATIONS DE K ₂ O EN FONCTION DES RENDEMENTS EN GRAINS DU BLÉ, DE L'ORGE ET DE L'AVOINE, IDENTIFIÉES SELON LES VARIÉTÉS (A, C, E) ET LE DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL (B, D, F).	89

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE I-A. LOCALISATION ET DESCRIPTION SOMMAIRE DES SITES DES ESSAIS DE FERTILISATION DE BLÉ DE PRINTEMPS.....	103
ANNEXE I-B. LOCALISATION ET DESCRIPTION SOMMAIRE DES SITES DES ESSAIS EN FERTILISATION DE L'ORGE.....	104
ANNEXE I-C. LOCALISATION ET DESCRIPTION SOMMAIRE DES SITES DES ESSAIS DE FERTILISATION DE L'AVOINE.....	105
ANNEXE II-A. PORTRAIT DES ESSAIS DE BLÉ DE PRINTEMPS AVANT LA VALIDATION DES DONNÉES	106
ANNEXE II-B. PORTRAIT DES ESSAIS D'ORGE AVANT LA VALIDATION DES DONNÉES	108
ANNEXE II-C. PORTRAIT DES ESSAIS D'AVOINE AVANT LA VALIDATION DES DONNÉES	109
ANNEXE III-A. RENDEMENTS EN GRAINS DES ESSAIS DE BLÉ SELON LES SITES ET LES DOSES CROISSANTES D'ENGRAIS.	110
ANNEXE III-B. RENDEMENTS EN PAILLE DES ESSAIS DE BLÉ SELON LES SITES ET LES DOSES CROISSANTES D'ENGRAIS.	111
ANNEXE III-C. RENDEMENTS EN GRAINS DES ESSAIS D'ORGE SELON LES SITES ET LES DOSES CROISSANTES D'ENGRAIS.	112
ANNEXE III-D. RENDEMENTS EN PAILLE DES ESSAIS D'ORGE SELON LES SITES ET LES DOSES CROISSANTES D'ENGRAIS.	113
ANNEXE III-E. RENDEMENTS EN GRAINS DES ESSAIS D'AVOINE SELON LES SITES ET LES DOSES CROISSANTES D'ENGRAIS.....	114
ANNEXE III-F. RENDEMENTS EN PAILLE DES ESSAIS D'AVOINE SELON LES SITES ET LES DOSES CROISSANTES D'ENGRAIS.	115

1. PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES ESSAIS ET DES ANALYSES

1.1 Provenance des données

Dans le cadre du MIRVRF, les valeurs scientifiques de référence en fertilisation (VSRF) des céréales (blé de printemps, orge et avoine) ont été calculées à partir des données du PSEF, bonifiées par l'ajout de données supplémentaires provenant de diverses équipes de recherches au Québec. Pour le blé de printemps, les données supplémentaires ont été fournies par les équipes de recherche de Gilles Tremblay (CEROM, Centre de recherche sur les grains), d'Athyna Cambouris (Agriculture et agroalimentaire Canada) et d'Elisabeth Vachon (Les Moulins de Soulanges). Les contributions de Jean Goulet (Semican) dans l'orge et de Denis Pageau (Agriculture et agroalimentaire Canada) dans l'avoine ont également permis de bonifier les jeux de données. Dans tous les cas, les 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. $0\text{ N} + \text{PK}$ pour un essai d'azote), l'apport des deux autres éléments majeurs non testés dans tous les traitements afin qu'ils soient non limitants au développement de la plante (ex. $0\text{ N} + \text{PK}$ pour un essai d'azote) et l'utilisation exclusive d'engrais minéraux.

1.2 Localisation des sites

La répartition géographique des essais de céréales est représentative des régions administratives concernées par les cultures (Institut de la statistique du Québec, 2020; MAPAQ, 2020). Ainsi, les essais de blé ont eu lieu majoritairement dans les régions centrales du Québec, tandis que les essais d'orge et d'avoine ont été réalisés dans les régions centrales et périphériques (Figure 1).

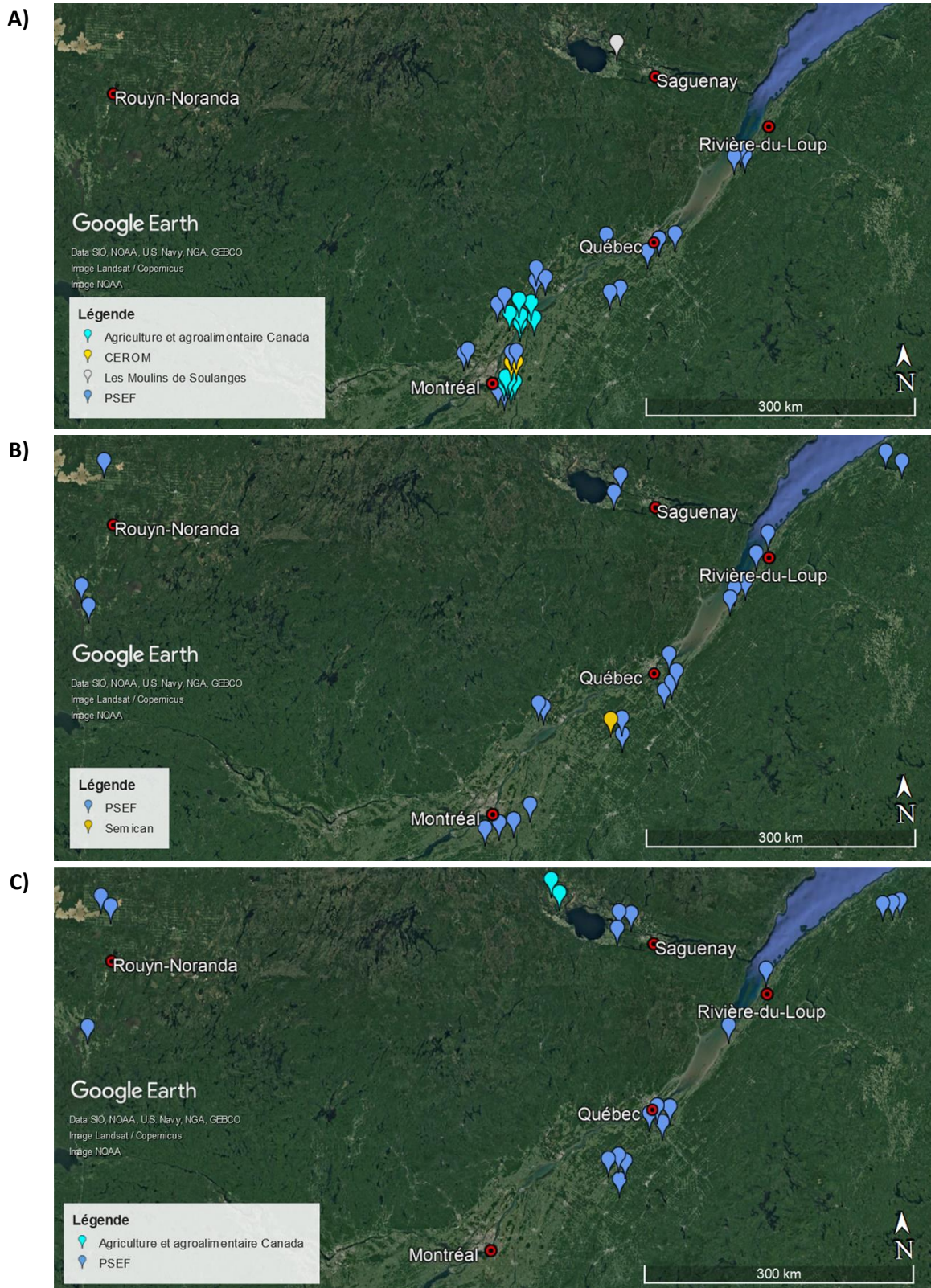


Figure 1. Répartition géographique des sites de céréales selon la culture et la source de données. A) Blé de printemps; B) Orge; C) Avoine; PSEF : Programme de soutien aux essais de fertilisation. L'emplacement des repères est approximatif et vise seulement à représenter la répartition géographique des sites sur le territoire du Québec.

1.3 Propriétés physico-chimiques des sols

Les analyses de sol (0-20 cm) ont été effectuées par bloc afin de tester les indicateurs de fertilité. Dans le cadre de cette étude, une analyse des profils pédologiques des sols sur lesquels se sont installés les essais a été réalisée par l'équipe des pédologues de l'IRDA. Des analyses granulométriques ont également été réalisées en laboratoire. Une comparaison entre ces deux résultats a été effectuée par la suite. Suivant cette vérification, les groupes de textures de certains sites de blé, d'orge et d'avoine ont été changés, car l'analyse granulométrique réalisée en laboratoire n'était pas représentative du sol en profondeur et des caractéristiques qui sont associées à la série de sols. L'ensemble des essais de céréales ont été menés sur sols de textures variées (Figure 2). Les essais des trois céréales ont été réalisés majoritairement sur des sols ayant entre 10 % et 40 % d'argile. Au total, 40 % des essais ont été réalisés sur des sols du groupe de textures G1, 32 % sur des G2 et 28 % sur des G3.

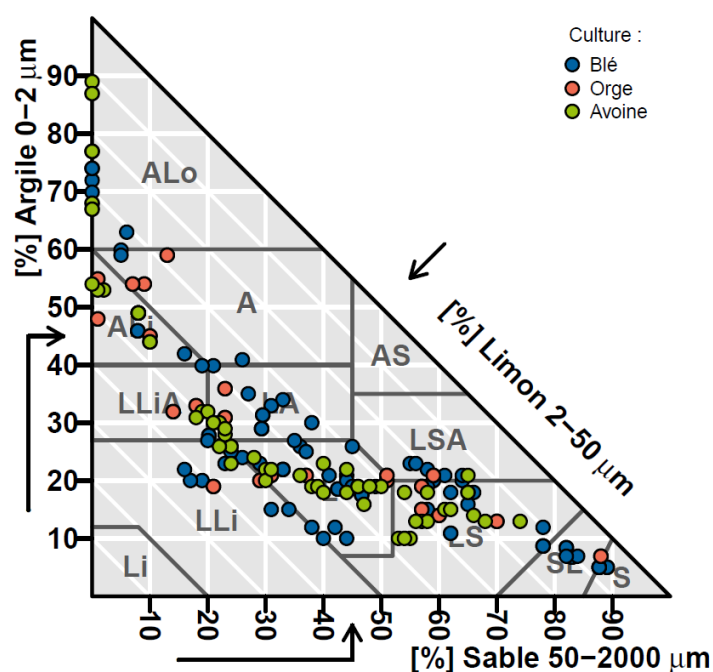


Figure 2. Distribution des blocs des essais de céréales dans le triangle des textures. ALo : Argile lourde ; ALi : Argile limoneuse ; A : Argile ; LLiA : Loam limono-argileux ; LA : Loam argileux ; AS : Argile sableuse ; L : Loam ; LLi : Loam limoneux ; LSA : Loam sablo-argileux ; LSA : Loam sableux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

1.3.1 Essais de blé de printemps

Les données du PSEF sont issues d'essais de fertilisation répartis dans huit régions administratives du Québec. Dans l'ensemble, 41 % des essais ont été menés sur des sols du groupe de textures G1, 34 % sur des G2 et 25 % sur des G3. Toutefois, à la suite de l'analyse pédologique des profils de sols, 5 sites du groupe G1 ayant une teneur en argile inférieure à 30 % ont été déplacés vers les groupes de textures G2 (B-12, B-13, B-15, B-19) ou G3 (B-1). Pour la totalité des essais, le diamètre moyen pondéré (DMP) des agrégats stables à l'eau se trouvait dans l'intervalle souhaité de 0,5 à 5 mm, lequel favorise un bon contact du sol avec la semence (CRAAQ, 2012). Le pH_{eau} moyen du sol était de $6,3 \pm 0,6$. La matière organique du sol, mesurée par la méthode par perte au feu,

variait de 2,5 à 7,7 %, avec une majorité (63 %) des sites dans l'intervalle optimal de 3 à 5 % (CRAAQ, 2010). Les analyses par la méthode Mehlich-3 ont révélé que la majorité des sites présentait des ISP_1 sous le seuil critique défini par le Règlement sur les Exploitations agricoles (REA) (MDDEP, 2010). Finalement, les teneurs des sols en K_{M3} variaient largement entre 22 à 673 ppm K_{M3} .

Pour les sites d'Agriculture et agroalimentaire Canada (AAC) et du CEROM, la teneur en matière organique du sol a été dosée par la méthode Walkley-Black (MO_{WB}). Pour la suite du document, la MO_{WB} 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) :

$$MO_{PAF} (\%) = 0,993 2 \times MO_{WB} (\%) + 0,587 \quad (\text{Éq. 1})$$

Les essais N d'AAC ont été menés de 2004 à 2006 dans les régions de la Montérégie et de Lanaudière. Sur douze essais, six ont été menés sur des sols du groupe de texture G3, trois sur des G2 et trois sur des G1. Le contenu en argile variait de 5 à 46 % (moyenne de 17 %), tandis que le contenu en sable allait de 8 à 89 % (moyenne de 60 % ; Figure 2). L'intervalle des valeurs de pH_{eau} variait de 5,9 à 7,3 (moyennement acide à neutre), avec une majorité de sites (67 %) ayant un pH_{eau} dans l'intervalle de 6,0 à 7,0 considéré adéquat pour le blé (CRAAQ, 2010). La teneur en MO_{WB} moyenne était 2,9 % (équivalent à 3,5 % MO_{PAF}). Trois sites avaient des ISP_1 particulièrement élevés (> 35,1 %), en raison d'un historique d'applications répétées d'engrais phosphatés. Autrement, les autres sites présentaient des ISP_1 de 1,9 à 11,0 %. Enfin, les sols avaient une teneur moyenne en K de 130 ppm de K_{M3} .

Au CEROM, les essais de fertilisation NPK du blé ont été réalisés en 1998 et en 2002 en Montérégie, sur un loam argileux de la série Sainte-Rosalie. Le blé faisait partie d'une rotation de cultures sur quatre ans (blé de printemps panifiable, soya, maïs-grain, maïs-grain) initiée en 1998 et reproduite deux fois (Tremblay *et al.*, 2011). Comme les résultats détaillés des analyses de sol (0-20 cm) au Mehlich-3 n'étaient pas disponibles pour les années 1998 et 2002, ce sont les résultats des analyses de l'année 2000 qui ont été utilisés. Pour les fins de l'analyse, des moyennes ont été calculées par bloc. Dans l'ensemble, l' ISP_1 moyen était de 6,4 %. Le sol était très riche en K_{M3} , avec des teneurs s'étendant de 604 à 649 kg K_{M3} /ha. Le sol était faiblement alcalin (pH_{eau} moyen de 7,6) par rapport aux conditions idéales de la céréale (6,0 à 7,0 ; CRAAQ, 2010). La teneur en MO_{WB} s'élevait à 4,8 % (équivalent à une MO_{PAF} de 5,4 %) sur tout le site.

Les Moulins de Soulanges ont réalisé un essai N de blé de printemps panifiable en 2018. Celui-ci s'est déroulé au centre de recherche Agrinova, dans la région du Saguenay–Lac-Saint-Jean sur un loam argileux (G1) contenant 31 % d'argile et 30 % de sable. Comme plusieurs sols de son groupe, il présente une faible perméabilité. À l'automne précédant l'essai, une analyse du sol (profondeur d'échantillonnage non spécifiée) au Mehlich-3 a été produite pour tout le site. Les résultats révèlent un sol moyennement acide (pH_{eau} de 6,0) et particulièrement riche en matière organique (MO_{PAF} de 8,2 %). L' ISP_1 était de 2,0 %, ce qui le classe bien en dessous du seuil de saturation critique établi par le REA (7,6 % ; MDDEP, 2010). Finalement, ce site était bien pourvu en K, avec une teneur de 356 kg K_{M3} /ha. Dans l'ensemble, le sol présentait de bonnes conditions pour l'établissement de l'essai de blé, mais sa faible perméabilité et sa forte teneur en matière organique, jumelées au climat frais de la région, indiquent possiblement des conditions où la minéralisation de la matière organique est ralentie et provoquerait son accumulation. Une attention particulière a été apportée à ce site pour la suite de l'analyse.

1.3.2 Essais d'orge

En considérant les essais N, P et K, 42 % des essais d'orge ont été menés sur des sols du groupe de textures G1, 30 % sur des G2 et 28 % sur des G3. De même que pour le blé, suivant les résultats des analyses de profils de sols, deux sites ont changé de groupe de textures : le site O-7 passe du groupe G1 au groupe G3, tandis que les blocs G3 du site O-20 ont été déplacés vers le groupe G2. Le pH_{eau} moyen du sol était $6,3 \pm 0,5$ et variait de 5,5 à 6,8 (fortement acide à neutre) pour l'ensemble des essais. La matière organique du sol moyenne, mesurée par la méthode de perte au feu, était de $5,3 \pm 2,1$ % avec une majorité (63 %) des sites dans l'intervalle optimal de 3 à 5 % (CRAAQ, 2010). Les analyses par la méthode Mehlich-3 ont révélé que la majorité des sites (91 %) présentait un ISP_1 sous les seuils critiques de 7,6 % et de 13,1 % selon la teneur en argile, tel que défini par le REA (MDDEP, 2010). Il aurait été souhaitable de disposer d'une plus grande proportion de sites saturés en P en vue de tester le comportement de cette catégorie de sol à la fertilisation phosphatée à partir d'un plus grand nombre d'observations. Pour les essais K, les teneurs des sols en K_{M3} couvraient une vaste gamme de richesses de sols, allant de 29 à 338 ppm K_{M3} .

Les données supplémentaires ajoutées dans la base de données proviennent d'un seul essai N réalisé en 2014 par le chercheur Jean Goulet à la ferme expérimentale de Semican. Celle-ci est située dans la région administrative du Centre-du-Québec, à Princeville, sur un loam sableux. Une seule analyse de sol était disponible pour l'ensemble du site (Annexe I-B.). La teneur en matière organique du sol a été dosée par la méthode de Walkley-Black (MO_{WB}). Pour la suite du document, la MO_{WB} 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) (voir Éq. 1 page 14).

1.3.3 Essais d'avoine

Dans les essais d'avoine, six sites ayant une teneur en argile inférieure à 30 % ont été déplacés du groupe de textures G1 vers les groupes G2 (A-2, A-3, A-15) et G3 (A-1, A-17, A-18) pour les mêmes raisons que celles évoquées précédemment pour les deux autres cultures. Sur l'ensemble des essais N, P et K, 36,8 % de ceux-ci ont été menés sur des sols du groupe G1, 31,6 % sur des G2 et 31,6 % sur des G3. Le diamètre moyen pondéré (DMP) des agrégats stables à l'eau se trouvait dans l'intervalle souhaité de 0,5 à 5 mm, lequel favorise un bon contact du sol avec la semence (CRAAQ, 2012). Le pH_{eau} moyen du sol était de $6,1 \pm 0,5$. La teneur en matière organique du sol mesurée par la méthode de perte au feu (MO_{PAF}) était élevée, variant de 2,1 à 13,7 %. Seulement 37 % des sites avaient une teneur en MO_{PAF} inférieure ou égale à 5 %. Les analyses par la méthode Mehlich-3 ont révélé que la majorité des sites présentaient des ISP_1 sous le seuil critique défini par le REA (MDDEP, 2010). Finalement, les teneurs des sols en K_{M3} couvraient une gamme de valeurs allant de 31 à 343 ppm K_{M3} .

Aux sites d'Agriculture et agroalimentaire Canada (AAC), la teneur en matière organique du sol a été dosée par la méthode Walkley-Black (MO_{WB}). Celle-ci a donc 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) (voir Éq. 1 page 14). Les essais N d'AAC ont été menés en 2013 et 2014 sur la ferme expérimentale de Normandin, au Saguenay–Lac-Saint-Jean, sur une argile limoneuse de la série Labarre. Le contenu en sable, en limon et en argile était respectivement de 8, 43 et 49 %. Le pH du sol était de 6,2 à 6,7

(faiblement acide à neutre), la MO_{WB} était en moyenne de 4,2 % (équivalent à 4,7 % MO_{PAF}). Le sol avait des teneurs moyennes de 100 ppm P_{M3} et de 254 ppm K_{M3} .

1.4 Dispositifs expérimentaux et traitements

Une description sommaire des essais de blé, d'orge et d'avoine est présentée à l'annexe I (Annexe I-A, Annexe I-B et Annexe I-C). De plus, pour chaque culture, une synthèse comparative des essais en fonction de la source des données est présentée à l'annexe II (Annexe II-A, Annexe II-B et Annexe II-C). Cette dernière permet de comparer et de valider les différents jeux de données pour les principaux aspects agronomiques, géographiques et expérimentaux.

1.4.1 Programme de soutien aux essais de fertilisation (PSEF) – essais de blé de printemps, d'orge et d'avoine

La structure du dispositif expérimental des essais du PSEF était la même pour les trois céréales. Les essais N, P et K étaient indépendants et répartis aléatoirement à l'intérieur d'un site. Pour chaque essai, les traitements (doses d'engrais testées) étaient disposés selon un plan en trois blocs complètement aléatoires.

Les doses de N étaient propres à chaque céréale tandis que les doses de P et de K étaient communes aux trois cultures. Hormis les essais N, les traitements ont été choisis en fonction de la classe de fertilité du sol pour l'élément testé (Essai P, section 1.4.1.2 et essai K, 1.4.1.3). L'indice de saturation en P (ISP_1) et la concentration en K_{M3} ont été utilisés pour la classification de la fertilité des sols dans les essais P et les essais K respectivement. Des doses plus élevées de P_2O_5 et de K_2O ont donc été testées dans les sols dits à « faibles teneurs en K_{M3} » ou « faiblement saturés du P ». Par ailleurs, certains sites d'essais P et K ont été mal classés de part et d'autre des seuils présumés de non-réponse de la culture et n'ont pas reçu les doses prévues (ex. : doses élevées pour des sites ayant une forte concentration en K_{M3}). 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'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

Dans le cadre des essais de blé de printemps du PSEF, les traitements correspondaient à cinq doses de N variant de 0 à 200 kg/ha. Ces doses ont été appliquées sous forme de nitrate d'ammonium calcique (27-0-0) en un, deux ou trois apports en fonction des traitements (Tableau 1). Une première application des engrais était effectuée à la volée avant le semis, puis incorporée. Une deuxième application avait lieu à la volée à la fin du tallage ou au début de la montaison du blé. Finalement, la troisième application était effectuée à la sortie de la feuille étendard. Pour toutes les unités expérimentales, les éléments P et K ont été ajustés à des niveaux non limitants

pour la plante. Les apports complémentaires de P₂O₅ et de K₂O ont été faits à la volée et incorporés avant le semis, et les doses correspondaient au T8 et au T13 des essais P et K (Tableaux 4 et 5 respectivement).

Tableau 1. Description des traitements des essais de fertilisation azotée de blé du PSEF

Blé, essais N, PSEF			Dose de N (kg/ha)				
Années	Nombre de sites	Mode et période d'application	T1	T2	T3	T4	T5
2013-2018	20	À la volée avant le semis, incorporé	0	50	50	50	50
		À la volée au stade fin tallage / début montaison	0	0	50	50	100
		À la volée à la sortie de la feuille étendard	0	0	0	50	50
Apport total			0	50	100	150	200

Dans le cas des essais de l'orge du PSEF, les traitements consistaient en cinq doses de N variant de 0 à 120 kg/ha (Tableau 2) appliquées sous forme de nitrate d'ammonium calcique (27-0-0) en un ou deux apports, selon la dose. La première application a été effectuée à la volée avant le semis, puis incorporée. La deuxième application avait lieu à la volée à la fin du tallage ou au début de la montaison de l'orge. Dans toutes les unités expérimentales des essais N, les apports de P₂O₅ et de K₂O ont été faits à la volée et incorporés avant le semis. Les doses P₂O₅ et de K₂O appliquées correspondaient au T8 et au T13 des essais P et K (Tableaux 4 et 5 respectivement).

Tableau 2. Description des traitements des essais de fertilisation azotée d'orge du PSEF

Orge, essais N, PSEF			Dose de N (kg/ha)				
Années	Nombre de sites	Mode et période d'application	T1	T2	T3	T4	T5
2013-2017	22	À la volée avant le semis, incorporé	0	30	60	60	60
		À la volée au stade fin tallage / début montaison	0	0	0	30	60
Apport total			0	30	60	90	120

Quant aux essais N de l'avoine, les traitements sont présentés au Tableau 3. Les traitements correspondaient à cinq doses de N variant de 0 à 100 kg/ha. Les engrais étaient appliqués en un ou deux apports selon la dose sous forme de nitrate d'ammonium calcique (27-0-0), à la volée puis incorporés (avant le semis) ou laissés en surface (en saison). Dans toutes les unités expérimentales des essais N, les apports de P₂O₅ et de K₂O correspondaient au T8 et au T13 des essais P et K (Tableaux 4 et 5 respectivement).

Tableau 3. Description des traitements des essais de fertilisation azotée d'avoine du PSEF

Avoine, essais N, PSEF			Dose de N (kg/ha)				
Années	Nombre de sites	Mode et période d'application	T1	T2	T3	T4	T5
2013-2018	19	À la volée avant le semis, incorporé	0	25	50	50	50
		À la volée au stade fin tallage / début montaison	0	0	0	25	50
Apport total			0	25	50	75	100

1.4.1.2 Essais P

Les traitements correspondaient à cinq doses de P₂O₅ variant de 0 à 120 kg/ha ou de 0 à 60 kg/ha. L'un ou l'autre de ces intervalles était sélectionné en fonction de l'ISP₁ du sol par rapport au seuil du REA (MDDEP, 2010 ; Tableau 4). L'engrais était appliqué à la volée et incorporé avant le semis sous forme de superphosphate triple (0-46-0). Tous les traitements de P comportaient des apports complémentaires de N et de K₂O dont la dose, le mode et la période d'application correspondaient au T3 et au T13 des essais N et K (Tableaux 1 et 5).

Tableau 4. Description des traitements des essais de fertilisation phosphatée de céréales (blé, orge, avoine) du PSEF

Essais P			Dose de P ₂ O ₅ (kg/ha)					
Années	Nombre de sites	ISP ₁ ¹	Mode et période d'application	T6	T7	T8	T9	T10
Blé : 2013-2018 Orge : 2013-2017 Avoine : 2013-2018	Blé : 19 Orge : 22 Avoine : 17	≤ 7,6 ou ≤ 13,1 %	À la volée avant le semis, incorporé (apport total)	0	30	60	90	120
	Blé : 1 Orge : 2 Avoine : 2	> 7,6 ou > 13,1 %	À la volée avant le semis, incorporé (apport total)	0	15	30	45	60

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

1.4.1.3 Essais K

Les traitements correspondaient à cinq doses de K₂O variant de 0 à 120 kg/ha ou de 0 à 90 kg/ha selon que la teneur du sol en K_{M3} était respectivement inférieure ou supérieure à 200 kg/ha (89 ppm K_{M3} ; Tableau 5). L'engrais était appliqué à la volée puis incorporé avant le semis sous forme de muriate de potassium (0-0-60) ou de sulfate de potassium et de magnésium (0-0-22-11) lorsque du Mg a été nécessaire. Tous les traitements de K comportaient des apports complémentaires de N et de P₂O₅ dont la dose, le mode et la période d'application correspondaient au T3 et au T8 des essais N et K (Tableaux 1 et 4).

Tableau 5. Description des traitements des essais de fertilisation potassique de céréales (blé, orge, avoine) du PSEF

Essais K			Dose de K ₂ O (kg/ha)					
Années	Nombre de sites	K _{M3} du sol (kg/ha)	Mode et période d'application	T11	T12	T13	T14	T15
Blé : 2013-2018 Orge : 2013-2017 Avoine : 2013-2018	Blé : 10 Orge : 10 Avoine : 10	≤ 200 K _{M3}	À la volée avant le semis, incorporé (apport total)	0	30	60	90	120
	Blé : 10 Orge : 12 Avoine : 9	> 200 K _{M3}	À la volée avant le semis, incorporé (apport total)	0	15	30	60	90

1.4.2 Agriculture et agroalimentaire Canada – essais de blé de printemps

Parmi les huit traitements testés dans l'étude, six ont été retenus pour leur compatibilité avec les données du PSEF. Ces traitements correspondaient à six doses de N variant de 0 à 200 kg/ha. Pour chacun des traitements à l'exception du témoin, 30 kg N/ha étaient appliquées à la volée puis incorporé au semis, tandis que le reste était apporté à la volée à l'élongation de la tige. Chaque traitement à l'étude a reçu un apport de K₂O et de P₂O₅ jugé suffisant pour ne pas limiter les rendements.

Tableau 6. Description des traitements des essais de fertilisation azotée de blé panifiable d'Agriculture et agroalimentaire Canada

Essais N			Dose de N (kg/ha)					
Années	Nombre de sites	Mode et période d'application	T1	T2	T3	T4	T5	T6
2004-2006	12	À la volée au semis, incorporé	0	30	30	30	30	30
		À la volée en post-levée à l'élongation de la tige	0	10	50	90	130	170
		Apport total	0	40	80	120	160	200

1.4.3 Les Moulins de Soulanges – essais de blé de printemps

Parmi les sept traitements de l'étude, quatre ont été retenus pour leur compatibilité avec les données du PSEF. Ces traitements correspondaient à quatre doses de N variant de 0 à 120 kg/ha (Tableau 7) fractionnées entre le semis et la fin du tallage. Aucun apport de P ni de K ne complétait les doses de N.

Tableau 7. Description des traitements des essais de fertilisation azotée de blé panifiable des Moulins de Soulanges

Essai N			Dose de N (kg/ha)			
Année	Nombre de sites	Mode et période d'application	T1	T2	T4	T6
2018	1	À la volée au semis	0	30	30	60
		À la volée au stade fin tallage	0	30	60	60
		Apport total	0	60	90	120

1.4.4 Centre de recherche sur les grains (CEROM) – essais de blé de printemps

L'étude portait sur les trois éléments majeurs (NPK) et comportait un total de 11 traitements. Ces essais comportaient deux types de témoins : 1) un traitement sans engrais ON-OP-OK et 2) un traitement sans apport de l'élément testé (ex. ON + PK pour un essai d'azote). Le traitement sans engrais (ON-OP-OK) a été écarté de l'analyse puisqu'il ne correspond à aucun traitement similaire du PSEF. Ainsi, les traitements retenus correspondaient à quatre doses de N (0 à 120 kg/ha), trois doses de P₂O₅ (0 à 60 kg/ha) et trois doses de K₂O (0 à 60 kg/ha) (Tableaux 8, 9, 10). Pour chaque élément testé, les deux autres éléments ont été apportés selon les recommandations du Conseil des productions végétales du Québec en vigueur au moment de l'étude (CPVQ, 1996).

Tableau 8. Description des traitements des essais de fertilisation azotée de blé panifiable du CEROM

Essais N			Dose de N (kg/ha)			
Années	Nombre de sites	Mode et période d'application	T2	T3	T4	T5
1998 et 2002	2	À la volée avant le semis	0	30	45	60
		À la volée 39 à 45 jours après le semis	0	30	45	60
Apport total			0	60	90	120

Tableau 9. Description des traitements des essais de fertilisation phosphatée de blé panifiable du CEROM

Essais P			Dose de P ₂ O ₅ (kg/ha)		
Années	Nombre de sites	Mode et période d'application	T6	T7	T8
1998 et 2002	2	À la volée avant le semis (apport total)	0	30	60

Tableau 10. Description des traitements des essais de fertilisation potassique de blé panifiable du CEROM

Essais K			Dose de K ₂ O (kg/ha)		
Années	Nombre de sites	Mode et période d'application	T9	T10	T11
1998 et 2002	2	À la volée avant le semis (apport total)	0	30	60

1.4.4.1 Semican – essais d'orge

L'essai d'orge brassicole mené par Semican est une expérience factorielle, où ont été testés les effets de cinq doses croissantes de N sur deux cultivars (Newdale et Cerveza) semés à deux densités (200 et 400 grains/m²). Les cinq traitements de fertilisation azotée allaient de 0 à 120 kg N/ha (Tableau 11). Les engrais étaient appliqués à la volée en un ou deux apports selon la dose, d'abord au début du tallage, puis à la fin de celui-ci, au début de la montaison. L'azote était sous forme de nitrate d'ammonium calcique (27-0-0). Dans toutes les unités expérimentales, un apport de 30 kg/ha de P₂O₅ et de 45 kg/ha de K₂O a été fait à la volée et incorporé avant le semis.

Tableau 11. Description des traitements des essais de fertilisation azotée d'orge brassicole de Semican

Essai N			Dose de N (kg/ha)				
Année	Nombre de sites	Mode et période d'application	T1	T2	T3	T4	T5
2014	1	À la volée et incorporé, stade début tallage	0	30	60	60	60
		À la volée au stade fin tallage / début montaison	0	0	0	30	60
Apport total			0	30	60	90	120

1.4.5 Agriculture et agroalimentaire Canada – essais d’avoine

Les essais d’Agriculture et agroalimentaire Canada étaient de type factoriel. Ils étaient constitués de quatre blocs aléatoires complets disposés en tiroirs (split-plot) à deux facteurs. Le facteur en parcelle principale était la dose de N (quatre niveaux) tandis que le facteur en sous-parcelle était le cultivar (dix niveaux). L’essai a été répété sur deux ans. Parmi les dix cultivars testés la première année, trois cultivars (CFA1107, OA1331-5, SA060123) ont été remplacés par trois autres (CFA1317, OA1225-2, OA1331-5-5) l’année suivante.

Les doses de N variaient de 0 à 150 kg/ha. L’azote était appliqué à la volée sous forme d’urée (46-0-0) puis incorporé avant le semis. Toutes les unités expérimentales ont reçu des apports complémentaires de P et de K afin que ces éléments ne soient pas limitants.

Tableau 12. Description des traitements des essais de fertilisation azotée d’avoine d’Agriculture et agroalimentaire Canada

Essais N			Dose de N (kg/ha)			
Années	Nombre de sites	Mode et période d’application	T1	T2	T3	T4
2013-2014	2	À la volée avant le semis, incorporé (apport total)	0	50	100	150

1.5 Rendements en grains et en paille

Les rendements en grains et en paille (lorsque disponibles) des céréales ainsi que les rendements moyens de référence pour la période de réalisation des essais sont présentés à l’annexe III (Annexe III-A à Annexe III-F). En général, de bons rendements ont été obtenus dans tous les essais. Les rendements de référence ont été généralement atteints même dans les parcelles témoin des essais P et K, alors qu’ils ne l’ont pas été dans les parcelles témoin des essais N.

Les statistiques descriptives des rendements en grains du blé, de l’orge et de l’avoine sont présentées au Tableau 13. Dans le blé, les rendements en grains étaient en moyenne de 2 601 kg/ha, de 3 521 kg/ha et de 3 616 kg/ha pour les essais N, P et K respectivement. Le plus faible rendement moyen obtenu dans les essais N s’explique principalement par la faible productivité de la culture dans les parcelles recevant peu ou pas de N, traduisant une plus grande sensibilité au manque de N. Les rendements en grains moyens de l’orge étaient de 4 140 kg/ha, de 4 231 kg/ha et de 4 214 kg/ha pour les essais N, P et K respectivement. Dans l’avoine, ces rendements ont varié à l’intérieur d’un intervalle plus restreint, soit 4 017 kg/ha pour les essais N, 3 362 kg/ha pour les essais P et 3 781 kg/ha pour les essais K.

Tableau 13. Statistiques descriptives sur les données non validées (avant l'analyse exploratoire) des rendements en grains du blé, de l'orge et de l'avoine pour les essais N, P et K

Culture	Essai	Nb obs. ¹	Rendements en grains (kg/ha)			
			Moyenne	Écart-type	Minimum	Maximum
Blé						
	N	734	2 601	1 152	378	7 435
	P	324	3 521	1 035	1 215	6 033
	K	378	3 616	1 212	994	7 481
Orge						
	N	349	4 140	1 070	854	7 541
	P	326	4 231	1 115	526	6 860
	K	393	4 314	1 021	1 754	6 877
Avoine						
	N	605	4 017	1 037	1 546	7 097
	P	284	3 662	960	1 264	5 928
	K	340	3 781	735	1 908	5 399

¹Nb obs. : nombre d'observations.

1.6 Aspects additionnels pour l'interprétation des résultats

1.6.1 Variété culturale

Dans le cadre des essais de blé du PSEF, les variétés utilisées comportaient 30 % de blé de provende (destiné à l'alimentation animale) et 70 % de blé panifiable, tandis que les essais d'Agriculture et agroalimentaire Canada, du CEROM et des Moulins de Soulanges ont tous été menés avec des blés panifiables (Tableau 14). Ainsi, une grande majorité (82 %) des essais ont porté sur des variétés de blé panifiable.

Dans le cadre des essais d'orge, dix variétés différentes ont été utilisées dans le cadre des essais du PSEF. La variété la plus utilisée était Cyane (24 %), suivie de Synasolis (16 %). Dans les essais de Semican, deux variétés (Cerveza et Newdale) ont été testées. Toutefois, la variété Cerveza n'a pas été retenue pour la suite des analyses (voir section 1.7). Elle n'a donc pas été considérée dans les statistiques du Tableau 15. Les essais d'orge ont été réalisés majoritairement (84 %) avec de l'orge de provende et 63 % des variétés étaient des orges à 6 rangs.

Dans les essais d'avoine, les variétés utilisées dans le cadre du PSEF comportaient 79 % d'avoine vêtue et 21 % d'avoine nue (Tableau 16). Les cultivars à l'essai devaient présenter un indice de verse inférieur à 3 selon les Réseaux de Grandes Cultures du Québec (RGCCQ, 2019). Les deux cultivars d'avoine des essais d'AAC visaient le marché d'alimentation humaine.

Tableau 14. Caractéristiques et représentativité des variétés de blé utilisées selon la source avant la validation des données

Variété de blé	Catégorie	Sources des données ¹				Tous les essais
		AAC (essais N seulement)	CEROM	PSEF	MdS (essais N seulement)	
AC Barrie	Panifiable	100 %	50 %	-	-	26 %
AC Brio	Panifiable	-	-	5 %	-	3 %
Diablo	Panifiable	-	50 %	-	-	2 %
Hélios	Panifiable	-	-	16 %	-	10 %
Magog	Panifiable	-	-	10 %	-	6 %
Major	Panifiable	-	-	20 %	-	12 %
SS Blomidon	Panifiable	-	-	8 %	-	5 %
Touran	Panifiable	-	-	10 %	-	6 %
Variétés confidentielles	Panifiable	-	-	-	100 %	13 %
Hoffman	Provende	-	-	5 %	-	3 %
Nass	Provende	-	-	25 %	-	15 %
Total		24 %	5 %	59 %	13 %	100 %

¹ MdS, Moulins de Soulanges; AAC, Agriculture et agroalimentaire Canada ; CEROM, Centre de recherche sur les grains ; PSEF : Programme de soutien aux essais de fertilisation.

Tableau 15. Caractéristiques et représentativité des variétés d'orge utilisées selon la source avant la validation des données

Variété	Marché d'alimentation	Type	Source de données ¹		Tous les essais
			PSEF	Semican (essais N seulement)	
Altona	Provende	Orge vêtue à 6 rangs	6 %	-	6 %
Alyssa	Provende	Orge vêtue à 6 rangs	13 %	-	13 %
Champion	Provende	Orge vêtue à 2 rangs	4 %	-	4 %
Cyane	Provende	Orge vêtue à 6 rangs	24 %	-	23 %
Leader	Provende	Orge vêtue à 2 rangs	4 %	-	4 %
Rhea	Provende	Orge vêtue à 6 rangs	5 %	-	5 %
Synasolis	Provende	Orge vêtue à 6 rangs	16 %	-	16 %
Selena	Provende	Orge vêtue à 2 rangs	13 %	-	13 %
Bentley	Brassicole	Orge vêtue à 2 rangs	4 %	-	4 %
Newdale	Brassicole	Orge vêtue à 2 rangs	9 %	100 %	11 %
Total			98 %	2 %	100 %

¹ PSEF : Programme de soutien aux essais de fertilisation.

En colonne, les pourcentages représentent les proportions des variétés de données ou selon l'ensemble des données (tous les essais). La ligne « Total » représente la proportion du nombre de données de la source par rapport à l'ensemble du jeu de données. À titre d'exemple, la variété Altona représentait 6 % des données du PSEF, 0 % des données de Semican et 6 % de l'ensemble du jeu de données. La ligne « Total » quant à elle, montre que 98 % du jeu de données provenaient des données du PSEF.

Tableau 16. Caractéristiques et représentativité des variétés d’avoine utilisées selon la source avant la validation des données

Variété	Marché d'alimentation	Catégorie	Source de données ¹		
			AAC (essais N seulement)	PSEF	Tous les essais
Bia	Humain	Vêtue	-	5 %	4 %
Canmore	Animal	Vêtue	-	11 %	8 %
Casino	Animal	Nue	-	5 %	4 %
CDC Orrin	Humain	Vêtue	10 %	5 %	6 %
Dieter	Humain	Vêtue	10 %	11 %	10 %
Hidalgo	Animal	Vêtue	-	5 %	4 %
Navaro	Animal	Nue	-	16 %	12 %
Nice	Humain	Vêtue	-	5 %	4 %
Optimum	Humain	Vêtue	-	11 %	8 %
Rigodon	Animal	Vêtue	-	5 %	4 %
Synextra	Humain	Vêtue	-	21 %	16 %
Autres variétés	Variable	Variable	80 %	-	21 %
Total			26 %	74 %	100 %

¹ AAC, Agriculture et agroalimentaire ; PSEF : Programme de soutien aux essais de fertilisation.

En colonne, les pourcentages représentent les proportions des variétés selon la source de données ou selon l'ensemble des données (*tous les essais*). La ligne « Total » représente la proportion du nombre de données de la source par rapport à l'ensemble du jeu de données. À titre d'exemple, la variété Bia représentait 0 % des données d'AAC, 5 % des données du PSEF et 4 % de l'ensemble des essais NPK d'avoine. La ligne « Total » quant à elle, montre que 74 % du jeu de données provenaient du PSEF. En raison de l'arrondissement, la somme des pourcentages peut ne pas équivaloir précisément à 100 %.

1.6.2 Précédent cultural

Les essais de blé suivaient majoritairement une culture de soya (58 %) et dans une moindre mesure, une culture de blé (15 %), de pommes de terre (6 %), d'orge (3 %) ou de maïs-grain (2 %). Pour 16 % des sites, le précédent cultural n'était pas disponible. Les essais d'orge du PSEF succédaient à une culture de soya (34 %), de blé (19 %), de maïs (17 %), d'orge (12 %), à des prairies de graminées (12 %) ou d'avoine (5 %). L'essai d'orge de Semican a été réalisé sur un précédent de blé d'automne. Finalement, les précédents culturaux des essais PSEF d'avoine étaient majoritairement des céréales, soit de l'avoine (42 %), du blé (21 %) ou de l'orge (16 %). Une minorité des sites ont suivi une culture de maïs (5 %), de soya (5 %) ou une prairie de graminées (5 %), et le reste (6 %) était en jachère. Le précédent cultural des essais d'avoine d'Agriculture et agroalimentaire Canada était une céréale.

1.7 Analyse exploratoire

Lorsque réalisés en plein champ, les essais de fertilisation peuvent faire l'objet de multiples problématiques pouvant entraîner une exclusion de données. Lors de la réalisation des essais du PSEF, lorsque nécessaires, certaines parcelles ont été abandonnées par l'équipe de terrain pour des raisons diverses, dont le piétinement par des animaux, le mauvais établissement de la culture, la présence de maladie foliaire, etc. Pour l'essai de blé des MdS, des incertitudes par rapport au dispositif ont entraîné l'exclusion du jeu de données. Dans le cadre du traitement des données, une analyse exploratoire a été également réalisée minutieusement, ce qui a permis entre autres de détecter la présence de données aberrantes ou influentes, et de vérifier la représentativité des données de rendements en comparaison à ce qui est obtenu en contexte de production commerciale sur la

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

Le bilan de la validation des données est présenté au Tableau 17. À l'issue de l'analyse exploratoire, 66 % (66-65-67 % des essais N-P-K respectivement) du jeu de données initial a été validé et conservé pour la suite de l'analyse. Si on considère les cultures séparément, pour le blé, 71 % (81-65-69 % des essais N-P-K respectivement) du jeu de données PSEF ont été validés. Une plus faible proportion a été retenue pour les données provenant des essais autres que ceux du PSEF, soit 62 % (59-100-83 % des essais N-P-K respectivement). La liste des données exclues lors de la validation est disponible à l'annexe IV.

Quant à la culture d'orge, 74 % (98-65-63 % des essais N-P-K respectivement) des données collectées lors des essais du PSEF ont été validées pour être utilisées pour la suite de l'analyse. Bien que 94 % des données de Semican aient été validées, seulement 19 % des données ont été conservées pour la suite des analyses. En effet, cet essai consiste en une expérience factorielle en 4 blocs complets aléatoires comportant 3 facteurs (5 doses de N × 2 cultivars × 2 densités). De ce fait, il a été envisagé de réduire le poids de ce site sur les résultats d'analyse globale. Pour ce faire, une analyse de variance a d'abord été réalisée sur ces données. Les interactions étant significatives tant entre les doses et les cultivars ($P = 0,048$) qu'entre les doses et les densités de semis ($P = 0,004$), il n'a pas été possible de calculer des moyennes entre les densités ou entre les cultivars. De ce fait, il a été décidé de garder une seule densité de semis (400 grains/m²) et un seul cultivar (Newdale), selon ce qui se rapprochait le plus des conditions expérimentales du PSEF. La liste des données exclues lors de la validation est disponible à l'annexe IV.

Enfin pour l'avoine, environ 71 % des données du PSEF ont été validées après l'analyse exploratoire (81-63-70 % des essais N-P-K respectivement). Cependant, seulement 18 % des données d'AAC ont été intégrées au jeu de données principal, en dépit du fait que 88 % de celles-ci aient été validées. L'intégration des données d'AAC à celles du PSEF a été compliquée par la nature factorielle de l'expérimentation (4 doses de N × 10 cultivars), avec les doses de N en parcelles principales et les cultivars en sous-parcelles, le tout disposé selon un plan en 4 blocs complets aléatoires. En considérant les dix cultivars des deux années, ces deux sites auraient constitué plus de la moitié du jeu de données. Le risque de créer un biais était grand, particulièrement considérant qu'une seule analyse de sol par site était disponible. Conséquemment, afin de diminuer le poids accordé à ces sites, seuls les cultivars communs aux essais du PSEF (Dieter et CDC Orrin) ont été conservés. Chaque combinaison de cultivar et d'année a été considérée comme un site distinct dans le modèle d'analyse, pour un total de quatre sites. Cette méthode a été préférée au calcul de moyennes par dose afin de valoriser le grand nombre d'observations disponibles. Les autres cultivars ont été analysés dans un modèle séparé et ont permis d'appuyer les résultats obtenus, au besoin. La liste des données exclues lors de la validation est disponible à l'annexe IV.

Tableau 17. Bilan de la validation des données à l'issue de l'analyse exploratoire

Culture	Essai	Institution ¹	Jeu de données initial		Exclusions		Jeu de données final	
			Nb sites	Nb obs.	Nb sites	Nb obs.	Nb sites	Nb obs.
Blé								
	N	PSEF	20	300	2	58	18	242
	N	CEROM	2	32	1	16	1	16
	N	MdS	1	120	1	120	0	0
	N	AAC	12	288	1	45	11	243
	P	PSEF	20	300	4	105	16	195
	P	CEROM	2	24	0	0	2	24
	K	PSEF	20	357	3	112	17	245
	K	CEROM	2	24	0	4	2	20
Orge								
	N	PSEF	22	330	0	8	22	322
	N	Semican	1	80	0	65	1	15
	P	PSEF	23	345	5	121	18	224
	K	PSEF	22	402	4	147	18	255
Avoine								
	N	PSEF	19	285	3	55	16	230
	N	AAC	2	320	0	264	2 ²	56
	P	PSEF	19	285	3	105	16	180
	K	PSEF	19	342	2	104	17	238

¹ PSEF : Programme de soutien aux essais de fertilisation du MAPAQ ; CEROM : Centre de recherche sur les grains ; MdS : Les Moulins de Soulanges ; AAC : Agriculture et agroalimentaire Canada.

² En raison de la structure du dispositif expérimental, les deux sites d'avoine d'AAC ont été considérés comme quatre sites lors des analyses des données (les combinaisons de 2 sites × 2 cultivars) dans les analyses de la variance.

1.8 Calculs et analyses statistiques

La méthodologie employée pour le calcul des VSRF et les analyses statistiques préconisées sont similaires pour toutes les cultures traitées dans le MIRVRF. Les détails des calculs sont présentés dans le document synthèse de cette série (Landry *et al.* 2023, en cours de rédaction). Lorsque des ajustements spécifiques à une culture ont été requis, ceux-ci sont décrits directement dans le fascicule de la culture concernée. En complément des calculs et analyses, tout au long de la démarche d'établissement des VSRF, divers intervenants du milieu ont été contactés (ex. : conseillers du MAPAQ et de Club conseil en agroenvironnement, producteurs, professionnels de centres de recherche appliquée). Les échanges avec ces spécialistes ont permis de s'assurer que les recommandations tenaient compte des pratiques culturelles en vigueur et des contraintes propres à la culture.

1.8.1 Détermination des classes de fertilité des sols

La détermination des classes de fertilité des sols est effectuée en se basant sur la partition binaire de Cate-Nelson (Cate et Nelson, 1971). Ce test de partition consiste à mettre en relation le rendement relatif de la culture (RRel, %) et l'indicateur de prédiction de la fertilité du sol (ex. la teneur en K_{M3}). Le RRel est calculé à partir du rendement en grains. 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 calcul du RRel est effectué par bloc en utilisant l'équation suivante (Éq. 2) :

$$RRel (\%) = \frac{\text{Rendement}_{\text{Témoïn}}}{\text{Rendement}_{\text{Maximal}}} \quad (\text{Éq. 2})$$

dans laquelle le Rendement_{Témoïn} est le rendement du traitement témoin ne recevant aucun apport de l'élément fertilisant testé (ex. : N) (mais recevant les éléments complémentaires aux doses recommandées, ex. : P et K) et le Rendement_{Maximal} est le meilleur rendement obtenu parmi ceux d'un même bloc. 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.

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 qui vise à établir le seuil de l'indicateur de fertilité de sol à partir duquel le RRel atteint un plateau. Le nuage de point se retrouve ainsi divisé en quatre quadrants selon un axe vertical et un axe horizontal. La valeur à l'ordonnée est fixée le plus souvent autour d'un RRel atteint de 75 % ou plus. La valeur en abscisse (l'indicateur de fertilité du sol) représente la valeur critique agronomique qui permet l'obtention des deux catégories de sols exprimant des réponses différentes à la fertilisation (N, P ou K). Lorsque nécessaire, ces deux catégories de sols peuvent être subdivisées en sous-catégories en utilisant la procédure de Cope-Rouse (1973).

1.8.2 Détermination des doses optimales de fertilisants

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

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

$$ROM = \frac{\text{Rendement}_{\text{Fertilisé}}}{\text{Rendement}_{\text{Témoïn}}} \quad (\text{Éq. 3})$$

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

l'augmentation de rendement obtenue pour un traitement donné est numériquement significative en comparaison au témoin.

Puisque les doses testées dans les divers essais varient (voir section 1.4), les doses similaires ont dû être regroupées afin d'équilibrer les jeux de données et d'augmenter la puissance de l'ANOVA. Ainsi, les groupes de doses ont été considérés comme des variables catégoriques plutôt que numériques continues dans le modèle statistique. Les groupes de doses sont exprimés sous cette forme dans le présent document : 1-30-60. Dans ce cas, par exemple, il s'agit du 1^{er} groupe de doses testées (1-30-60) et les doses qui le composent vont de 30 à 60 kg/ha de l'élément testé (1-30-60). La VSRF proposée pour une catégorie de sol donnée est basée sur la répartition des doses testées à l'intérieur du groupe correspondant.

1.8.3 Diagnostic nutritionnel, quantités d'éléments nutritifs exportés et teneur en protéines des grains

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 (grain et paille). Les exportations ont été calculées pour les grains et la paille séparément afin de pouvoir tenir compte de la régie de gestion des résidus selon laquelle la paille peut rester ou quitter le champ après la récolte. Par la suite, afin d'évaluer les exportations combinées du grain et de la paille, les valeurs des deux types de biomasses, analysées séparément, ont été additionnées. Dans tous les cas, le diagnostic nutritionnel a été effectué sur la base des rendements en grains ; les valeurs relatives à la paille ont été calculées sur ces mêmes individus performants quant aux rendements en grains. Pour les trois céréales, le calcul des exportations est basé sur les résultats d'analyses de biomasses réalisées à partir des essais du PSEF. La teneur en eau a été estimée à 14 % au moment de la récolte. Cependant, au moment d'effectuer les analyses de tissus, après plusieurs mois d'entreposage, cette teneur a été mesurée autour de 10 %. Conséquemment, pour le calcul des exportations, les rendements ont été corrigés pour correspondre à la teneur en eau des biomasses de récolte analysées puis ont été ramenés à 14 % pour la présentation des résultats.

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

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

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

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

Concernant la teneur en protéines des grains, elle n'a pas été mesurée directement à tous les sites. Ainsi, lorsque nécessaire, elle a été calculée à partir de la teneur en azote des grains en utilisant les facteurs de conversion de 5,7 pour le blé et de 6,25 pour l'avoine et l'orge (Commission canadienne des grains, 2019 a, 2019 b, 2020 b). Pour le calcul de la teneur en protéines, une correction a également été apportée quant à la teneur en eau. Une humidité initiale de 10 % a été considérée dans la biomasse de récolte des grains des trois céréales, puis les protéines ont été rapportées sur une base de 13,5 % d'humidité pour le blé, tandis que pour l'orge et l'avoine, elles ont été rapportées sur une base sèche tel qu'il est d'usage dans chacune des cultures (Commission canadienne des grains, 2020).

2. FERTILISATION AZOTÉE

2.1 Portrait et représentativité des données

Les résultats des analyses chimiques de la couche de sol de surface (0-20 cm) pour les essais N du blé, de l'orge et de l'avoine sont résumées au Tableau 18. Hormis le blé, les sols avaient en général un pH situé dans l'intervalle optimal pour la croissance des cultures (CRAAQ, 2010). Bien que 44 % des blocs des essais N du blé avaient un pH situé en dehors de l'intervalle optimal de croissance, les sols présentaient tous un pH situé dans l'intervalle optimal de disponibilité de l'azote dans les sols minéraux (Brady, 1990). Pour les trois céréales, les sols étaient bien pourvus en matière organique (MO), aucun n'avait une teneur en MO sous les 2 % (Tableau 18). Dans le blé, une forte proportion des sols (85 %) avait une teneur en MO comprise entre 2 et 5 %. Dans l'orge et l'avoine, une grande proportion des sols avait une teneur en MO au-delà de 5 %, probablement en raison des nombreux sites établis en régions périphériques. Dans les essais d'avoine, tous les sites en sols G1 présentaient des teneurs en MO de plus de 4 %. Cette faible proportion de données en sols pauvres en MO pourrait avoir un effet sur le calcul des recommandations en azote pour cette catégorie de sol. En effet, la MO comble une partie des besoins azotés de la culture par minéralisation du N organique (N'Dayegamiye *et al.*, 2007). Ainsi, des besoins plus grands d'apports de N sont attendus en sol moins bien pourvu en MO et il aurait été bénéfique que cette catégorie de sol soit davantage représentée. Toutefois, une majorité des blocs présentait une teneur en N-NO₃ (0-30 cm) au semis inférieure à 15 ppm, ce qui suggère une réponse de la culture à la fertilisation azotée (MAAARO, 2017).

Tableau 18. Répartition des blocs des essais N de blé, d'orge et d'avoine pour différentes classes de propriétés de sol après la validation des données

pH _{eau}		Matière organique ²			N-NO ₃ au semis (0-30 cm)		Groupe de textures ⁵	
Seuil ¹	Blocs (%)	Seuil (%)	G1 ----- Blocs (%) -----	G2-G3 ----- Blocs (%) -----	Seuil (ppm) ³	Blocs (%)	Groupe	Blocs (%)
Blé de printemps								
≤ 6,0	23	2 – 3	31	25	≤ 15	85	G1	31
6,0 – 7,0	56	3 – 4	29	32	> 15	12	G2	37
> 7,0	21	4 – 5	20	30	nd ⁴	3	G3	32
-	-	5 – 6	10	4	-	-	-	-
-	-	> 6	10	9	-	-	-	-
Orge								
≤ 6,0	24	2 – 3	0	28	≤ 15	80	G1	43
6,0 – 7,0	72	3 – 4	31	10	> 15	16	G2	26
> 7,0	4	4 – 5	21	16	nd	4	G3	31
-	-	5 – 6	10	25	-	-	-	-
-	-	> 6	38	21	-	-	-	-
Avoine								
≤ 5,8	26	2 – 3	0	16	≤ 15	64	G1	48
5,8 – 7,0	69	3 – 4	0	23	> 15	10	G2	21
> 7,0	5	4 – 5	17	17	nd	25	G3	31
-	-	5 – 6	33	27	-	-	-	-
-	-	> 6	50	17	-	-	-	-

¹ L'intervalle optimal de pH du sol pour le blé et l'orge est de 6,0 à 7,0, tandis qu'il est de 5,8 à 7,0 pour l'avoine (CRAAQ, 2010).

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

³ Le seuil de 15 ppm est utilisé en Ontario pour la culture d'orge et ne sert que pour la présentation des statistiques descriptives (MAAARO, 2017).

⁴ nd : non disponible.

⁵ G1 : sols à texture fine ; G2 : sols à texture moyenne ; G3 : sols à texture grossière.

2.2 Détermination des doses agronomiques optimales

2.2.1 Recherche d'indicateurs de fertilité du sol

Plusieurs variables de sol reconnues dans la littérature scientifique peuvent influencer la réponse des cultures à la fertilisation azotée et ainsi devenir des indicateurs de prédiction de la fertilité. Le potentiel de plusieurs indicateurs à expliquer la réponse à la fertilisation a donc été testé avec le test de Cate-Nelson (1971) : la teneur en nitrate du sol (N-NO_3 ; 0-30 cm) au semis, la teneur en matière organique du sol (MO_{PAF} ; 0-20 cm) et la teneur en argile du sol (0-20 cm). Lorsque possible, ces indicateurs ont été également testés à l'intérieur des groupes de textures G1, G2 et G3. Pour alléger la présentation des résultats, seuls les tests dont la valeur de P est inférieure à 0,12 sont présentés (Tableau 19). 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 de réponse agronomique.

Les potentiels indicateurs de fertilité du sol, les seuils de réponse à la fertilisation azotée, ainsi que les paramètres statistiques des tests de Cate-Nelson sont présentés au Tableau 19. Pour les trois cultures, les teneurs en MO_{PAF} et en N-NO_3 du sol se sont avérées être les principaux indicateurs potentiels de prédiction de la fertilité. Dans l'avoine, le rapport C/N du sol a également été un bon indicateur potentiel. Dans le blé, dans les sols G1, un seuil de réponse de 3,8 % de MO_{PAF} a été retenu (Tableau 19). La considération de ce seuil critique a permis d'obtenir des classes de fertilité homogènes et représentatives du patron de distribution des rendements relatifs en fonction de la matière organique du sol.

Dans l'avoine, aucun seuil de MO_{PAF} n'a pas pu être déterminé pour les sols G1 ni pour l'ensemble des données (G1, G2, G3). En effet, les sols du groupe G1 avaient tous des teneurs en MO_{PAF} supérieures à 4 %, contrairement aux sols des groupes G2 et G3 qui avaient des teneurs en MO_{PAF} majoritairement inférieures à 5 %. Cela a rendu impossible la distinction des effets de la teneur en MO_{PAF} et du groupe de textures du sol sur le rendement. De plus, la réponse à la fertilisation azotée différait si l'avoine était de type couverte ou nue. Par conséquent, pour l'indicateur retenu (teneur en MO_{PAF} du sol), le test de Cate-Nelson a été effectué séparément par type d'avoine. Contrairement à l'avoine couverte, aucun seuil significatif n'a été obtenu pour l'avoine nue en raison de la réponse de ce type d'avoine à tous les sites testés.

Tableau 19. Valeurs critiques des indicateurs de sol significatifs selon les tests de Cate-Nelson pour les essais N du blé, de l'orge et de l'avoine

Indicateur de sol	Groupes de textures ⁴	Valeur critique	RRel ⁵ (%)	Sensitivité	Spécificité	p ⁶
Blé de printemps						
N-NO ₃ au semis (ppm ; 0-30 cm)	G1, G2, G3	10,9	79	0,26	0,85	0,076 t
	G2, G3	26,6	79	0,15	0,97	0,022 *
	G1, G2	11,9	83	0,20	0,96	< 0,001 **
	G1	11,2	70	0,26	0,90	0,028 *
	G2	10,5	78	0,31	0,96	< 0,001 ***
	G3	20,9	69	1,00	0,92	< 0,001 ***
Matière organique (%) ⁵	G1, G2, G3	3,37	70	0,88	0,43	< 0,001 ***
	G1	3,84	70	1,00	0,61	< 0,001 ***
	G3	4,69	69	1,00	0,78	< 0,001 ***
Orge						
N-NO ₃ au semis (ppm ; 0-30 cm)	G1, G2, G3	19,35	80	0,27	0,98	< 0,001 ***
	G2, G3	11,60	79	0,56	0,96	< 0,001 ***
	G1, G2	17,95	82	0,20	0,94	0,003 **
	G1	17,50	81	0,25	0,90	0,029 *
	G2	8,36	79	0,75	0,92	< 0,001 ***
	G3	14,20	76	0,75	1,00	< 0,001 ***
Matière organique (%) ¹	G1, G2, G3	5,73	82	0,45	0,70	0,040 *
	G1	5,02	78	0,80	0,69	< 0,001 ***
	G1, G2	5,76	79	0,50	0,80	< 0,001 ***
	G2, G3	3,00	73	0,86	0,38	< 0,001 ***
Avoine						
N-NO ₃ au semis (ppm ; 0-30 cm)	G1, G2, G3	16,1	77	0,19	0,96	0,002 **
	G1	20,3	76	0,60	1,00	< 0,001 ***
	G2	5,8	81	1,00	1,00	< 0,001 ***
Rapport C/N	G1, G2, G3	11,27	85	0,33	0,93	< 0,001 ***
	G1	15,36	73	1,00	1,00	< 0,001 ***
	G2	13,32	68	0,89	1,00	< 0,001 ***
	G3	11,11	73	1,00	1,00	< 0,001 ***
Matière organique (%) ^{1,2}	G2-G3	4,09	81	0,56	1,00	< 0,001 ***

¹ La matière organique a été déterminée par la méthode par perte au feu.

² Le seuil s'applique à l'avoine couverte uniquement.

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

⁵ RRel : Rendement relatif (100 × rendement du témoin/rendement maximum par bloc).

⁶ *** : P < 0,001 ; ** : P < 0,01 ; * : P < 0,05 ; t : P < 0,12

2.2.2 Effet de la dose d'azote sur le rendement en grains

Comme mentionné dans la section 1.8.2, les ANOVA de l'effet de la fertilisation sur la productivité des cultures ont été effectuées en utilisant les rapports de rendement (ROM) plutôt que les rendements absolus. Les ROM se situant à droite de la ligne rouge (ROM > 1) témoignent d'une augmentation de rendement due à un apport d'engrais, par rapport à une parcelle témoin non fertilisée en N. Inversement, les ROM à gauche de cette ligne (ROM < 1) témoignent d'une diminution de rendement. Comme mentionné précédemment dans la section 1.8.2, des comparaisons multiples des moyennes permettent de sélectionner le meilleur traitement. De plus, en absence de différences significatives entre les traitements, les intervalles de confiances à 90 %

permettent de déterminer si l'augmentation de rendement obtenue pour un traitement donné est numériquement significative en comparaison du témoin.

En premier lieu, une ANOVA a été effectuée sans indicateur de classe de fertilité en considérant l'ensemble des observations (Modèle A). En second lieu, les ANOVA ont été effectuées à l'intérieur des groupes de textures (Modèle B). En dernier lieu, les ANOVA ont été effectuées de part et d'autre des seuils significatifs déterminés par le test de Cate-Nelson (Modèles C et D), lesquels ont été arrondis au dixième afin d'alléger la présentation. Lorsque les données le permettaient, les groupes de textures ont servi à subdiviser les classes afin de préciser les conclusions (Modèles C et D). Seuls les résultats des ANOVA permettant l'interprétation de la réponse de la culture à l'engrais sont présentés dans le présent rapport.

2.2.2.1 Blé de printemps

Les résultats des analyses de variance (ANOVA) des essais N du blé de printemps sont présentés à la Figure 3. Le modèle sans indicateur (A) démontre un effet significatif ($P < 0,0001$) des doses de N sur le ROM et le test de comparaison des moyennes indique que le groupe de doses 80-100 kg N/ha permet l'atteinte des meilleurs rendements. Les intervalles de confiance de ce groupe indiquent que l'apport de ces doses entraîne des gains de rendement de l'ordre de 45 à 65 % (moyenne de 55 %) par rapport au témoin sans fertilisation azotée. De manière générale, ces résultats sont en accord avec de précédentes études ayant démontré la propension du blé de printemps à répondre à l'azote au Québec (Ayoub *et al.*, 1994 ; Miransari et Mackenzie, 2011 ; Tremblay *et al.*, 2011 ; Ziadi *et al.*, 2008), dans le reste du Canada (Bishop et Maceachern, 1971 ; Holzapfel, 2016 ; Subedi *et al.*, 2007) et ailleurs dans le monde (Arregui et Quemada, 2008 ; Bäckman *et al.*, 1997 ; Delin *et al.*, 2005).

L'analyse des résultats par groupe de textures de sols (G1 vs G2-G3) démontre une forte réponse de la culture à l'apport de N dans les deux groupes ($P < 0,0001$; Figure 3B). Dans les sols G1, le test de comparaison des moyennes indique que la dose agronomique optimale se situe dans le groupe de doses 80-100 kg N/ha, tandis qu'il est de 110-120 kg N/ha dans les groupes G2 et G3. De plus, l'analyse des intervalles de confiance des ROM du groupe G2-G3 démontre un gain moyen de rendement potentiel supérieur de 9 % avec l'apport des doses 110 à 120 kg N/ha, qu'avec le groupe inférieur de doses (80-100 N) (55 à 83 %, vs 47 à 73 %). Enfin, les intervalles de confiance démontrent un gain plus grand à fertiliser dans les sols G2-G3 que dans les G1, les bornes inférieures étant plus élevées dans les sols G2-G3.

Les doses optimales pour chaque groupe de doses ont été sélectionnées en fonction de la répartition des données selon les doses et pour chacune des catégories de sol, comme présenté au Tableau 20. Le premier seuil de réponse déterminé par le test de Cate-Nelson pour la teneur en matière organique a servi à préciser la réponse au N dans les sols G1 (Figure 3C). La matière organique du sol peut fournir du nitrate par minéralisation avec plus ou moins d'intensité selon les conditions prévalant au champ. Il est donc attendu qu'un sol mieux pourvu en MO sera en moyenne moins dépendant des apports azotés par fertilisation. Bien que la minéralisation de la MO du sol soit reconnue comme une source de N pour les cultures, il est important de noter que l'intensité de sa minéralisation varie grandement en fonction des types de matières organiques et des caractéristiques du champ (N'Dayegamiye *et al.*, 2007). Ainsi, pour les essais effectués sur un sol en deçà de 3,8 % de MO, la dose agronomique optimale se situait dans le groupe de 110-120 kg N/ha. À l'intérieur de cet intervalle et dans cette catégorie de sol, la seule dose testée était 120 kg N/ha, d'où la considération de cette dernière (Tableau 20).

Dans les sols G2 et G3, aucun indicateur de fertilité n'a permis de préciser la réponse à la fertilisation. À partir des résultats présentés à la Figure 3B, c'est donc la dose de 120 N qui a engendré les meilleurs rendements et qui a été retenue comme VSRF.

Pour terminer, une analyse de l'effet de la fertilisation azotée par type de marché a été également réalisée. Près de 90 % des données validées et utilisées pour l'analyse portaient sur des variétés de blé panifiable contre seulement 10 % pour le blé de provende. L'analyse de l'effet de la dose sur le ROM par type de marché (panifiable vs provende) révèle une dose agronomique optimale de 80 à 100 kg N/ha pour le blé panifiable et de 30 à 60 kg N/ha pour le blé de provende (Figure 3D). Étant donné que les jeux de données sont fortement déséquilibrés, il pourrait s'agir d'un effet confondant lié à des conditions spécifiques aux quatre sites de blé de provende. Une analyse de la caractérisation des quatre sites utilisant le blé de provende montre d'ailleurs que tous les sols sont riches en MO (4,4 %, 4,7 %, 7,3 % et 7,4 %), ce qui n'est pas idéal pour l'obtention d'une réponse marquée à la fertilisation azotée. La considération des intervalles de confiance montre que malgré l'existence de différences statistiquement non significatives, le groupe de doses 80-100 kg N/ha peut permettre d'obtenir un gain de rendement d'environ 10 % supérieur à celui de l'intervalle précédent. Cet aspect du jeu de données ne permet donc pas de conclure avec beaucoup de précision sur des doses agronomiques optimales en fonction du marché visé pour le blé de printemps.

Tableau 20. Fréquence de chaque dose selon les groupes de doses dans les catégories de sol retenues

Groupe de doses	Dose (kg N/ha)	Sans indicateur	G2-G3	Sols G1, % de MO _{PAF}	
				≤ 3,8	> 3,8
1-30-60	30	5	2	.	3
	40	41	29	8	4
	50	44	34	4	3
	60	4	.	.	4
2-80-100	80	41	29	8	4
	90	4	.	.	4
	100	41	34	4	3
3-110-120	110	8	2	.	3
	120	45	29	8	8
4-150-160	150	41	34	4	3
	160	46	28	8	7
5-200-210	200	80	61	12	7
	210	8	2	.	3

Pour chaque dose, la fréquence représente le nombre de blocs dans lequel la dose a été testée selon la considération, par le modèle, des indicateurs de fertilité des sols ou des groupes de textures (G2-G3 ; MO dans les G1). Par exemple, la dose 30 kg N/ha a été testée dans 5 blocs, soit 2 blocs G2-G3 et 3 blocs G1 ayant plus de 3,8 % de MO.

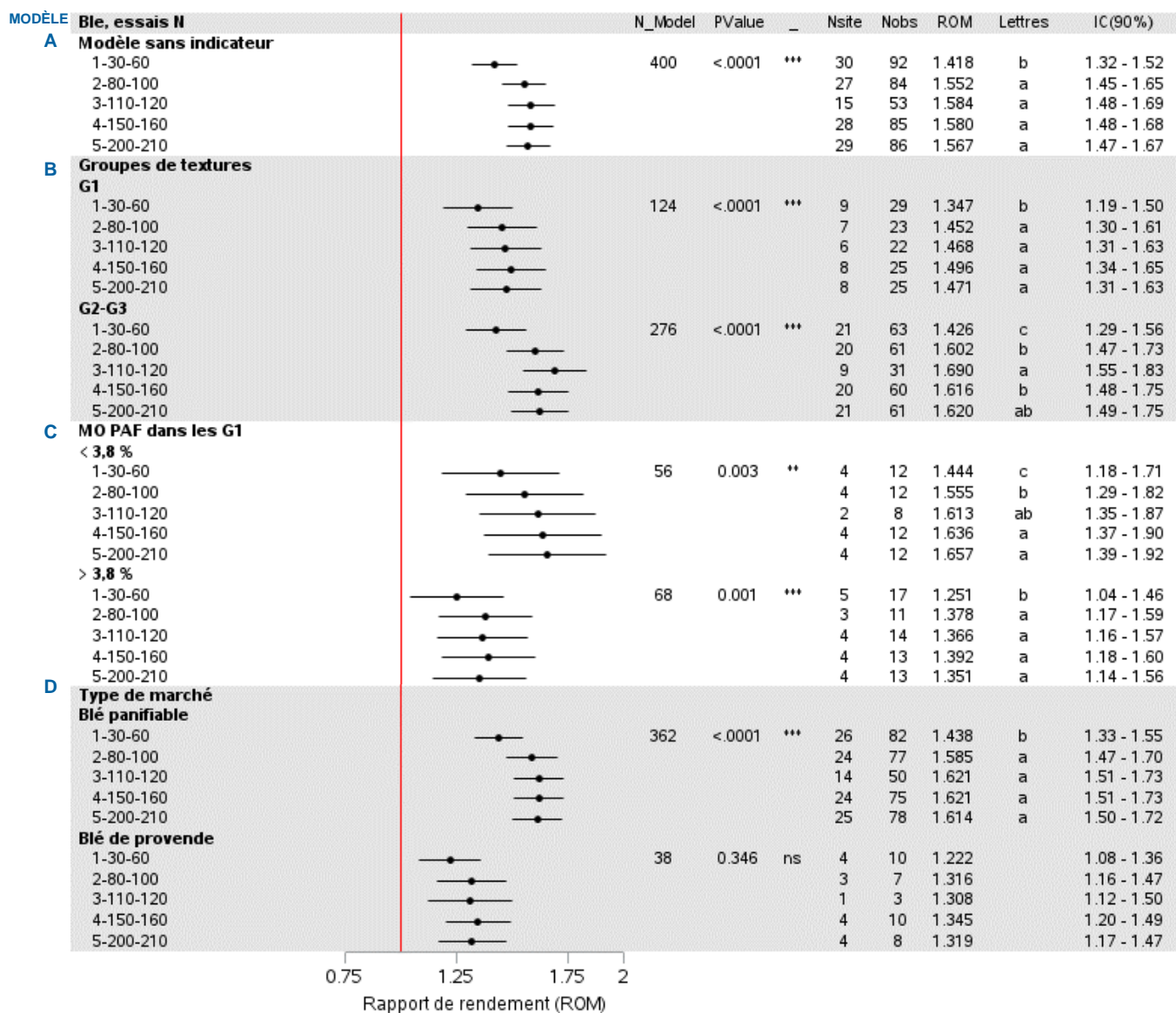


Figure 3. Résultats des analyses de variance sur la réponse du blé de printemps aux doses croissantes d'azote. G1 : sols à texture fine ; G2, sols à texture moyenne ; G3 : sols à texture grossière ; N_model : nombre d'observations du modèle ; Nsite : nombre de sites ; Nobs : nombre d'observations ; ROM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

La potentialité de la teneur en nitrate au semis (0-30 cm) comme indicateur de fertilité du sol a été considérée (Figure 4). Toutes textures confondues, la plus petite dose conduisant aux meilleurs rendements s'est trouvée dans le groupe 80-100 kg N/ha tant sous le seuil de 10,9 ppm N-NO₃ qu'au-delà de ce seuil (Figure 4a). De plus, la Figure 4B montre que pour les sols G2-G3 ayant une concentration en N-NO₃ inférieure à 26,6 ppm, le groupe de doses 110-120 kg N/ha permet d'obtenir de meilleurs rendements. Ainsi, il apparaît probable qu'une recommandation dans le groupe de doses 80-100 kg N/ha au-dessus de 10,9 ppm (à partir de résultats du modèle A) soit insuffisante pour les sols des groupes G2 et G3 à faible teneur en N-NO₃, particulièrement les sols ayant entre 10,9 et 26,6 ppm N-NO₃. Pour les sols des groupes de textures G2-G3, au-delà du seuil de

26,6 ppm N-NO₃, les ROM n'étaient pas significativement différents. La fertilisation azotée reste tout de même importante pour cette catégorie de sols, avec une augmentation moyenne des rendements par rapport au témoin supérieure d'au moins 30 % (ROM moyen de 1,34 à 1,54). Ainsi, pour un sol contenant plus de 26,6 ppm N-NO₃, la plus petite dose testée semble suffisante pour l'atteinte des meilleurs rendements.

Le modèle de fertilisation basé sur la teneur des sols en N-NO₃ au semis n'a pas été retenu en faveur du modèle sur la MO_{PAF} du sol, car ce dernier permet d'avoir une grille plus claire et cohérente. Les études de Bélanger *et al.* (1998) dans les provinces de l'Atlantique ont rapporté que le NO₃ au printemps n'est pas approprié pour déterminer les besoins en fertilisants azotés du blé de printemps.

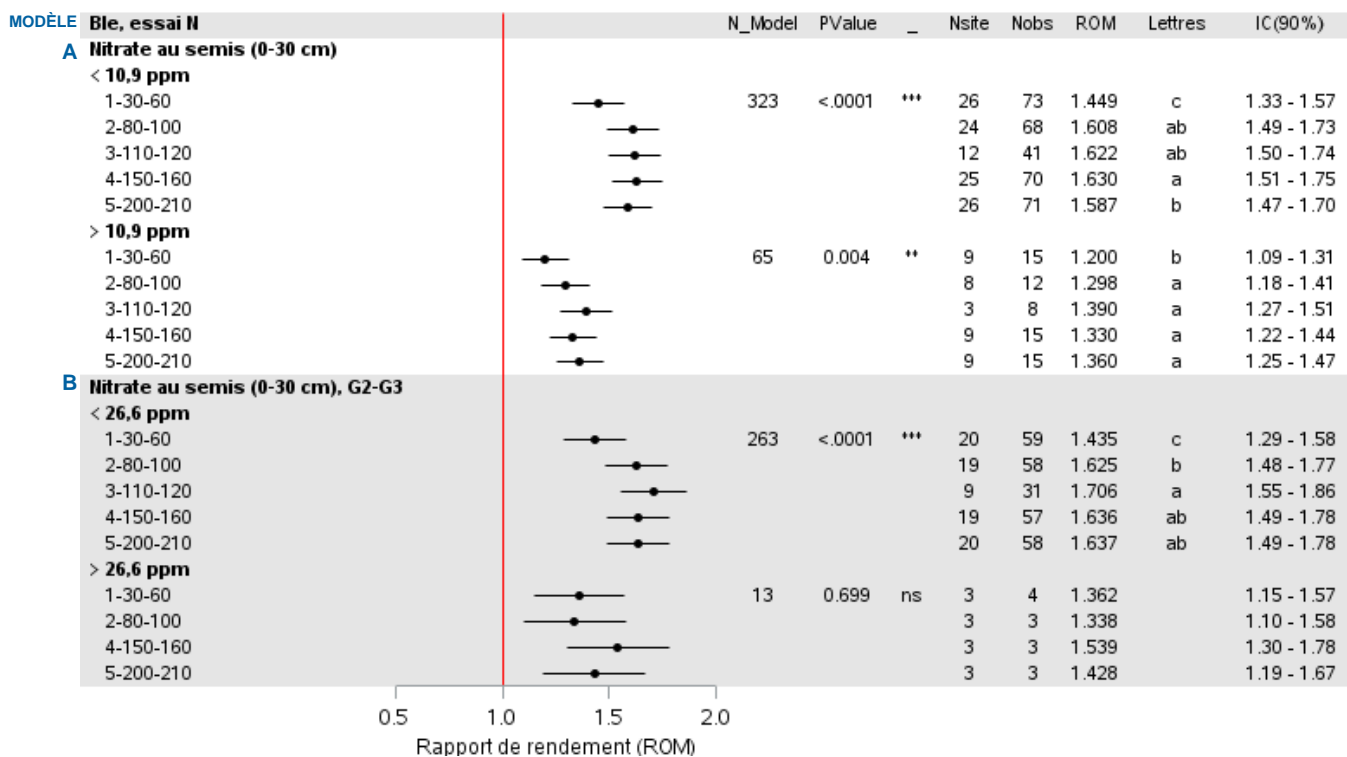


Figure 4. Résultats des analyses de variance sur la réponse de la culture aux doses croissantes d'azote en considérant la teneur en nitrate au printemps (0-30 cm). G1 : sols à texture fine ; G2 : sols à texture moyenne ; G3 : sols à texture grossière ; N_model : nombre d'observations du modèle ; Nsite : nombre de sites ; Nobs : nombre d'observations ; ROM : rapport de rendement (rendement parcelle fertilisée/rendement parcelle témoin) ; IC : Intervalle de confiance ; Les moyennes d'une même catégorie qui ne partagent pas la même lettre sont significativement différentes au seuil $P < 0,12$.

2.2.2.2 Orge

Les résultats des ANOVA des essais N de l'orge sont présentés à la Figure 5. Le modèle sans indicateur (A) démontre un effet très significatif ($P < 0,001$) de la fertilisation azotée sur le ROM avec une dose agronomique optimale de 90 kg N/ha. Les gains de rendements associés à l'application de cette dose ont été de 55 % en moyenne et ont varié entre 39 et 71 %, comme indiqué par les intervalles de confiance. Les travaux de Menkovic

et Goulet (2017) au Québec et ceux de Gilson et Bjarnarson (1958) au Manitoba ont également rapporté une dose optimale équivalente à 90 kg N/ha (soit 80 lb/acre) pour la culture de l'orge.

En analysant les données par groupes de texture de sols (G1 vs G2-G3), le modèle B montre que les sols de textures moyennes à grossières présentent une réponse plus grande à la fertilisation azotée ($P < 0,001$) en comparaison de ceux à textures fines (tendance à $P = 0,056$) (Figure 5B). Ceci traduit de plus faibles besoins en N à combler par fertilisation dans ces derniers. Les doses agronomiques optimales de N sont donc de 60 kg/ha et de 90 kg/ha dans les sols G1 et G2-G3, respectivement. Ces résultats correspondent à ceux de Conry (1997) où la dose agronomique optimale était plus faible dans les sols plus lourds que dans les sols plus légers.

Les modèles C (sols du groupe de textures G1) et D (sols de groupes de textures G2 et G3) de la Figure 5, prennent en considération la teneur en matière organique du sol. Les résultats montrent que dans les sols du groupe de textures G1 (Figure 5C) de moins de 5,0 % de MO, la dose agronomique optimale est de 90 kg N/ha. Les gains de rendement associés à l'application de cette dose sont considérables et varient de 37 à 101 %, avec une moyenne de 69 %. Au-delà de ce seuil de 5,0 %, le rendement optimal est atteint avec un apport de 30 kg N/ha pour un gain de rendement moyen de 25 %. Dans les sols des groupes de textures G2 et G3 (Figure 5D), un plus faible seuil de MO de 3,0 % permet de distinguer deux classes de fertilité. Sous ce seuil, la dose 120 kg N/ha est agronomiquement optimale. Au-delà du seuil, la dose optimale est de 90 kg N/ha. Il est important de souligner que dans les sols G2-G3 ayant moins de 3,0 % de MO, aucun plafond n'a été atteint pour le ROM même avec la dose de 120 kg N/ha ($n = 44$; Figure 5D). L'analyse des courbes de réponse à la fertilisation par site a montré que trois sites sur quatre n'ont pas atteint le niveau de plafonnement des rendements même avec la plus forte dose testée (données non présentées).

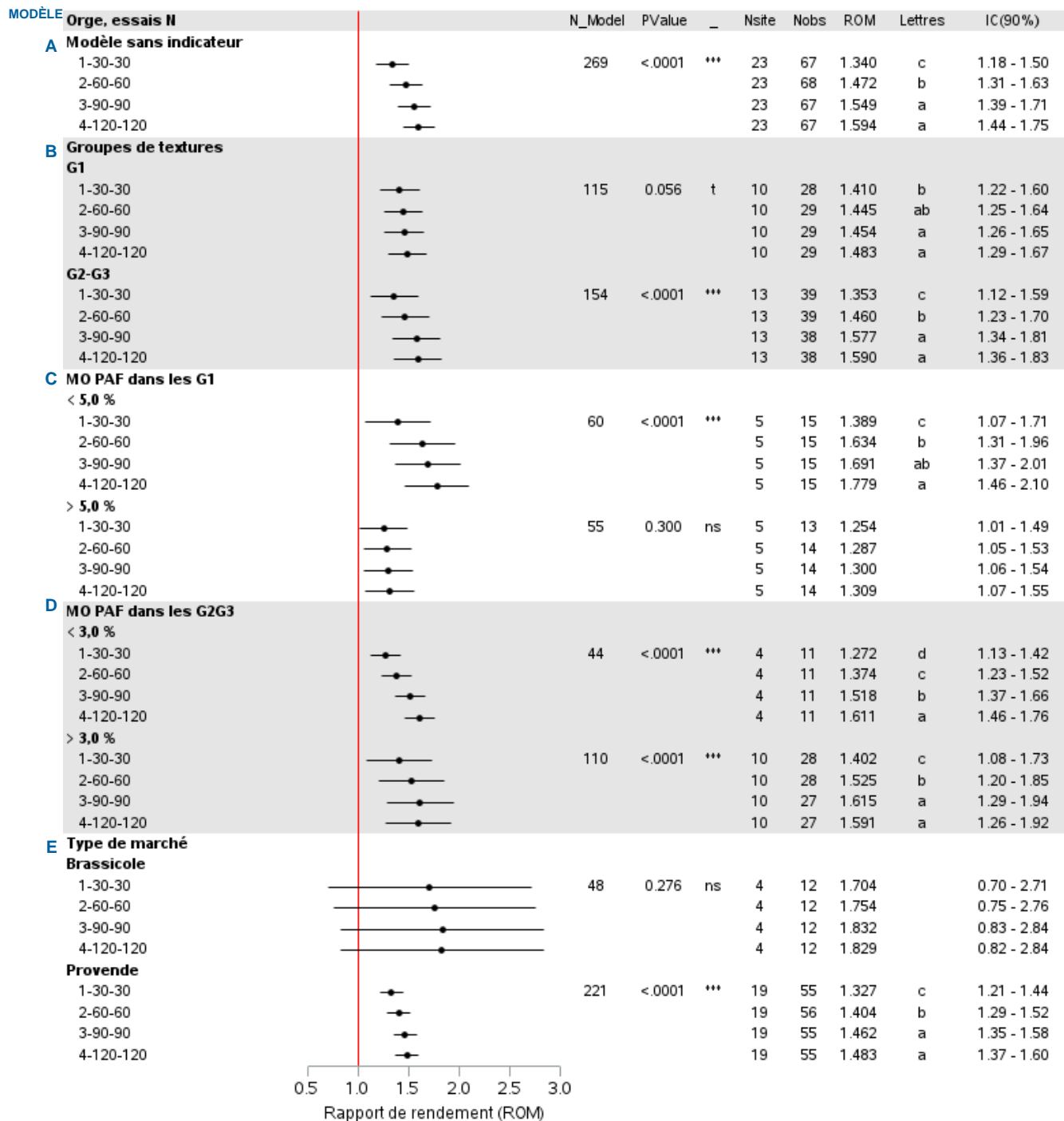


Figure 5. Résultats des analyses de variance sur la réponse de l'orge aux doses croissantes d'azote. G1 : sols à texture fine ; G2 : sols à texture moyenne ; G3 : sols à texture grossière ; N_model : nombre d'observations du modèle ; Nsite : nombre de sites ; Nobs : nombre d'observations ; ROM : rapport de rendement (rendement parcelle fertilisée/rendement parcelle témoin) ; IC : Intervalle de confiance ; Lettres : résultats du test de comparaison des moyennes. La matière organique est déterminée par la méthode par perte au feu.

La réponse de l'orge à la fertilisation azotée a été également analysée en fonction du type de marché (Figure 5E). En effet, les cultivars utilisés, ainsi que la teneur visée en protéines (dans les grains), diffèrent si les grains sont destinés au marché brassicole ou au marché de la provende. Les résultats des analyses statistiques montrent un effet hautement significatif ($P < 0,0001$) de l'apport de doses croissantes de N sur le rendement de l'orge de provende. Pour ce type de marché, un apport de 90 kg N/ha a conduit aux meilleurs rendements.

Dans le cas de l'orge brassicole, le faible nombre d'observations dans le modèle a occasionné une forte variabilité dans la réponse, laquelle empêche la détection d'un effet significatif ($P = 0,276$; $n = 48$; Figure 5E). D'ailleurs, lorsque les sites sont analysés séparément, deux sites sur quatre ont eu une dose agronomique optimale de 90 kg N/ha. Aux autres sites, aucune réponse à l'azote n'a été observée (données non présentées). Ainsi, bien que les traitements soient non statistiquement différents, il est à propos de noter qu'il y a un gain de rendement moyen d'environ 5 % suivant l'application de 60 vs 30 kg N/ha et de 12,8 % entre les doses 90 vs 30 kg N/ha. Une meilleure représentation de ce type d'orge dans les essais aurait ainsi pu rendre significative une partie de ces gains.

2.2.2.3 Avoine

Les résultats des ANOVA des essais N de l'avoine sont présentés à la Figure 6. Dans le modèle sans indicateur (Figure 6A), aucune différence significative n'a été détectée entre les rendements des parcelles fertilisées. Cette absence de réponse est contraire aux résultats attendus, compte tenu des nombreuses études qui ont démontré la grande susceptibilité de l'avoine à répondre aux doses croissantes d'azote (Balkcom *et al.*, 2019 ; Brinkman et Rho, 1984 ; Collins *et al.*, 1990 ; Ma *et al.*, 2017 ; May *et al.*, 2020). Toutefois, il est à noter que les intervalles de confiance des ROM sont strictement supérieurs à 1 et que les apports en N ont permis d'atteindre des gains de rendements variant de 8 à 44 % par rapport au témoin non fertilisé. Cette non-réponse observée pourrait possiblement s'expliquer par la grande variabilité de la réponse entre les sites en raison des différents cultivars et des différents paramètres pédoclimatiques. En effet, les travaux de Ma *et al.* (2017), sur une dizaine de cultivars d'avoine sur trois sites canadiens de climats contrastés, ont également rapporté de grandes différences de rendements en grains selon les sites-années et les cultivars.

Les analyses par groupe de textures de sol ont permis de préciser la réponse de la culture à la fertilisation azotée (Figure 6B). En effet, la réponse de l'avoine à la fertilisation azotée a varié en fonction des groupes de textures de sol. Alors qu'aucune différence significative n'a été observée entre les ROM dans les sols à textures fines (G1, $P = 0,526$), la dose 75 kg N/ha s'est révélée être la dose optimale dans les sols à textures moyennes et grossières (G2-G3, $P < 0,001$).

Une analyse plus approfondie du jeu de données a permis de mettre en lumière que la réponse à l'azote change en fonction du type d'avoine (couverte ou nue ; Figure 6B). Les quatre essais d'avoine nue ont été menés sur des sols à texture grossière uniquement. Ainsi, dans les sols G2-G3, les deux types d'avoine analysés séparément démontrent des réponses à l'azote qui diffèrent grandement. Contrairement à l'avoine couverte pour laquelle aucune différence significative n'a été détectée entre les doses de N ($P = 0,620$), l'avoine nue a présenté une hausse des rendements jusqu'à la dose 100 kg N/ha ($P < 0,0001$). Il est généralement admis que l'avoine nue répond davantage à l'azote que l'avoine couverte (CRAAQ, 2012). De plus, la fertilisation azotée de l'avoine telle que recommandée par Semican (2021) est également en accord avec ces résultats. Toutefois, il convient de

considérer ces résultats avec prudence : l'avoine nue a été testée sur quatre sites d'une même région (Centre-du-Québec), réalisés par le même collaborateur, et sur des sols avec des propriétés très spécifiques (exclusivement des sols G3, MO_{PAF} de 5,1 à 7,2 %). Des essais supplémentaires d'avoine nue, menés dans une plus grande diversité de types de sols et de climats, auraient permis de conclure avec davantage de certitude sur les différences de réponse à la fertilisation entre les deux types d'avoine.

Le dernier modèle indique que la réponse de l'avoine couverte dans les sols G2-G3 varie en fonction de la teneur en matière organique du sol (Figure 6C). Sous le seuil de 4,1 % MO_{PAF} , la dose 75 kg N/ha s'est avérée optimale ($P = 0,003$), entraînant un gain de rendement moyen de 22,4 %, par rapport au témoin non fertilisé. Au-delà du seuil, les ROM moyens sont équivalents entre les doses ($P = 0,200$). Des résultats similaires ont été obtenus dans des études réalisées au Manitoba par Hamill (2002) et Mohr *et al.* (2007), lesquels ont constaté une augmentation des rendements en grains de l'avoine jusqu'à l'application de 80 kg/ha sur des sols de concentrations en N- NO_3 allant de faibles à moyennes (33 à 61 kg/ha sur 0-60 cm de sol). À l'opposé, aucune augmentation de rendement n'a été observée sur les sols riches en N- NO_3 (> 100 kg/ha). Enfin, dans une étude menée sur trois sites canadiens de 3,1 à 5,5 % de MO_{WB} , Ma *et al.* (2017) concluent qu'une dose optimale de 100 kg N/ha permet d'atteindre les meilleurs rendements.

MODÈLE

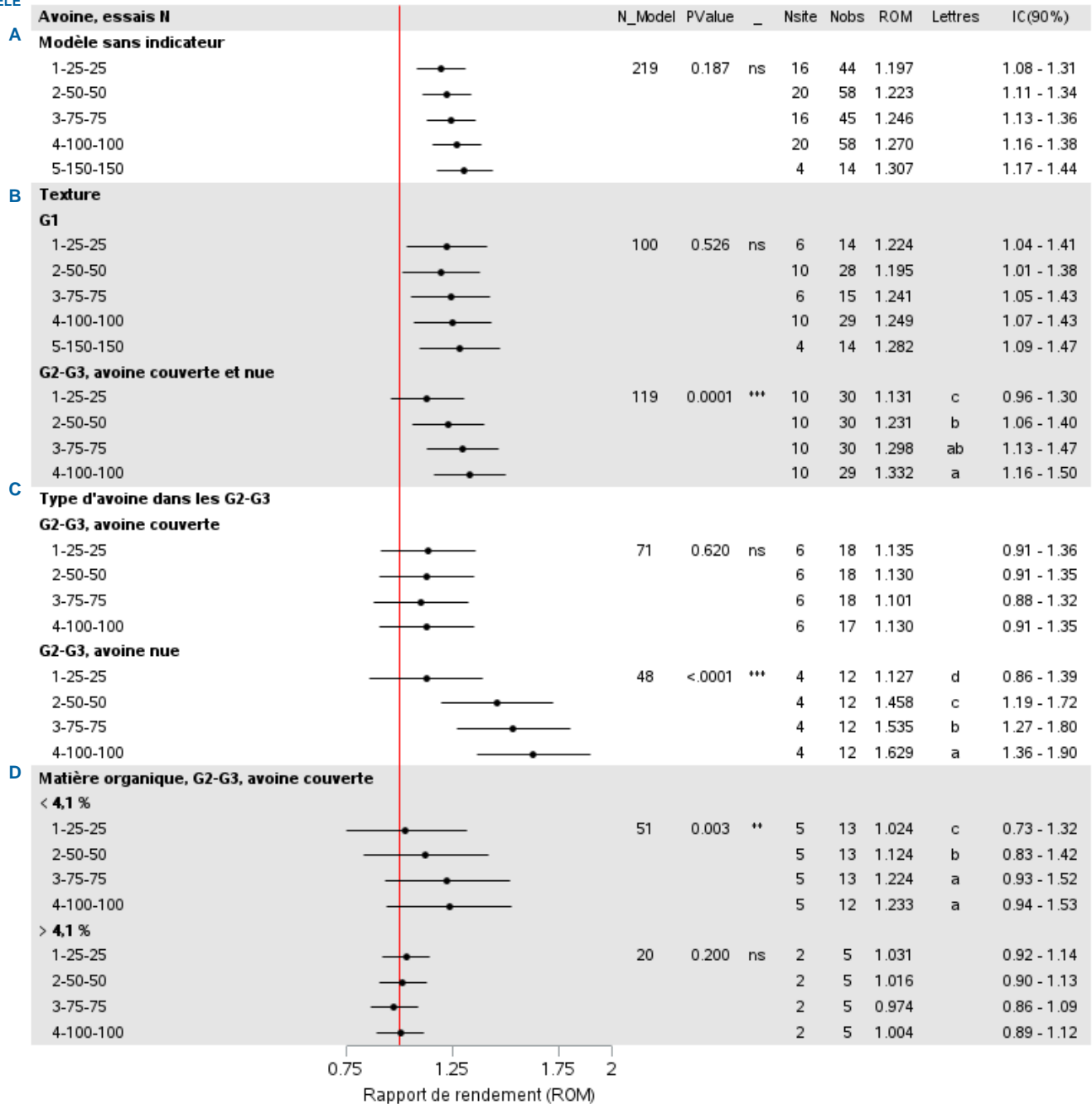


Figure 6. Résultats des analyses de variance sur la réponse de l'avoine aux doses croissantes d'azote.

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

2.2.3 Considération de la verse

La fertilisation azotée est reconnue comme étant l'un des principaux facteurs pouvant entraîner la verse des céréales (Mulder, 1954 ; Pinthus, 1974) en raison d'une croissance accélérée des tiges et par conséquent, un ratio biomasse aérienne : biomasse racinaire déséquilibré (Rajkumara, 2008). Une verse sévère nuit à la qualité des grains en favorisant le développement de maladies et une diminution du poids spécifique et du pourcentage de grains ventrus (Ma *et al.*, 2017 ; May *et al.*, 2004 ; Mohr *et al.*, 2007). Elle réduit la photosynthèse et par conséquent le rendement, en plus de compliquer les opérations à la récolte (CRAAQ, 2012).

Pour l'orge et l'avoine, les analyses de verse ont été effectuées selon les groupes de textures de sols (G1 vs G2-G3) et selon la teneur en MO du sol, afin de mieux interpréter les résultats en regard des différentes classes de fertilité de sols. Cette spécification n'a pas été appliquée pour le blé en raison de la faible fréquence d'apparition de la verse sévère pour cette culture.

Dans le cadre de cette étude, trois cotes (1, 2 et 3) ont été considérées pour l'analyse de la verse. Ces cotes et les correspondances considérées entre les différentes échelles utilisées sont présentées au Tableau 21. La verse sévère (cote 3) correspond à des situations où les plants dans les parcelles étaient complètement couchés au sol au moment de la récolte. Dans la présente étude, les cotes 2 et 3 ont été considérées comme étant problématiques. Dans la culture d'avoine et pour les données provenant d'AAC, le système de cotation belge a été utilisé (Ma *et al.*, 2017). Ce dernier transpose la superficie et la sévérité de la verse en un indice variant entre 0,2 et 9,0 (Oplinger et Wiersma, 1984). Le regroupement des cotes a permis de simplifier l'analyse des données, de réduire le nombre de catégories, de combiner les données du PSEF à celles d'AAC, et, enfin, de considérer l'effet de la verse en contexte de production commerciale.

Tableau 21. Description des échelles d'évaluation de la verse des différents essais et correspondances considérées pour la création d'une échelle uniformisée et simplifiée en vue des analyses

Échelle uniformisée	Échelle du PSEF	Échelle des Réseaux Grandes Cultures du Québec (RGCOQ)	Échelle belge ¹
	Blé : 18 sites Orge : 22 sites Avoine : 16 sites	Blé, AAC : 11 sites Blé, CEROM : 1 site Orge, Semican : 1 site	Avoine, AAC : 1 site
1 : peu ou pas de verse à plat	0 : parcelle non versée. 1 à 6 : tiges et épis mêlés.	0 : pas de verse	0,2
2 : verse modérée (< 50 %)	7 : < 50 % de la parcelle est versée ou à plat.	1-5 : 10-50 % de verse	6
3 : verse sévère (> 50 %)	8-9 : > 50 à 100 % de la parcelle est versée ou à plat.	6-9 : 60-90 % de verse	8

¹ Indice de verse = 0,2 × superficie [1 à 10] × intensité [1 à 5] ; (Oplinger et al., 1984).

2.2.3.1 Blé de printemps

Les proportions de verse dans les essais N du blé de printemps sont présentées dans la Figure 7. En considérant l'ensemble du jeu de données, les analyses de fréquence ont révélé qu'à toutes les doses testées, la probabilité d'avoir une verse faible (cote 1) ou modérée (cote 2) était significativement plus importante que celle d'avoir de la verse sévère (cote 3) ($P < 0,0001$). Les comparaisons entre les parcelles fertilisées et le témoin montrent que la fertilisation azotée augmente significativement les chances d'avoir de la verse. Cependant, le risque de verse étant très faible, même lorsque ce risque est fortement multiplié, la culture reste peu touchée par la verse. Les données analysées séparément par groupe de textures ont démontré que la verse était significativement plus importante à partir de l'apport de 80-100 N dans les sols G1, et à partir de l'apport de 110-120 N dans les sols G2 et G3 (Figure 7), bien que les proportions de parcelles versées sévèrement aient été faibles.

De la verse sévère est survenue à quatre sites validés seulement. De ceux-ci, deux sites ont été faiblement atteints par la verse. En effet, pour le premier site, la verse est survenue en fin de saison à la suite de forts vents sur de la paille très sèche. Les récoltes des parcelles ont donc été découpées de façon à éviter les zones versées, minimisant considérablement les effets sur le rendement. Sur le second site, la verse est survenue en saison (observations à la fin juillet, après le stade critique de l'anthèse qui a eu lieu le 29 juin), mais les plants ont pu se relever. En réalité, seuls les rendements de deux des quatre sites semblent avoir été affectés par la verse, car la réponse à l'azote est moindre qu'attendue. Pour ces sites, la teneur en matière organique du sol était de 3,4 à 3,9 % et la verse a été observée dans les parcelles ayant reçu les doses allant de 90 à 200 kg N/ha. Il n'a pas été possible de déterminer si la verse est apparue avant ou après le stade critique de l'anthèse à ces deux sites. L'exploration de la base de données a permis de déterminer deux principaux facteurs qui pourraient expliquer l'apparition de la verse sévère, soit la région et les variétés. D'abord, trois des quatre sites versés sévèrement se situent dans la région de la Montérégie faisant partie de la zone 1 (plaine de Montréal) de la carte de zonage agro-climatique du CRAAQ (RGCOQ, 2019). En effet, selon les rapports des Réseaux Grandes Cultures du Québec (RGCOQ), la zone 1 enregistre des cotes de verse plus élevées en comparaison des deux autres (RGCOQ, 2019).

D'autre part, les cultivars utilisés (Major, AC Barrie et Nass) sont ceux présentant des indices de sensibilité à la verse parmi les plus élevés. Toutefois, les cotes de verse rapportées par les RGCQ pour la région et les variétés en question ont été plus faibles que celles mesurées dans le cadre de cette étude.

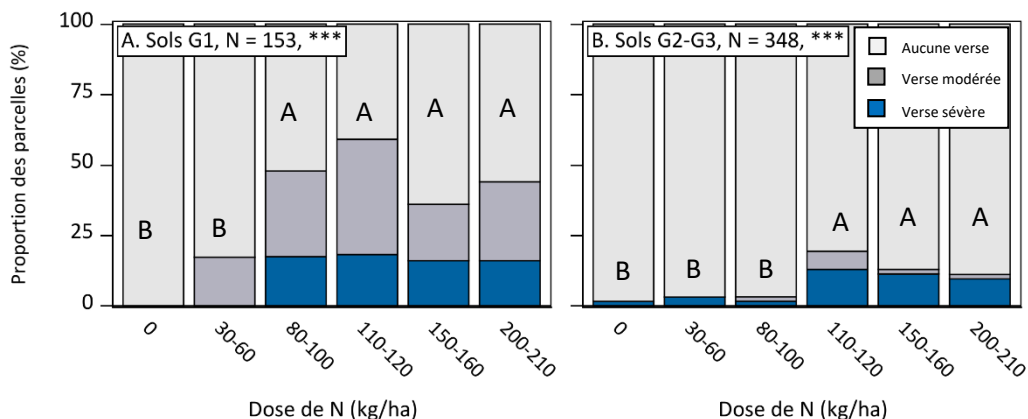


Figure 7. Proportion de verse dans les essais N du blé de printemps. En gris pâle (1) : aucune verse, cote 0 des Réseaux Grandes cultures du Québec (RGCQ) ; en gris foncé (2) : verse modérée, cotes 1-5 des RGCQ (partielle quant à la superficie versée ou les plants ne sont pas complètement à l'horizontale) ; en bleu (3) : verse sévère où les plants sont à l'horizontale, cotes 6-9 des RGCQ. N : Nombre d'observations dans le modèle, *** : $P < 0,001$. Les lettres indiquent les différences entre les traitements, déterminées par l'analyse des rapports de cotes.

2.2.3.2 Orge

L'orge est une culture sensible à la verse en raison de sa tige peu rigide et flexible qui tend à casser ou à se plier dans la partie supérieure du plant (Berry *et al.*, 2006). Des facteurs morphologiques relatifs aux cultivars influencent cette sensibilité (Baker *et al.*, 1990 ; Brady, 1934). Afin de mieux interpréter les résultats, les analyses de la verse ont été effectuées selon les groupes de textures et les seuils de MO retenus dans la section précédente (soit 5,0 % dans les G1 et 3,0 % dans les G2-G3).

Comme illustré à la Figure 8, dans les deux groupes de textures de sols (G1 et G2-G3), une augmentation de l'intensité de la verse a été observée avec l'augmentation des doses de N ($P < 0,001$). Ces résultats sont cohérents avec ceux des analyses de variance (voir section 2.2.2.2) selon lesquelles la dose optimale serait plus élevée dans les sols de texture moyenne à légère que dans les sols lourds. En effet, dans les sols G1, l'intensité de la verse a augmenté significativement par rapport au témoin sans engrais à partir de la dose 60 N, tandis que dans les sols des groupes G2 et G3, la dose provoquant la verse plus intense passe à 90 kg N/ha. Un plus grand pourcentage de verse sévère a également été observé dans les sols G1 (21,5 %) comparativement aux sols G2 et G3 (5 %). Les études de Conry (1984-1985) ont également rapporté une plus forte occurrence de la verse de l'orge en sol lourd qu'en sol léger. Cette plus grande probabilité de verse dans les sols lourds a été attribuée à l'obtention de plus hauts rendements dans ces derniers. Toutefois, contrairement à ce qui a été observé par Conry, des rendements similaires ont été obtenus pour les deux types de sols de la présente étude. La plus grande occurrence de la verse dans les sols G1 pourrait s'expliquer également par leur réserve en matière organique (MO) généralement plus élevée entraînant un apport plus constant en N par minéralisation en cours de saison (N'Dayegamiye *et al.*,

2007). AHDB (2005) a également rapporté que dans les sols mieux pourvus en MO, la minéralisation a pu rendre disponible davantage de N qui, additionné aux apports par fertilisation, a rendu les plants plus à risque de verse. Outre la possibilité d'avoir un plus grand apport en N provenant de la minéralisation en MO du sol, la concentration en N-NO₃ mesurée au printemps était supérieure dans les sols G1 (9,43 ppm) comparativement aux sols G2 et G3 (5,89 ppm). En ce qui a trait à la variété, celles ayant subi de la verse sont les suivantes : Alyssa, Bentley, Champion, Cyane, Rhéa et Selena.

L'analyse numérique des pourcentages de verse entre les deux classes de richesses en MO des sols G1 montre que pour les doses allant de 60 à 120 kg N/ha, le pourcentage de verse de cote 3 au-dessus du seuil (21-36 % des parcelles) est similaire qu'en dessous (20-33 % des parcelles). Lorsqu'analysé en tenant compte de la richesse en MO, il est observé que dans les sols du groupe G1 de moins de 5,0 % de MO (Figure 8 ; Modèle C ; $P = 0,025$), l'apparition de la verse de cote 3 (verse sévère) se montre significativement différente à partir de l'apport de 60 kg N/ha. Ainsi, ces résultats montrent que de manière générale, l'application des doses agronomiques optimales obtenues pourrait comporter des risques de verse. De ce fait, l'évaluation du niveau de risque de verse pour le champ mis en culture par l'agronome s'avère nécessaire quant à l'application de la dose agronomique optimale. Au-dessus du seuil, une différence significative est observée à partir de la dose de 90 kg N/ha. L'augmentation du risque de verse à partir d'une plus forte dose de N au-dessus du seuil qu'en dessous est contradictoire et pourraient s'expliquer par le fait qu'en raison de sa nature qualitative, l'évaluation de la verse peut être sujette à la subjectivité de l'observateur. Il est aussi important de noter que les pourcentages de verse restent plus élevés au-dessus du seuil qu'en dessous pour la dose de 90 kg N/ha (Figure 8).

Dans les sols des groupes G2 et G3 dont la teneur en MO se trouve en dessous du seuil de 3,0 %, aucun effet de la fertilisation n'a été observé sur l'intensité de la verse (Figure 8 ; Modèle D ; $P = 0,3478$). À l'opposé, une différence significative a été détectée pour la dose de 120 N dans les sols ayant une teneur en MO au-delà du seuil. Ces observations correspondent aux résultats des analyses de variance (Figure 5D) montrant que dans les sols G2-G3, les doses agronomiques optimales sont de 120 N et de 90 N respectivement de part et d'autre du seuil. Il faut souligner que dans les sols G2 et G3, la verse sévère est survenue en grande partie dans la région de la Montérégie où les cultivars sont plus sensibles à la verse en raison du climat (RGCCQ, 2017).

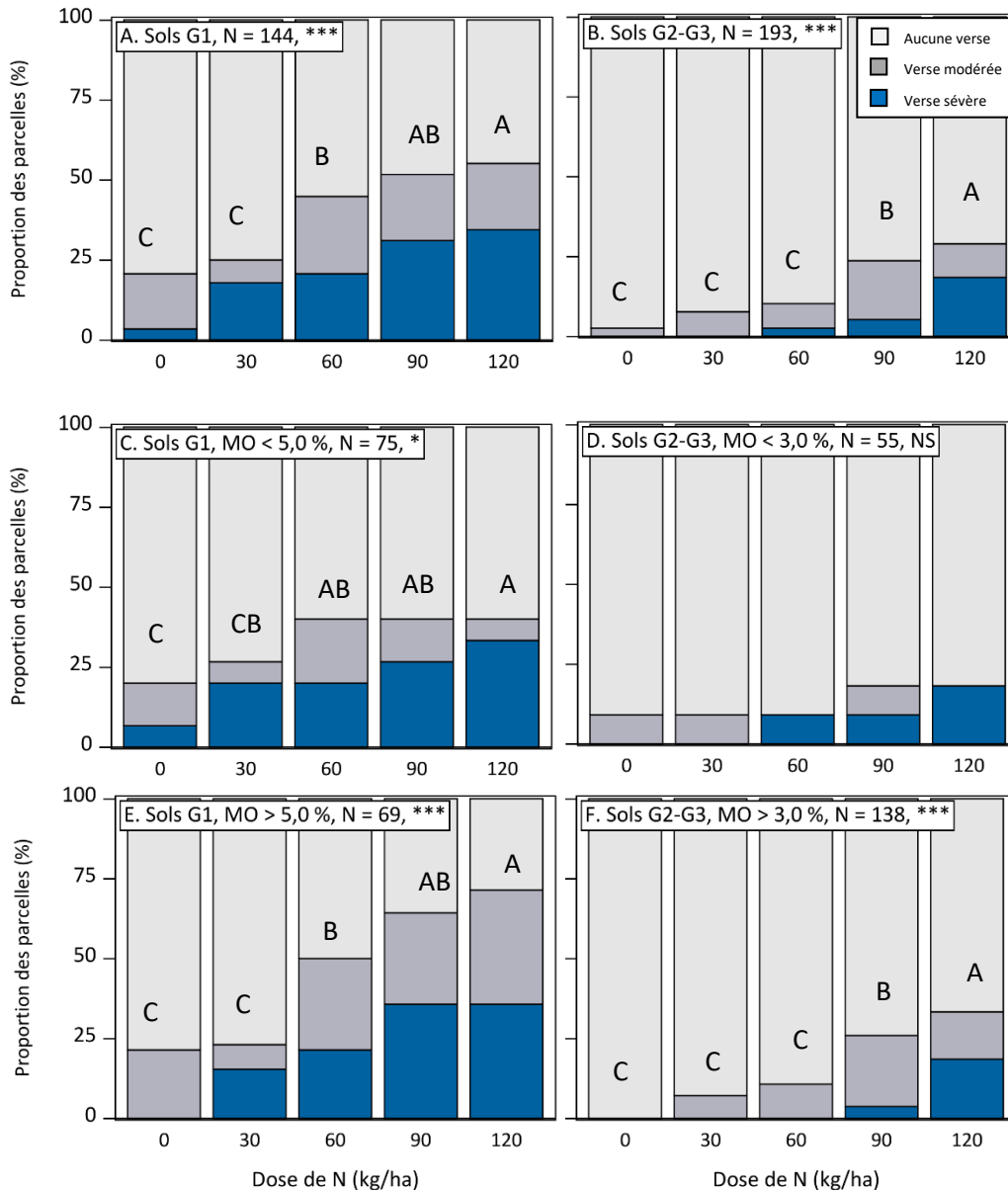


Figure 8. Proportion de verse dans les essais N de l'orge en fonction des doses de N. G1 : sols de texture fine ; G2-G3 : sols de texture moyenne et grossière ; MO : seuil de matière organique ; N = nombre d'observations dans le modèle. Les lettres indiquent les différences entre les traitements, déterminées par l'analyse des rapports de cotes. Les résultats sont présentés considérant les classes de fertilités retenues pour les VSRF. *** : $P < 0,001$; ** : $P < 0,01$; * : $P < 0,05$; t : $P < 0,12$

2.2.3.3 Avoine

Comparativement aux autres cultures, certaines particularités ont été considérées lors de l'analyse des données des essais d'avoine. D'une part, dans les sols G1, les données ont été analysées séparément en fonction de leurs sources en raison des différentes tendances observées entre les chercheurs (Figure 9A et B). Ensuite, dans les sols G2 et G3, les analyses ont été effectuées séparément en fonction du type d'avoine (nue vs couverte). En

effet, l'avoine nue est réputée pour avoir une meilleure résistance à la verse que l'avoine couverte (CRAAQ, 2012). De plus, les analyses de variance dans les sols G2 et G3 montrent que ces deux types d'avoine répondent différemment à la fertilisation en N (voir section 2.2.2.3). Le type d'avoine n'a pas été considéré dans les sols G1 en raison du fait que tous les essais d'avoine nue ont été établis sur des sols de textures moyennes à légères (G2-G3).

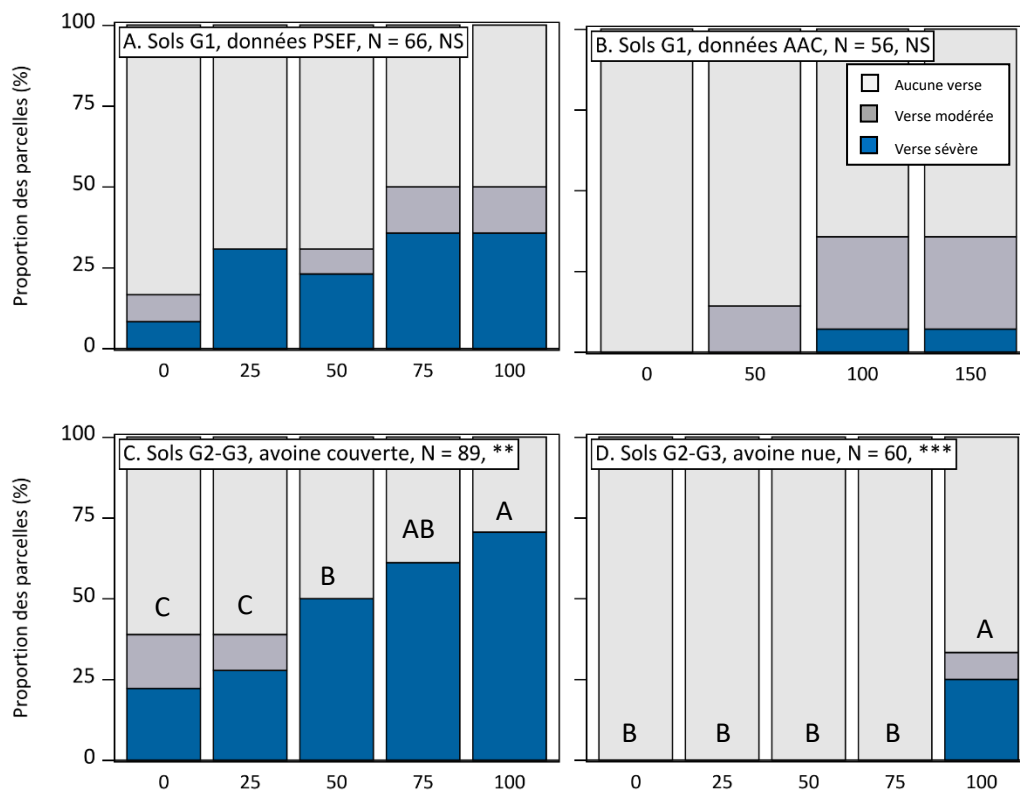
Les proportions de verse dans les essais N et les résultats des analyses statistiques sont présentés à la Figure 9. Dans les sols du groupe G1, l'effet de la dose de N sur l'occurrence de la verse a été non significatif ($P = 0,217$ et $P = 0,338$; Figure 9A et B). Toutefois, des augmentations numériques sont observables pour les fortes doses (75 et 100 kg N/ha), particulièrement dans les sites du PSEF (Figure 9A). À l'opposé, dans les sols des groupes G2 et G3, l'effet de la dose sur l'occurrence de la verse a été significatif, tous types d'avoine confondus ($P = 0,007$, données non présentées). L'analyse séparée par type d'avoine a permis d'observer que l'avoine couverte a été beaucoup plus sensible à la verse que l'avoine nue. En effet, la verse de l'avoine couverte était significativement plus importante dès l'apport de 50 kg N/ha ($P = 0,015$; Figure 9C), ce après quoi elle a continué d'augmenter. L'avoine nue cultivée dans les sols G2 et G3 uniquement, quant à elle, a montré un risque de verse plus élevé uniquement suivant l'apport de la plus forte dose (100 kg N/ha ; $P < 0,001$; Figure 9D), traduisant une plus grande résistance. Plusieurs études qui ont rapporté une augmentation de la verse dans l'avoine à la suite de l'application de doses croissantes de N. May *et al.* (2004) et Mohr *et al.* (2007) ont rapporté une réponse linéaire à la verse à mesure que les apports en N augmentent. Aidoo (2017) a observé des augmentations linéaires ou quadratiques de la verse liées aux apports en N. Finalement, dans les sols des groupes G2 et G3 où de l'avoine couverte a été cultivée, les analyses de variance ont révélé que les sols de moins de 4,1 % de MO_{PAF} (Figure 9E) étaient sujets à davantage de verse dès l'application de la dose 50 N, bien que l'apport de 75 N ait mené aux meilleurs rendements (section 2.2.2.3). Ces deux traitements n'ont pas différencié statistiquement quant à l'occurrence de la verse. Or, une augmentation numérique était observable (38 vs 54 % des parcelles versées sévèrement). Ainsi, dans les cas où le choix du cultivar et l'historique du champ le justifient, l'apport de 50 N pourrait être favorisé afin de minimiser le risque. Au-delà du seuil de 4,1 % de MO_{PAF} pour ces mêmes sols (Figure 9F), la dose de N n'a pas affecté la verse, qui est survenue dans plus de 50 % des parcelles, à toutes les doses testées incluant le témoin.

De manière générale et sans considération des doses appliquées, une plus grande proportion de verse sévère (cote 3) a été observée dans les sols G1, en comparaison aux sols G2-G3. Cela pourrait s'expliquer par le fait que dans la présente étude, les sols G1 sont plus riches en matière organique que les sols G2-G3. En effet, il est important de rappeler que les teneurs en MO_{PAF} des sols G1 dans le cadre de cette étude ont toutes été supérieures à 4 %. En revanche, un peu plus du tiers des essais en sols G2-G3 ont eu moins de 4 % de MO_{PAF} . Une teneur plus élevée en matière organique du sol peut induire de plus grands apports azotés fournis par la minéralisation au courant de la saison qui, additionnés aux apports par la fertilisation, peuvent entraîner un plus grand risque de verse (AHDB, 2005 ; Berry *et al.*, 2004). Outre la possibilité d'avoir un plus grand apport en N provenant de la minéralisation en matière organique du sol, le plus grand risque de verse peut également être attribuable à la plus grande capacité des sols argileux à retenir le nitrate par rapport aux sols sableux (Gaines et Gaines, 1994).

Bien que les analyses statistiques ne détectent pas d'effet la dose de N sur l'occurrence de la verse dans les sols G1, celle-ci est numériquement plus importante que dans les parcelles témoins à partir de la dose de 25 kg

N/ha. Cette observation s'accorde avec les résultats de la section 2.2.2.3, suggérant que l'apport de 25 N mène au rendement optimal (sols de plus de 4 % de MO_{PAF}). Dans les sols G2 et G3 (avoine couverte), l'occurrence de la verse augmente dès les apports de 50 et 75 kg N/ha, en accord avec les résultats de la section 2.2.2.3 selon lesquels les doses agronomiques optimales varient de 25 à 75 kg N/ha selon la classe de fertilité du sol. Ces résultats suggèrent qu'il est prudent et approprié de considérer séparément l'avoine couverte dans les sols G2 et G3. En effet, les résultats de l'analyse des données sans tenir compte de la teneur en MO du sol suggèrent un apport agronomique optimal de 75 kg N/ha. La considération des avoines couvertes uniquement et d'un seuil de MO_{PAF} a permis de diminuer le risque de verse, en ne recommandant l'apport de 75 kg N/ha que dans les sols de moins de 4,1 % de MO_{PAF}. Dans les sols ayant une teneur en MO au-delà de ce seuil, l'apport de 25 kg N/ha sera suffisant pour l'obtention de bons rendements et contribuera à diminuer le risque de verse.

Enfin, contrairement à ce qui est observé pour les données du PSEF, l'analyse des données d'AAC n'a démontré aucune différence entre les différentes doses de N et le témoin pour la fréquence de la verse sévère. Le pourcentage de parcelles versées sévèrement pour la dose de 100 était faible (7 %) en comparaison du témoin (0 %) et au même traitement dans les essais du PSEF (40 %). La plus faible occurrence de verse observée dans les deux sites d'AAC pourrait être attribuable à une période de sécheresse survenue au mois de juillet en 2013 (Ma *et al.*, 2017) et au climat frais de la région. L'analyse des données a montré également que l'apparition de la verse pourrait aussi être liée à un effet de sites et de variétés (données non présentées), ce qui est cohérent avec les rapports du RGCQ, lesquels mentionnent des indices de tolérance à la verse variant en fonction de la région et de la variété.



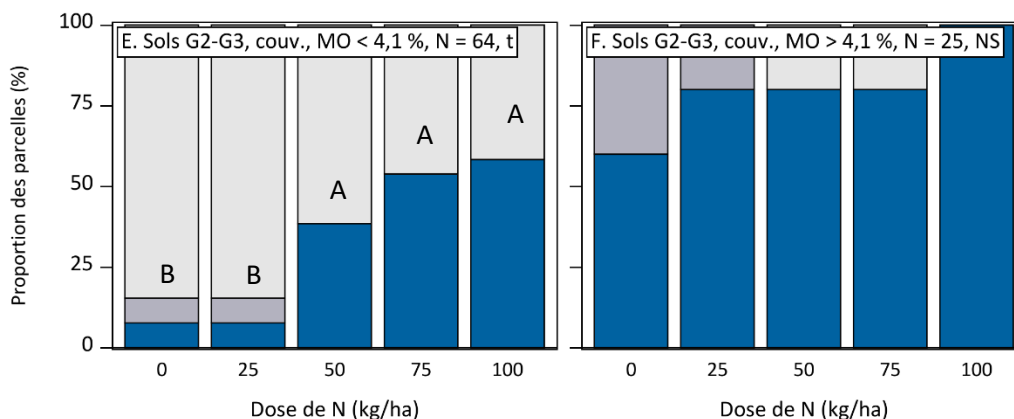


Figure 9. Proportion de verse dans les essais N de l’avoine en fonction des doses de N, des groupes de textures de sols, des sites et des sources de données. G1 : sols à texture fine ; G2 : sols à texture moyenne ; G3 : sols à texture grossière ; *P* = niveau de signification du modèle ; N = nombre d’observations dans le modèle. Les lettres indiquent les différences entre les traitements, déterminées par l’analyse des rapports de cotes. Couv. : avoine couverte.

2.2.4 Critères d’évaluation de la qualité des grains

La qualité des grains des céréales représente un facteur déterminant au moment de la vente des récoltes et selon le type de marché auquel les grains sont destinés, les critères de qualité requis peuvent varier. Dans le cadre de cette étude, l’effet de la fertilisation azotée sur la teneur en protéines et le poids spécifique des grains ont été analysés. Comme dans l’étude de l’apport de N sur les rendements, ces analyses ont été réalisées séparément pour chaque culture, selon le groupe de textures de sol. Par la suite, lorsque nécessaire, les moyennes obtenues ont été comparées aux valeurs seuils considérées actuellement sur le marché pour la classification des grains.

2.2.4.1 Teneur en protéines

Blé de printemps

La teneur en protéines du blé panifiable est l’un des critères pris en compte dans l’évaluation de la qualité des grains (Fowler *et al.*, 1990 ; Weegels *et al.*, 1996). Au Québec, il est généralement visé que la teneur minimale en protéines soit de 12,5 % pour le blé panifiable (A. Vanasse, communication personnelle, 2020). Bien que la qualité des protéines (ex. contenu en gluténine) soit largement dépendante du cultivar, la quantité de protéines, quant à elle, est en partie attribuable aux conditions de croissance de la plante comme la disponibilité du N du sol ou la fertilisation azotée (Dupont *et al.*, 2006 ; Fowler, 2003).

Dans le cadre de cette étude, l’analyse de l’effet de la dose de N sur la teneur en protéines a été effectuée selon le marché visé (Figure 10A) et sur le blé panifiable en fonction des groupes de textures de sol (Figure 10B). Les teneurs en protéines des grains de blé panifiable ont varié de 12,3 à 16,3 % et de 12,4 à 16,4 % dans les groupes respectifs G1 et G2-G3, et ces teneurs ont augmenté significativement avec l’application des doses croissantes de N ($P < 0,0001$). Les résultats du test de comparaison de moyennes montrent que la dose permettant

l'obtention d'un taux maximal de protéines varie en fonction du groupe de textures du sol. En effet, en sols lourds, la teneur en protéines a atteint la valeur maximale de 16,2 % avec le groupe de doses 150-160 kg N/ha (Figure 10). Dans les sols plus légers, le groupe de doses 200-210 kg N/ha a permis d'obtenir une teneur en protéines maximale équivalente à 16,4 %. Ces résultats concordent avec ceux des ANOVA de l'effet des doses sur le rendement (section 2.2.2.3) qui ont montré qu'une plus grande quantité de N est nécessaire en sol G2-G3 qu'en sol G1. Dans tous les cas, un apport de fertilisant minimal a permis d'obtenir la teneur minimale visée de 12,5 % de protéines.

La variété a influencé la teneur en protéines ($P = 0,0003$) et l'effet de la dose a varié en fonction de la variété considérée ($P < 0,0001$). Le choix de la variété et la fertilisation en N constituent ainsi des stratégies efficaces pour moduler la teneur en protéines. Une étude de Häner et Brabant (2016) en Suisse a montré que la fertilisation en N et la variété influencent respectivement 32 % et 33 % de la variation de la teneur en protéines du blé d'automne.

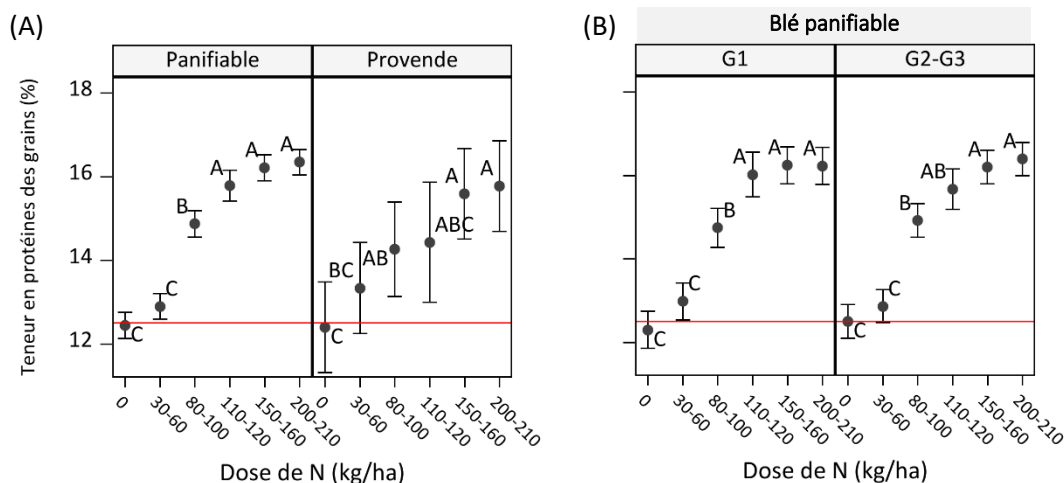


Figure 10. Effet de la dose sur la teneur en protéines du blé selon (A) le type de marché et (B) le groupe de textures. Valeurs estimées présentées avec les erreurs types et les résultats du test de comparaison de moyennes LSD à 0,05. Le trait rouge marque la valeur minimale de 12,5 % généralement visée dans le blé panifiable. Les points avec une même lettre ne sont pas significativement différents pour un même groupe de textures. Les teneurs en protéines sont rapportées sur une base de 13,5 % d'humidité.

Orge

Contrairement au blé, la teneur en protéines visée doit préférablement être sous 12,5 % au Québec pour l'orge brassicole (Goulet, J., communication personnelle, 2020). En effet, une plus faible teneur en protéines permettrait d'augmenter le taux d'extraction de malt et de diminuer sa concentration en enzymes telles que l'alpha-amylase (Izydorczyk et McMillan, 2020).

Dans le cadre de ces essais, les teneurs en protéines de l'orge ont varié en moyenne de 10,4 à 14,0 % pour l'orge brassicole et de 11,0 à 13,7 % pour l'orge de provende (Figure 11A). Peu importe le type de marché, l'augmentation de la dose de N augmentait significativement la teneur en protéines ($P < 0,001$). Pour l'orge brassicole, les résultats montrent une augmentation significative à partir de la dose de 90 kg N/ha. Toutefois, pour cette dose de N, la concentration en protéines des grains est restée en moyenne en dessous de la valeur

maximale de 12,5 %. Le dépassement du seuil n'a été observé qu'à partir de l'application d'une dose de 120 kg N/ha. Dans les marchés de provende, la contrainte de la protéine est inexistante. Pour ce type de marché, la plus forte teneur en protéines a été obtenue avec la dose de 120 kg N/ha.

En tenant compte des groupes de textures de sols, les teneurs en protéines variaient de 10,3 à 11,9 % et de 9,8 à 13,5 % dans les groupes respectifs G1 et G2-G3 (Figure 11B). La teneur en protéines était significativement plus élevée que celle du témoin à partir de la dose de 90 kg N/ha dans les sols G1. Dans ces sols, aucune des doses appliquées n'a engendré de dépassement de la valeur seuil de 12,5 %. Dans les sols G2 et G3 en revanche, le seuil a été atteint dès l'application de 90 kg N/ha. Les résultats des tests de comparaison de moyennes montrent également que la dose de 90 kg N/ha a augmenté significativement la teneur en protéines des grains comparativement à la dose 60 kg N/ha (Figure 11B). Ces résultats suggèrent donc que dans les deux types de sols (G1 et G2-G3) la dose de N pourrait être limitée à 60 kg/ha dans la production d'orge brassicole afin de minimiser la teneur en protéines des grains. L'analyse des données n'a toutefois pas permis d'expliquer les plus fortes teneurs en protéines mesurées dans les sols G2-G3 en comparaison aux sols G1. En effet, les rendements en grains moyens obtenus sont similaires dans les deux types de sols (G1 : 4 105 kg/ha ; G2-G3 : 4 127 kg/ha), excluant un effet de dilution.

Bien que non testés dans le cadre des présents essais, d'autres facteurs agronomiques, outre la variété, peuvent influencer la qualité de l'orge brassicole. Conry (1995) a observé que, dans les sols lourds, avec un semis hâtif, l'apport d'une plus grande proportion de N au semis qu'en post-levée influençait favorablement la qualité (faible teneur en protéines) de l'orge brassicole. Des essais réalisés en France démontrent qu'à doses équivalentes, le fractionnement permet l'atteinte de meilleurs rendements sans compromettre la qualité (Comec, 2008).

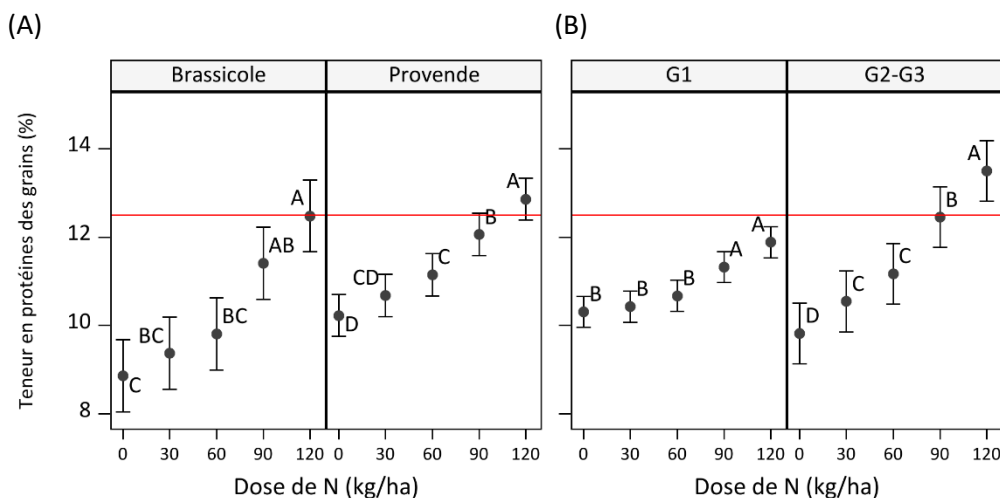


Figure 11. Effet de la dose de N sur la teneur en protéines de l'orge selon (A) le type de marché et (B) les groupes de textures. Les teneurs sont rapportées sur une base de 0 % d'humidité et sont présentées en fonction des doses de N appliquées (kg/ha) : 0, 30, 60, 90 et 120. Le trait rouge marque la valeur seuil de 12,5 % à ne pas excéder dans les marchés d'orge à fins brassicoles. Les lettres représentent les différences significatives ($P < 0,05$) entre les doses de N quant à la teneur en protéines à l'intérieur de chaque groupe de données.

Avoine

Dans l'avoine, aucune contrainte n'a été répertoriée quant à une teneur en protéines minimale, bien qu'une teneur en protéines maximale soit souhaitable dans l'avoine nue. Les teneurs en protéines des grains ont varié en moyenne de 12,6 à 14,3 % et de 12,4 à 15,7 % dans les sols G1 et G2-G3 respectivement (Figure 12). Les résultats ont démontré que peu importe le groupe de sols (G1 vs G2-G3), l'augmentation de la dose de N augmente significativement la teneur en protéines des grains ($P = 0,045$ et $P < 0,000 1$, respectivement dans G1 et G2-G3). Cet effet est plus apparent dans les sols à textures moyennes et grossières (G2-G3), où la teneur en protéines des grains augmente de façon linéaire avec l'accroissement de la dose et où une différence significative est détectée entre toutes les doses appliquées (Figure 12).

Dans les deux types de sols, la plus grande teneur en protéines a été retrouvée avec l'application des doses les plus élevées (100 kg N/ha, Figure 12). Il a déjà été largement argumenté dans la littérature scientifique que la fertilisation azotée est le principal facteur influençant la teneur en protéines dans les grains à travers son impact direct sur la concentration en N (Eppendorfer, 1978 ; May *et al.*, 2004). Cette augmentation de la teneur en protéines des grains avec l'augmentation de la dose de N s'explique donc clairement par l'augmentation de la teneur en N disponible à être prélevé par la plante.

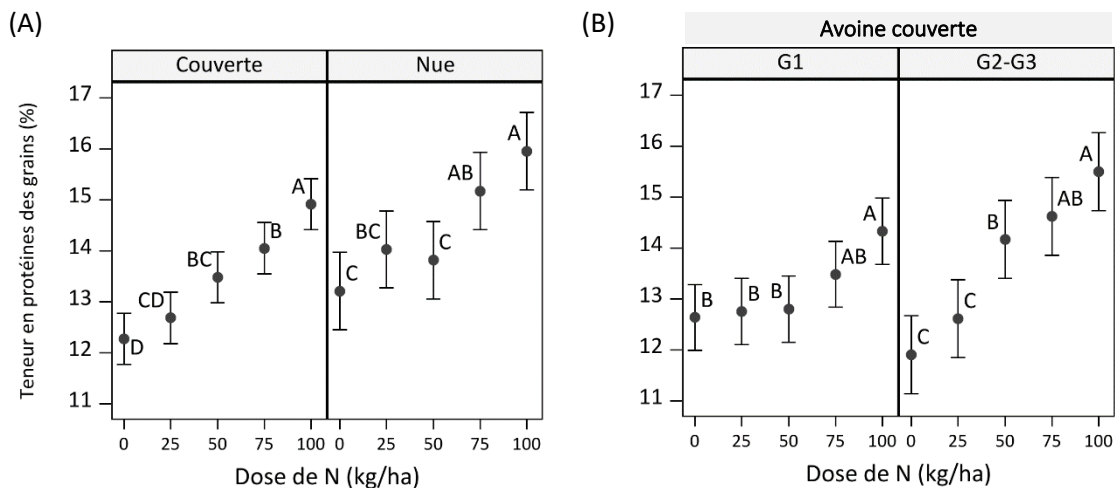


Figure 12. Effet de la dose d'azote sur la teneur en protéines de l'avoine selon (A) le type d'avoine et (B) les groupes de textures dans l'avoine couverte. Valeurs estimées présentées avec les erreurs types et les résultats du test de comparaison des moyennes LSD à 0,05. Les points avec une même lettre ne sont pas significativement différents. Les teneurs en protéines sont rapportées sur une base de 0 % d'humidité.

2.2.4.2 Poids spécifique

Le poids spécifique est un critère de qualité pour la plupart des céréales puisque celui-ci peut être une mesure de qualité de la valeur énergétique dans l'alimentation de certains animaux (MAAARO, 2021 ; Traineau et Métayer, 2016). Les analyses de ce paramètre ont été produites pour les trois céréales séparément.

Blé de printemps

Le poids spécifique du blé s'est comporté différemment en fonction des groupes de textures de sol (Figure 13). Aucun effet de la dose de N ($P > 0,12$) n'a été observé dans les sols G1, pour un poids spécifique moyen de 77,6 kg/hL. Dans les sols G2-G3, un effet de la dose ($P < 0,12$) sur le poids spécifique a été observé : les poids spécifiques les plus élevés ont été obtenus dans les parcelles fertilisées avec 60 à 120 kg N/ha, tandis que les traitements en dehors de cet intervalle ont enregistré des valeurs plus faibles. Lorsque le poids spécifique est analysé en fonction de l'indice de sévérité de la verse, il apparaît que la verse sévère (cote 3) a nui à l'atteinte d'un poids spécifique élevé ($P = 0,016$; Figure 13A). Les conséquences ne sont toutefois pas désastreuses, la diminution étant d'environ 0,7 à 0,8 kg/hL (-1 %) par rapport aux parcelles non atteintes (cote 1) ou atteintes modérément (cote 2) par la verse. Ces résultats concordent avec la littérature scientifique qui rapporte que la verse peut nuire à la qualité des grains, et plus particulièrement si elle survient hâtivement, au remplissage des grains (Berry *et al.*, 2004 ; Rajkumara, 2008). Dans le cadre de ces essais, le peu de verse recensé est survenu tard en saison (fin juillet, août), ce qui pourrait expliquer que les écarts étaient faibles entre les poids spécifiques des parcelles versées et non versées.

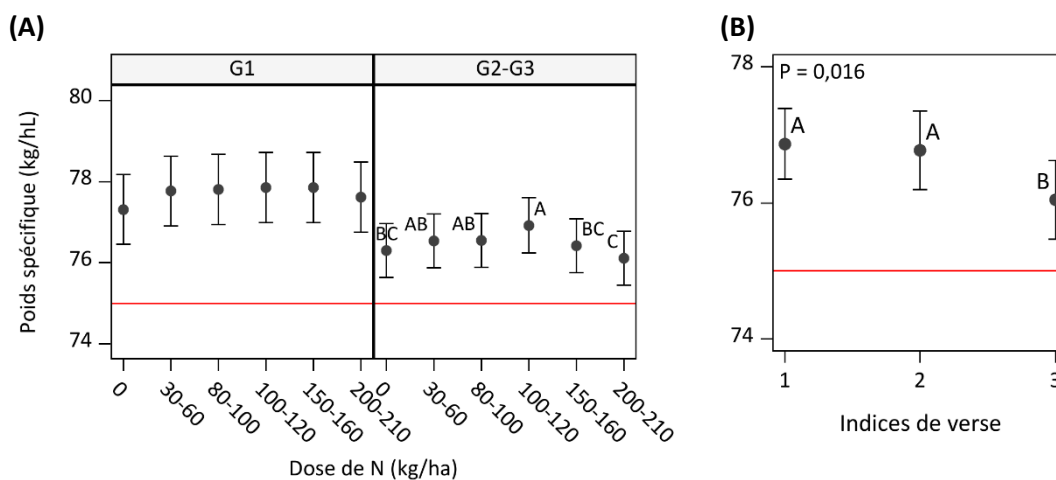


Figure 13. Poids spécifiques du blé (et erreurs types) présentés en fonction (A) du groupe de textures et (B) de l'indice de verse.

Orge

Dans les sols du groupe de textures G1, les doses de N ont significativement affecté le poids spécifique moyen des grains ($P = 0,020$) (Figure 14). Une augmentation progressive a été observée jusqu'à la dose de 60 kg N/ha, pour atteindre une valeur moyenne de 58 kg/hL. Cette dose n'a toutefois pas permis aux grains de se classer comme EC n°1 selon les normes de la Commission canadienne des grains (2020), le critère minimal à atteindre étant 60 kg/hL. Le grade EC n°2 a toutefois pu être atteint, car le poids spécifique a dépassé le seuil de 54 kg/hL. Dans les sols des groupes de textures G2 et G3, les doses de N n'ont pas influencé le poids spécifique ($P = 0,663$), qui a eu une valeur moyenne de 62,3 kg/hL. Toutefois, dans ces sols, le seuil minimal requis pour être classé comme EC n°1 a été atteint dans tous les traitements, incluant le témoin.

Le poids spécifique des grains pourrait également être influencé fortement par d'autres facteurs comme le cultivar (Traineau *et al.*, 2016). En effet, l'analyse numérique des données montre que les cultivars Champion et Selena cultivés sur des sols G2-G3 ont les poids spécifiques les plus élevés, tandis que pour le cultivar Synasolis, les grains n'ont pas atteint le seuil minimal de 60 kg/hL requis pour être classés comme EC n°1 peu importe le groupe de textures de sol considéré (données non présentées).

Ainsi, en sols G1, les doses de fertilisant retenues dans le cadre de cette étude (90 et 30 kg N/ha dans les sols se situant respectivement en dessous et au-delà du seuil de 5 % de matière organique) pourraient ne pas garantir l'atteinte maximale de la qualité. Enfin, les analyses statistiques n'ont pas permis d'établir une relation significative entre l'intensité de la verse et le poids spécifique.

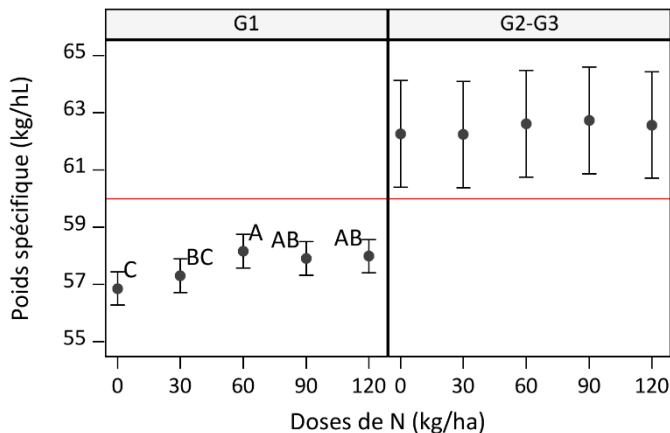


Figure 14. Poids spécifique des grains (et erreurs types) dans les essais N d'orge en fonction des groupes de textures. Les lettres indiquent les différences significatives entre les poids spécifiques ($\alpha = 0,1$).

Avoine

Le poids spécifique est un critère de qualité dans l'avoine destinée à l'alimentation humaine. Dans le cadre des essais de fertilisation et pour les cultivars spécifiques à ce marché, toutes doses confondues, le poids spécifique moyen était de $54,3 \pm 5,5$ kg/hL. Les doses de N ont significativement affecté le poids spécifique des grains : celui-ci a diminué avec l'augmentation des apports ($P < 0,001$; Figure 15) et de façon particulièrement marquée à

partir de l'application de 75 kg N/ha. Cette diminution de la qualité suivant l'application de doses plus élevées pourrait s'expliquer par la fréquence plus grande de la verse sévère dans ces parcelles. En effet, les parcelles versées sévèrement (indice de verse = 3) avaient un poids spécifique plus faible (52,1 kg/hL) que celles versées modérément ou non versées (54,7 kg/hL) ($P < 0,001$; Figure 15). La verse peut affecter le poids spécifique particulièrement si elle survient durant le remplissage des grains (Berry, 2012; Berry *et al.*, 2004). Cette diminution de la qualité pour l'atteinte de hauts rendements avec de fortes doses de N a également été observée par Mohr *et al.* (2007) dans l'Ouest canadien. Néanmoins, même en présence de doses élevées ou de verse sévère dans les essais, les poids spécifiques moyens atteignaient les valeurs minimales d'obtention des grades EC n° 1 (51 kg/hL) et EC n° 2 (49 kg/hL) définis pour l'Est canadien par la Commission canadienne des grains (2020a).

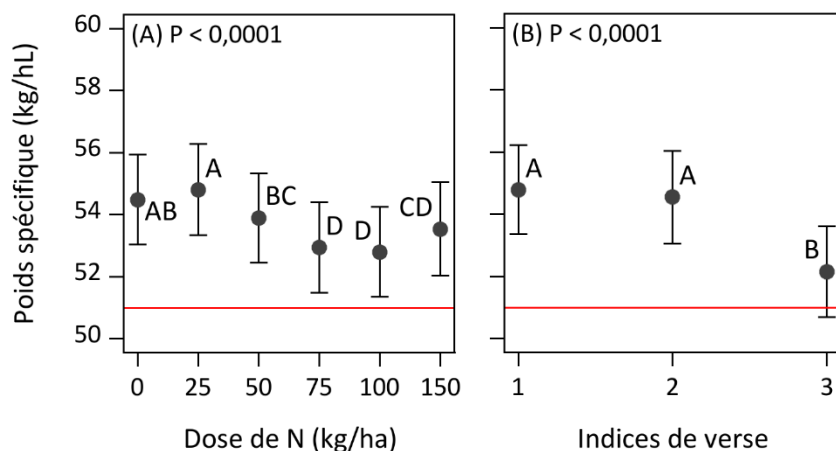


Figure 15. Poids spécifique des grains d'avoine (et erreurs types) dans les essais N en fonction (A) des doses de N et (B) des niveaux de verse enregistrés. Indice de verse 1 : peu ou pas de verse ; 2 : verse modérée et 3 : verse sévère. Les lettres indiquent les différences significatives entre les poids spécifiques ($\alpha = 0,1$). La ligne rouge marque le poids spécifique minimum pour le classement dans le grade EC n° 1 (51 kg/hL) de la commission canadienne des grains (2020).

2.3 Diagnostic nutritionnel et exportations en azote

Les concentrations et les exportations de N dans les grains et la paille (stabilisée à 14 % d'humidité) en fonction du diagnostic nutritionnel sont présentées au Tableau 22. Pour la population de tête (population à haut rendement et à l'équilibre nutritionnel), les concentrations moyennes de N dans les grains de blé, d'orge et d'avoine sont respectivement de 23,1 ; 14,1 et 20,3 kg/t. Pour la paille de cette même population, les valeurs sont en moyennes plus élevées pour l'avoine (7,7 kg/t), suivie du blé (6,7 kg/t) et enfin de l'orge (6,3 kg/t).

Dans le blé et l'avoine, les concentrations obtenues dans la présente étude sont similaires à celles présentées actuellement dans le guide du CRAAQ (2010) qui sont respectivement de $26,1 \pm 2,8$ kg/tonne de matière sèche (équivalent à $22,4 \pm 2,4$ kg/t de grains à 14 % d'humidité) et de $23,9 \pm 3,9$ kg N/tonne de matière sèche (équivalent à $20,3 \pm 3,4$ kg par tonne de grains à 14 % d'humidité). Dans l'orge, toutefois, la concentration en N des grains est inférieure à celle présentée actuellement dans le guide du CRAAQ (2010), soit $21,4 \pm 2,4$ kg N/tonne de matière sèche (équivalent à $18,4 \pm 2,1$ kg/t de grains à 14 % d'humidité). La

concentration mesurée dans cette étude est également plus faible que celles rapportées dans l'Ouest canadien pour l'orge brassicole (Izydorczyk *et al.*, 2020) et l'orge destinée à des fins générales (Commission canadienne des grains, 2019 b). Cette plus faible concentration en N pourrait probablement s'expliquer par l'obtention de plus hauts rendements dans nos essais (5 602 kg/ha) par rapport à la référence provinciale (3 170 kg/ha ; Institut de la statistique du Québec (ISQ, 2020a)) et la valeur rapportée dans l'Ouest canadien (65,2 boisseaux/acre, équivalent à 3 550 kg/ha), entraînant un effet de dilution de la concentration en N dans les tissus (Magliano *et al.*, 2014).

Pour la population de tête, lorsque les grains uniquement sont considérés, les exportations moyennes de N sont, par ordre d'importance, de 120 kg/ha pour le blé, de 95 kg/ha pour l'avoine et de 79 kg/ha pour l'orge (Tableau 22B). Les exportations en N sont donc en moyenne plus élevées pour le blé que pour les deux autres cultures. Cela est en accord avec les résultats des ANOVA qui montrent des besoins en N plus élevés pour le blé que pour l'orge et l'avoine. Dans le cas où la paille est récoltée, les exportations totales (grains et paille) de N totalisent en moyenne 151 kg/ha pour le blé, 128 kg/ha pour l'avoine et 104 kg/ha pour l'orge. Les exportations en N par la paille du blé sont semblables à celle de l'avoine, mais plus faibles que celle de l'orge. Cette plus faible exportation de N par l'orge s'explique à la fois par la plus faible concentration de N dans ses tissus et sa plus faible production de paille (Tableau 22C).

Pour les trois cultures, la concentration en N des grains a peu varié entre les variétés (données non présentées). La Figure 16 montre que les exportations en N du blé, de l'orge et de l'avoine varient généralement de façon linéaire avec le rendement et que certaines variétés produisent de meilleurs rendements que d'autres. Le patron de distribution des points permet de conclure que les différences au niveau de l'exportation en N entre les cultivars seraient principalement attribuables à de plus grandes productivités plutôt qu'à une variation de la concentration du N dans les grains.

Tableau 22. Concentrations en N (A) et exportations en N (B) en fonction du diagnostic nutritionnel et rendements moyens associés à la population de tête (C) dans les grains et la paille du blé, de l'orge et de l'avoine

	Grains																							
	Blé	Orge	Avoine	Blé	Orge	Avoine																		
(A) Concentration en N (kg/tonne humide) ²																								
Haut rdt ¹ et équilibre nutritionnel (« population de tête »)	23,1 ± 1,2	14,1 ± 0,7	20,3 ± 1,3	6,7 ± 1,0	6,3 ± 0,9	7,7 ± 2,2																		
Faible rdt et équilibre nutritionnel	23,9 ± 1,3	14,3 ± 0,8	18,8 ± 1,4	5,5 ± 0,3	7,0 ± 1,2	5,7 ± 2,0																		
Faible rdt et déséquilibre nutritionnel	23,7 ± 2,8	15,8 ± 2,9	18,6 ± 2,5	7,1 ± 1,9	8,8 ± 3,3	6,7 ± 1,5																		
Haut rdt et déséquilibre nutritionnel	22,9 ± 2,2	16,7 ± 2,8	18,7 ± 1,8	6,1 ± 1,3	8,1 ± 1,4	6,6 ± 1,5																		
(B) Exportations en N (kg/ha) ³																								
	Moy	Med	Min	Max	Moy	Med	Min	Max	Moy	Med	Min	Max	Moy	Med	Min	Max	Moy	Med	Min	Max	Moy	Med	Min	Max
Haut rdt et équilibre nutritionnel (« population de tête »)	120	117	105	144	79	80	71	90	95	96	81	107	31	30	23	44	25	23	13	43	33	34	18	52
Faible rdt et équilibre nutritionnel	97	103	49	117	62	62	39	79	79	79	75	83	21	22	16	25	23	20	11	37	22	17	17	34
Faible rdt et déséquilibre nutritionnel	78	76	34	124	62	60	13	95	63	62	30	94	24	23	10	40	27	26	6	56	23	23	7	50
Haut rdt et déséquilibre nutritionnel	143	144	90	168	92	91	64	124	91	89	72	108	36	37	27	47	31	30	19	44	29	24	14	66
(C) Rendement de la population de tête (kg/ha)																								
Haut rdt et équilibre nutritionnel (« population de tête »)	5 170				5 602				4 667				4 593				3 974				4 256			

¹ Les valeurs sont exprimées sur la base d'une humidité moyenne de 14 %.

² Rdt : Rendement.

³ Moy : moyenne ; Med : médiane ; Min : valeur minimale ; Max : valeur maximale.

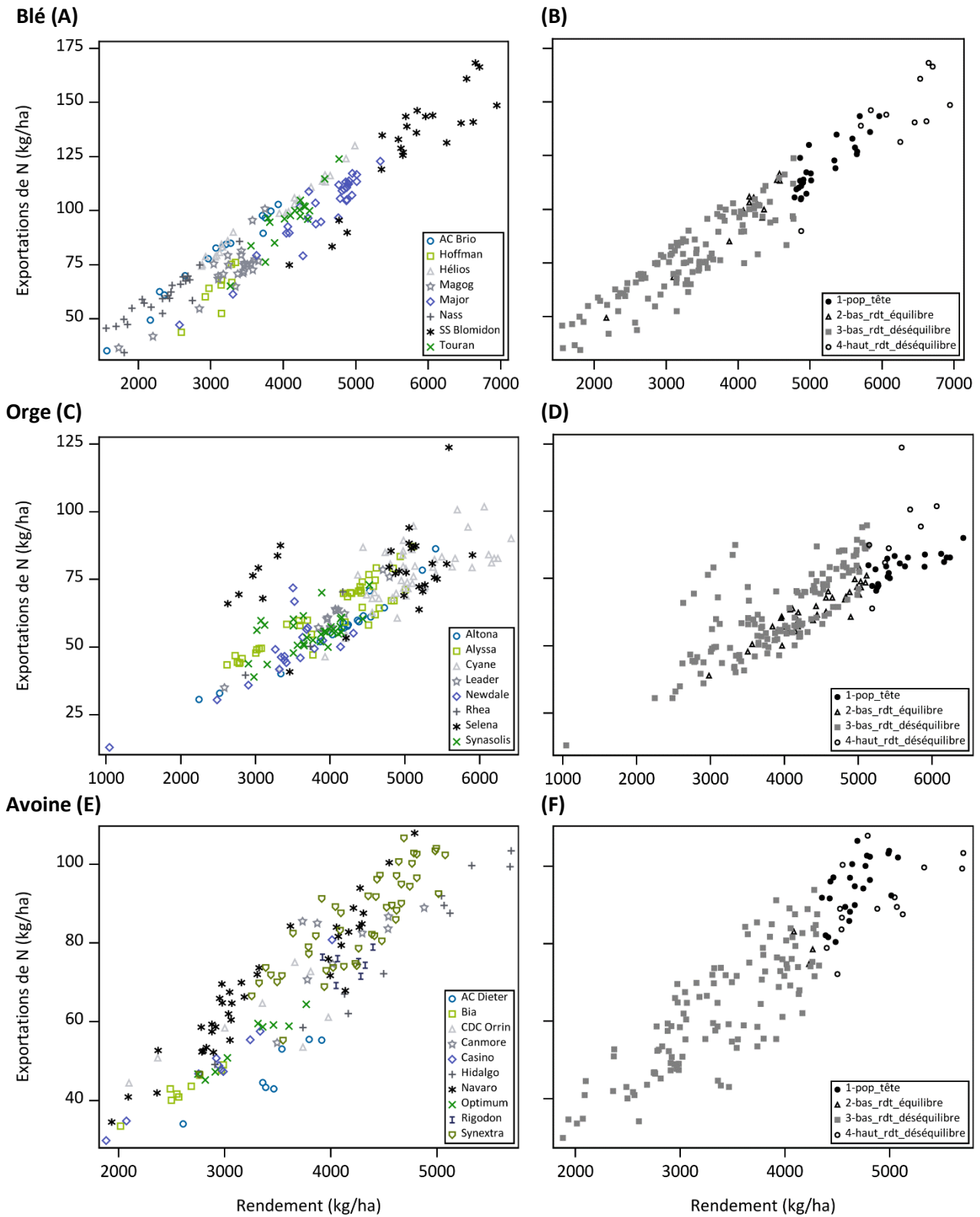


Figure 16. Exportations d'azote du blé de printemps, de l'orge et de l'avoine en fonction des rendements en grains selon les variétés (A, C, E) et le diagnostic nutritionnel (B, D, F).

2.4 Nitrate résiduel à la récolte

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

Les quantités de nitrate résiduel dans le sol à la suite des essais N du blé, de l'orge et de l'avoine sont présentées à la Figure 17. Pour les trois cultures, la fertilisation azotée a entraîné une hausse des teneurs en nitrate et l'ampleur de l'augmentation varie en fonction de la dose de N, de la texture du sol et de la profondeur considérée (Figure 17). Toutefois, cette augmentation reste faible pour la plupart des doses moins élevées, car les différences n'ont pas été statistiquement différentes du témoin.

Aux deux profondeurs étudiées et dans toutes les cultures, la teneur en N-NO₃ est plus faible dans sols G2 et G3 que dans les sols G1, tel que démontré par les valeurs absolues de N-NO₃ des parcelles témoins (Figure 17). Cela pourrait s'expliquer par le fait que les sols de textures fines sont moins lessivables. Les résultats indiquent qu'en général, les doses plus faibles n'ont pas entraîné d'augmentation significative des teneurs en nitrate résiduel dans les deux types de sols (G1 et G2-G3). À l'opposé, l'application des doses les plus élevées (90-120 N pour l'orge ; 150-210 kg N/ha pour le blé et 75-100 pour l'avoine) ont entraîné des augmentations significatives du nitrate résiduel indépendamment de la profondeur et de la texture de sol (Figure 17).

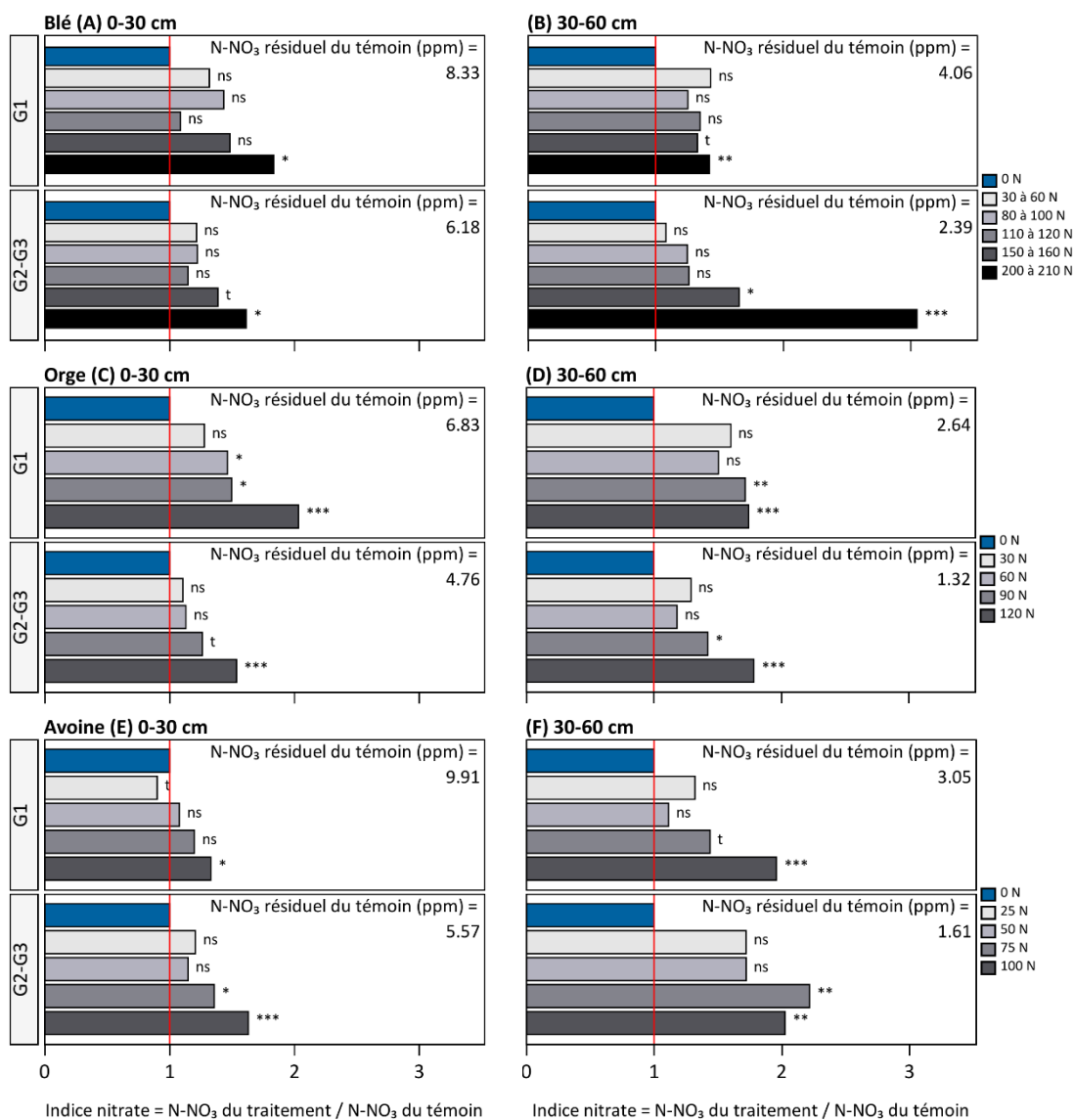


Figure 17. Indices nitrate des traitements d'azote du blé, de l'orge et de l'avoine aux profondeurs 0-30 et 30-60 cm dans les sols G1 vs G2-G3, au moment de la récolte. Les données présentées considèrent uniquement les essais du PSEF. La statistique présentée à droite des barres horizontales indique si le traitement est différent du témoin 0 N. NS : non significatif ; t : tendance à $P < 0,12$; * : P entre 0,05 et 0,01 ; ** : P entre 0,01 et 0,001 ; *** : $P < 0,001$.

Dans le blé et dans les sols G1, les deux doses les plus élevées allant de 150 à 210 kg N/ha ont entraîné des hausses du nitrate résiduel à des niveaux significativement différents du témoin sur les deux profondeurs de sols. Dans les sols plus légers (G2-G3), l'application de la plus forte dose a entraîné une augmentation jusqu'à 3 fois plus élevée que le témoin non fertilisé. Ces résultats sont en accord avec ceux des analyses de variance (section 2.2.2.1) selon lesquels les doses optimales de N pour la culture du blé varieraient de 50 kg/ha à 120 kg N/ha. Les VRSF retenues dans cette étude permettront de limiter la perte de N vers l'environnement.

Dans l'orge, l'augmentation du nitrate résiduel est particulièrement marquée dans la couche de surface des sols G1, où la dose 120 N a doublé la teneur en N-NO₃ résiduel par rapport à la parcelle témoin. En effet, l'analyse

des données montre un faible coefficient d'utilisation apparent de l'azote (42 % en moyenne, variant de 2 à 79 %) par l'orge pour la dose de 120 kg N/ha. Ces résultats s'accordent avec ceux des analyses de variance (voir section 2.2.2.2) selon lesquels la dose optimale serait plus élevée dans les sols de textures moyennes à légères que dans les sols lourds. Bien que significativement différentes du témoin, les quantités de nitrate résiduel mesurées dans les sols restent faibles et ne représenteraient pas un risque accru de pollution environnementale, à l'exception de la dose de 120 kg N/ha dans les sols G1.

Dans le cas de l'avoine, les analyses du nitrate résiduel montrent une augmentation significative de l'azote dans le sol à partir de l'application de la dose de 75 kg N/ha pour toutes les textures de sols. De même que pour l'orge, il convient de nuancer ces résultats et de considérer que bien que l'effet de la dose soit significatif, les quantités de nitrate mesurées sont relativement faibles.

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

En raison des tendances différentes de réponse à la fertilisation observées en fonction des groupes de textures de sols, les VSRF sont proposées séparément pour les sols G1 et G2-G3 pour les trois cultures. Par la suite, à l'intérieur de ces groupes de textures de sols, la teneur en MO du sol a, la plupart du temps, permis de distinguer les différentes classes de fertilité de sols. Les teneurs en MO sont arrondies au dixième pour toutes les VSRF, par rapport aux valeurs obtenues du test de Cate-Nelson.

2.5.1 Blé

Les recommandations en N proposées pour la culture du blé de printemps sont présentées au Tableau 23. Dans les sols du groupe G1, deux classes de fertilité ont été retenues en fonction de la teneur en MO du sol analysée par la méthode par perte au feu. Dans la première classe regroupant les sols ayant une concentration en MO inférieure ou égale à 3,8 %, la dose de 120 kg N/ha est proposée. Pour une concentration en MO au-delà de 3,8 %, la recommandation est de 90 kg N/ha. Dans les sols de groupes de textures G2-G3, une dose unique de 120 kg N/ha est recommandée. Les doses ont été choisies selon la distribution de celles-ci dans le groupe de doses choisi pour une catégorie de sol donnée (Tableau 20). Les doses de N sont fractionnées en deux apports en vue de diminuer les pertes par lessivage et, par conséquent, d'optimiser les prélèvements par la plante. La répartition de la dose en deux fractionnement égaux a été préconisée pour la recommandation, par rapport à l'apport fixe au semis de 30 N suivi en post-levée de 90 N (ou 60 N), testé dans les essais d'AAC. La répartition des doses entre les fractionnements a donc varié entre les sources de données (voir sections 1.4.1 à 1.4.4), ce qui nécessite une uniformisation entre les différentes VSRF proposées. Un fractionnement en deux apports égaux est proposé. En effet, dans le cadre de cette étude, une analyse de variance a été effectuée sur les données fournies par AAC, où la dose de 120 kg/ha a été testées en deux fractionnements différents ([30 + 90] ou [60 + 60]). Les résultats de cette analyse ont indiqué que les meilleurs rendements étaient obtenus avec les deux fractionnements égaux (données non présentées). Cette répartition pourrait permettre de synchroniser la fertilisation avec les besoins de la culture. En effet, puisque la détermination du nombre d'épis par unité de surface et la formation des épillets surviennent durant la période végétative (avant la fin du tallage), un apport de N assure un bon potentiel de rendement s'il est appliqué assez tôt (au semis) (CRAAQ, 2012; Simmons et al.,

1985). De plus, comme le blé requiert beaucoup d'éléments nutritif à la montaison des épis, un apport en post-levée sera bien valorisé (LeSouder, 2020). Enfin, il convient également de mentionner qu'en pratique, il arrive que des producteurs de blé fractionnent le N en trois apports, à raison d'une répartition 50 % - 25 % - 25 %. Cette stratégie n'a pas été testée dans le cadre des essais de fertilisation et il appartiendra aux intervenants et aux agronomes sur le terrain de juger dans quel cas celle-ci est préférable.

Les recommandations faites dans le cadre de cette étude se trouvent en grande partie dans l'intervalle de doses proposé actuellement au Québec par le CRAAQ (2010) (Tableau 24). Les présentes recommandations sont en général similaires ou légèrement supérieures aux grilles de fertilisation étrangères. Seule la recommandation du Minnesota (États-Unis) intègre la matière organique comme indicateur de fertilité du sol, à l'instar de la présente proposition.

Tableau 23. Fertilisation azotée du blé de printemps – Valeurs scientifiques de référence en fertilisation

Groupe de textures ¹	Classe de fertilité MO _{PAF} (%) ²	Période d'application	Fractionnement ³ (kg N/ha)	VSRF ⁴ (kg N/ha)
G1	≤ 3,8	Au semis, incorporé	60	120 ⁵
		En post-levée	60	
	> 3,9	Au semis, incorporé	45	90 ⁶
		En post-levée	45	
G2, G3	-	Au semis, incorporé	60	120 ⁷
		En post-levée	60	

Tous les cultivars utilisés dans le cadre des essais de fertilisation étaient tolérants à la verse et étaient appropriés à la région agro-climatique.

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

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

³ Le fractionnement de la dose 90 kg N/ha est présenté tel que testé, tandis que celui de la dose 120 kg N/ha a été modifié (60 + 60). Dans ces catégories de sols, l'apport de 120 kg N/ha a été testé en deux apports, soit 30 N au semis et 90 N en post-levée.

⁴ Valeur scientifique de référence en fertilisation.

⁵ Dose agronomique optimale dans cette catégorie de sols. Seule dose testée du groupe de doses 110-120 N dans cette catégorie de sols.

⁶ Dose agronomique optimale dans cette catégorie de sols. Médiane du groupe de doses 80-100 N dans cette catégorie de sols.

⁷ Dose agronomique optimale dans cette catégorie de sols. Médiane du groupe de doses 110-120 N dans cette catégorie de sols.

Répartition des doses :



La dose de N de 120 kg/ha a été testée majoritairement de la façon suivante : 30 kg/ha au semis et 90 kg/ha en post-levée. Le fractionnement proposé diffère donc de ce qui a été testé lors des essais au champ. La proposition actuelle est plutôt basée sur la considération des besoins de la cultures selon les stades de croissance tel que montré dans la littérature (CRAAQ, 2012; LeSouder, 2020; Simmons et al., 1985). De plus, ce choix s'appuie sur les résultats des analyses effectuées sur une partie des données des essais de AAC (non présentées) où deux fractionnements ont été comparés ([60 + 60] ou [30 + 90]). Enfin, le choix de cette répartition permet d'uniformiser avec celle de la VSRF de la catégorie suivante (90 kg N/ha), laquelle a été testée en deux apports égaux.

Tableau 24. Comparaison des recommandations en N pour la production du blé, de l'orge et de l'avoine au Canada et aux États-Unis

Provinces /États	Mode et période d'application	Fractionnement	Indicateurs		Dose N (kg/ha)			Source
			Fertilité du sol	Autres	Blé	Orge	Avoine	
Québec¹ (CAN)	-	Blé : 50-60 % du N au semis et le reste au tallage	-	-	90-120	40-80	40-60	CRAAQ (2010)
Ontario² (CAN)	Avoine : avant les semis, incorporés ; Orge : Appliquer avec la semence une partie ou la totalité des apports d'azote nécessaires, selon les doses.	Au besoin	-	Blé : Utilisation finale et objectif de rendement ; Orge : rapport de prix engrais/orge ; Avoine : Région (nord/sud)	60-140	0-165	35-75	MAAARO (2017)
Nouveau-Brunswick (CAN)	-	Blé à moudre : ajouter 60 kg N/ha au semis et 30 kg N/ha aux stades Zadoks 30-45.	-	-	60-90	60-80	45	New Brunswick Department of Agriculture, Fisheries and Aquaculture (2001)
Prairie (CAN)	-	-	NO ₃ , humidité et minéralisation de N du sol	Précipitations attendues, variété culturale, objectif de rendement	-	-	100-150	Prairie Oat Production Manual (2020)
Alberta³ (CAN)	Blé, avoine : En bande ou à la volée et incorporé	-	Orge : N-NO ₃ 0-60 cm	Blé, avoine : Précédent culturel ; Orge : Type de sol et d'irrigation	6-90	0-190	6-90	Alberta Agriculture and Rural Development (2004)
Minnesota (É-U)	-	-	Matière organique	Blé, orge, Avoine : Objectif de rendement ; Orge : Précédent culturel	0-190	0-162	0-123	University of Minnesota extension (2018)
Vermont (É-U)⁴	-	-	Objectif de rendement	Classe de drainage du sol, précédent culturel et apport de fumier	50-123	50-123	50-123	University of Vermont Extension (2017)
Wisconsin (É-U)⁵	-	-	NO ₃ -N présemis, texture du sol, matière organique	Blé : rapport de prix ; Orge, avoine : objectif de rendement	0-129	17-78	0-67	Laboski et Peters (2012)

¹ **Blé** : Cette recommandation s'applique aux blés de printemps, d'automne, fourrager et panifiable. Ajuster localement selon les risques de verse en fonction du cultivar. Ne pas appliquer plus de 70 à 90 kg/ha pour les blés à pâtisserie. L'azote peut être fractionné et ajusté selon les conditions de croissance ; **Orge** : Pour l'orge de brasserie, ne pas dépasser 40 kg N/ha ; **Avoine** : ajuster localement selon les risques de verse en fonction du cultivar et du précédent culturel.

² **Orge** : la dose apportée dépend du prix obtenu en divisant le prix du N contenu dans l'engrais par le prix de vente du blé. Pour le blé tendre roux et le blé blanc de qualité pâtissière, on peut épandre 10 kg/ha de N au semis et le reste en surface, au début du printemps.

³ **Blé, orge avoine** : En cas de risque de verse, réduire la dose de 20 lb/acre.

⁴ **Blé** : si une analyse de sol est effectuée en présemis et est < 50 lb/acre utiliser la limite supérieure de l'intervalle de dose. Si l'analyse est comprise entre 51 et 100 lb/acre, utiliser la limite inférieure. Si l'analyse est > 100 lb/acre, aucun apport de N n'est nécessaire. L'analyse de sol en présemis n'est pas recommandée dans les sols sableux. Ajouter 30 lb/acre de N supplémentaire dans les sols loameux de < 2 % de MO, et réduire de 30 lb N/acre pour tous les sols de > 10 % de MO. Diminuer la dose de 10 lb N/acre pour le blé de printemps dans tous les types de sols.

⁵ **Orge** : Éliminer ou réduire de moitié l'apport de N si l'orge est semée avec une prairie de légumineuses.

Dans le but d'homogénéiser les unités et faciliter les comparaisons, les coefficients suivants ont été utilisés lorsque nécessaire : 1 ppm = 2,24 kg/ha ; 1 lb/ac = 1,12 kg/ha ; 1 t de blé = 36,744 0 bu ; 1 t d'orge = 43,930 0 bu ; 1 ac = 0,404 69 ha.

2.5.2 Orge

De plus faibles doses de N sont proposées pour la culture d'orge en comparaison au blé (Tableau 25). Dans les sols du groupe de textures G1, deux classes de fertilité ont été retenues de part et d'autre d'un seuil de MO de 5,0 %. Dans la première classe de fertilité, pour les sols ayant une concentration en MO inférieure à 5,0 %, une dose allant de 60 à 90 kg N/ha est recommandée. Pour cette catégorie de sol, la dose de 90 kg N/ha a permis d'obtenir le rendement agronomique optimal. Cependant, l'analyse des données montre une forte occurrence de la verse dans ces sols. De ce fait, selon l'historique du champ et pour les cultivars non résistants à verse, l'apport de N en post-levée peut-être omis en tout ou en partie, afin de limiter les risques de verse. Dans la 2^e classe de fertilité, pour les sols dont la concentration en MO est supérieure à 5,0 %, la recommandation est de 30 kg N/ha. Tel que testé dans les essais, la dose de 90 kg N/ha est fractionnée en deux apports en vue de diminuer les pertes par lessivage et par conséquent, d'optimiser les prélèvements par la plante (Tableau 2). Les deux autres doses (30 kg N/ha et 60 kg N/ha) ont été testées en un seul apport, avant le semis. Il est important de noter que dans les sols du groupe de textures G1 ayant plus de 5 % de MO, les essais d'orge ont tous été réalisés en zone périphérique (Bas-Saint-Laurent, Abitibi-Témiscamingue et Saguenay-Lac-Saint-Jean). En raison de cette limitation du jeu de données, la recommandation de l'apport de 30 kg/ha peut dans certains cas être insuffisante, selon les conditions rencontrées au champ dans les régions plus centrales. Le jugement de l'agronome sur l'application de cette dose est requis.

Dans les sols des groupes de textures G2-G3, une dose unique de 90 kg N/ha est recommandée, peu importe la teneur en MO du sol. Toutefois, il est important de noter que pour les sols ayant une concentration en MO inférieure à 3,0 %, la plus forte dose testée, soit 120 kg N/ha a permis d'obtenir le meilleur gain de rendement, sans atteindre un plafonnement (Figure 5). Cette dose a été ajustée à la baisse afin de limiter les risques de verse. De même que dans les sols du groupe de textures G1, les fractionnements reflètent les conditions des essais dans lesquelles les doses ont été testées dans chaque catégorie de sol.

Enfin, dans l'orge brassicole, si la dose totale de N est supérieure à 60 kg N/ha, celle-ci devrait être apportée tôt en saison et fractionnée en vue de maximiser le rendement tout en minimisant le risque de dépasser le seuil de 12,5 % de protéines (voir la section 2.2.4.1).

Les recommandations faites dans le cadre de cette étude sont en général similaires celles de l'intervalle de doses proposées actuellement au Québec par le CRAAQ (2010) (Tableau 24). De plus, les recommandations sont comparables à celles du Nouveau-Brunswick et variables par rapport aux autres grilles en raison de la grande hétérogénéité des recommandations en fonction des provinces et états.

Tableau 25. Fertilisation azotée de l'orge – Valeurs scientifiques de référence en fertilisation

Groupe de textures ¹	Classe de fertilité MO _{PAF} (%) ²	Période d'application	Fractionnement ³ (kg N/ha)	VSRF ⁴ (kg N/ha)
G1	≤ 5,0	Au semis, incorporé	60	60 - 90 ^{5,6,7}
		En post-levée	0 - 30	
	> 5,0	Au semis, incorporé	30	30 ^{8,9}
		En post-levée	0	
G2, G3	-	Au semis, incorporé	60	90 ^{5,7,10}
		En post-levée	30	

Tous les cultivars utilisés dans le cadre des essais de fertilisation étaient tolérants à la verse et appropriés à la région agro climatique.

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 Les fractionnements sont présentés tels que testés. Si l'apport total visé était de 70 à 80 kg/ha, une application inférieure à 60 kg/ha au semis pourrait permettre de conserver une dose minimale pratique en post-levée.

⁴ VSRF : Valeur scientifique de référence en fertilisation.

⁵ Dose agronomique optimale dans cette catégorie de sol.

⁶ Pour les cultivars qui sont sensibles à verse et selon l'historique du champ, l'apport de N en post-levée peut être omis en tout ou en partie afin de réduire les risques de verse.

⁷ Dans l'orge brassicole, si la dose totale de N est supérieure à 60 kg N/ha, celle-ci devrait être apportée tôt en saison et fractionnée en vue de maximiser le rendement tout en minimisant le risque de dépasser le seuil de 12,5 % de protéines.

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

⁹ Dans cette catégorie de sols, les essais ont été réalisés exclusivement en régions périphériques (01, 02 et 08). Dans les régions centrales, la dose de 30 kg N/ha pourrait s'avérer insuffisante. Dans le cas d'une majoration de la dose par l'agronome, une attention particulière devrait être portée au risque de verse, plus important dans les régions centrales (RGCQ 2020).

¹⁰ Dans cette catégorie de sols, la dose de 120 kg N/ha a mené aux meilleurs rendements. Ainsi, si le cultivar utilisé est résistant à la verse et selon l'historique du champ, la dose de N peut être ajustée à la hausse jusqu'à concurrence de 120 kg N/ha.

En raison du risque de verse non négligeable dans l'orge, il pourrait s'avérer prudent de mettre en garde l'utilisateur par rapport aux facteurs de risque :

- Les essais du PSEF et de Semican ont employé des cultivars résistants à la verse et appropriés à la région climatique. Les indices de résistance à la verse des RGCQ étaient en deçà de 3 dans tous les cas. Malgré cela, de la verse est survenue dans certains essais et particulièrement avec les doses de N plus élevées pour les variétés suivantes : Alyssa, Bentley, Champion, Cyane, Rhéa et Selena.
- Dans les sols G1 de < 5,0 % de MO, la dose de 90 kg N/ha a mené aux meilleurs rendements. Or, 40 % des parcelles ont versé moyennement ou sévèrement à partir de l'application de la dose de 60 kg N/ha pour cette catégorie de sol. Il est donc recommandé d'omettre en tout ou en partie l'apport de N en post-levée, selon l'historique du champ et la sensibilité des cultivars à la verse.
- De même, dans les sols G2 et G3 de < 3,0 % de MO, la dose de 120 kg N/ha a mené aux meilleurs rendements. Or, 18 % des parcelles ont versé sévèrement à partir de l'application de cette dose. La dose de N recommandée a donc été réduite à 90 kg N/ha en vue de limiter les risques de verse. Ainsi, si le cultivar utilisé est résistant à la verse et selon l'historique du champ, la dose de N peut être ajustée à la hausse jusqu'à concurrence de 120 kg N/ha. Le jugement de l'agronome est requis pour l'application de cette dose.



Si l'engrais utilisé est concentré en N, l'urée par exemple (46-0-0), l'apport de 30 kg N/ha peut présenter des contraintes pratiques d'application. En effet, la dose minimale pratique à respecter est d'environ 100 kg/ha de volume total d'engrais. Par exemple, pour un sol de plus de 5 % de MO et un niveau de suffisance en P et en K, les besoins en N à combler par fertilisation seront de 30 kg N/ha. Si la source d'azote choisie est l'urée, le volume à utiliser sera de 65 kg (30 kg N/46 % de N dans l'urée), ce qui est sous la quantité minimale de 100 kg/ha.

Finalement, il convient de mentionner que les essais réalisés sur des sols du groupe G1 qui avaient plus de 5 % de MO se situaient tous en zone périphérique (Bas-St-Laurent, Abitibi-Témiscamingue et Saguenay-Lac-St-Jean). Ainsi, en raison de cette limitation de la représentativité du jeu de données, il n'est pas à exclure que l'apport de 30 kg N/ha soit insuffisant dans les régions plus centrales. En effet, actuellement, des doses plus importantes sont généralement appliquées et bien valorisées dans ces régions. Toutefois, le jugement de l'agronome sur l'application d'une dose plus élevée est requis, car selon les RGCQ (2020), les risques de verse sont plus importants en région centrale qu'en région périphérique.

2.5.3 Avoine

En raison de l'occurrence importante de la verse dans l'avoine, l'influence de la fertilisation en N sur l'apparition de la verse et sur la qualité des grains a été considérée dans le cadre de la détermination des VSRF (voir les sections 2.2.3.3, 2.2.4.1 et 2.2.4.1). Dans les sols à texture fine (G1), la dose de 25 kg N/ha a été retenue comme optimale pour les sols à l'étude, soit ceux dont la teneur en matière organique se situe au-dessus de 4,0 % (Tableau 26). Il importe de noter que cette valeur de 4,0 % n'est pas un seuil agronomique de réponse ; il s'agit plutôt d'une contrainte directement liée au jeu de données. En absence de données sous ce seuil, l'établissement d'une VSRF a été impossible dans cette catégorie de sols. Dans les sols à textures moyennes et grossières (G2 et G3), deux classes de fertilité ont été déterminées de part et d'autre du seuil de 4,1 % de MO. En dessous de ce seuil, la dose optimale de 75 kg N/ha a permis d'obtenir les meilleurs rendements. Toutefois, la verse a été numériquement plus importante avec cette dose qu'avec l'apport de 50 kg N/ha. En présence d'un cultivar

sensible et selon l'historique du champ, l'apport pourrait être ajusté à la baisse. Au-delà du seuil de 4,1 % de MO, la dose de 25 kg N/ha s'est avérée suffisante. Dans le cadre de la réalisation des essais, la dose de 75 kg N/ha a été testée en deux apports, soit 50 kg/ha au semis et la balance en post-levée. Toutefois, il est recommandé de faire un seul apport au semis en vue de réduire les risques de verse. La dose de 25 kg N/ha quant à elle a été testée en un seul apport avant le semis.

Les VSRF de la présente étude s'arriment bien avec les recommandations québécoises actuelles qui recommandent entre 40 et 60 kg N/ha (CRAAQ, 2010). Toutefois, ces nouvelles VSRF apportent une meilleure précision quant à la dose de N nécessaire dans les sols G2-G3 ayant plus de 4,1 % de MO, ce qui représente un avantage du point de vue environnemental. La consultation des grilles utilisées ailleurs au Canada et aux États-Unis montre que la concentration en matière organique du sol est un indicateur déjà utilisé pour la classification de la fertilité des sols (Tableau 24), notamment dans le Minnesota et le Wisconsin où les seuils délimitant les classes inférieures sont respectivement de 3 et 2 %, bien que sans distinction quant à la texture du sol. Finalement, les VSRF de la présente étude sont généralement inférieures aux recommandations des Prairies canadiennes et du Vermont (Tableau 24). Elles sont similaires aux recommandations de l'Ontario et du Wisconsin et variables par rapport à celles du Minnesota.

Tableau 26. Fertilisation azotée de l'avoine – Valeurs scientifiques de référence en fertilisation

Groupe de textures ¹	Classe de fertilité MO _{PAF} (%) ²	Période d'application	VSRF ⁴ (kg N/ha)
G1	—		— ⁵
	(> 4,0) ³	Au semis, incorporé	25 ^{6, 7, 8, 9}
G2, G3	≤ 4,1	Au semis, incorporé	75 ^{10, 11}
	> 4,1	Au semis, incorporé	25 ^{6, 8, 9}

Selon l'historique du champ, la dose d'azote pour l'**avoine nue** peut être rehaussée jusqu'à 75 kg N/ha sans tenir compte de la teneur en MO du sol. Tous les cultivars utilisés dans le cadre des essais de fertilisation étaient tolérants à la verse et étaient appropriés à la région agro-climatique.

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 La valeur de 4,0 % correspond à la plus petite teneur en MO_{PAF} rencontrée et n'a pas été déterminée par la méthode de Cate-Nelson.

⁴ VSRF : valeur scientifique de référence en fertilisation.

⁵ Impossibilité de conclure sur une VSRF en raison de l'absence de données dans cette catégorie de sols.

⁶ L'apport de 25 kg N/ha peut présenter des contraintes techniques d'application si des engrais concentrés en N sont utilisés (ex. : urée).

⁷ Dans les sols G1, les essais ont été réalisés en régions périphériques (01, 02, 08) sur des sols bien pourvus en MO (moyenne de 6,5 %, jusqu'à 11 %).

⁸ Dans les régions centrales, la dose de 25 kg N/ha pourrait s'avérer insuffisante. Dans le cas d'une majoration de la dose par l'agronome, une attention particulière devrait être portée au risque de verse, plus important dans les régions centrales (RGCQ 2020).

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

¹⁰ Dose agronomique optimale dans cette catégorie de sols.

¹¹ Si le cultivar est sensible à la verse et selon l'historique du champ, la dose peut être ajustée à la baisse jusqu'à 50 kg N/ha. La dose de 75 kg N/ha a été testée en deux apports : 50 kg/ha au semis et 25 kg/ha en post-levée. Cette dose est ici présentée en un apport afin de limiter les risques de verse.

Sols G1, $MO_{PAF} \leq 4,0 \%$:

Dans les sols du groupe de textures G1, tous les sites avaient une teneur en MO_{PAF} supérieure à 4,0 %. Cette valeur n'est donc pas un seuil agronomique de réponse. Le calcul d'une VSRF étant impossible pour cette catégorie de sol ($< 4,0 \%$ de MO), les pistes de réflexion suivantes sont suggérées. D'une part, un seul site PSEF avait une teneur en MO_{PAF} relativement proche de cette valeur (MO_{PAF} du site à 5,3 %). Ce site, analysé séparément, a eu une dose optimale de 50 kg N/ha, comparativement à 25 kg N/ha aux autres sites. Ainsi, une dose de 50 kg N/ha pourrait être retenue dans les sols de moins que 4 % de MO_{PAF} . D'autre part, en se basant sur les recommandations actuelles du CRAAQ (40-60 N; CRAAQ, 2010), la dose de la borne inférieure (40 kg N/ha) pourrait être utilisée pour cette catégorie de sol. Toutefois, il est à noter que cette dose n'a pas été testée dans les présents essais.

Sols G1, $MO_{PAF} > 4,0 \%$:

Dans les sols du groupe de texture G1, les essais d'avoine ont été réalisés exclusivement en zone périphérique (Bas-Saint-Laurent, Abitibi-Témiscamingue et Saguenay-Lac-Saint-Jean). Ainsi, la recommandation de 25 kg N/ha peut ne pas représenter, dans certains cas, les conditions rencontrées au champ dans les autres régions. Le jugement de l'agronome sur l'application de cette dose est requis. Par ailleurs, si l'engrais utilisé est concentré en N, l'apport de 25 kg N/ha pourrait présenter des contraintes pratiques d'application, puisque la dose minimale à respecter est d'environ 100 kg/ha de volume total d'engrais. Ainsi, pour un sol de plus de 4 % de MO et un niveau de suffisance en P et en K, combler uniquement 25 kg N/ha sous forme d'urée résultera en un volume total d'engrais de 54 kg (25 kg N / 46 % de N dans l'urée), lequel est en deçà de la quantité minimale pratique de 100 kg/ha.

Sols G2-G3, $MO_{PAF} \leq 4,1 \%$:

Dans les sols des groupes de textures G2 et G3, la dose ayant mené aux meilleurs rendements est 75 kg N/ha. Or, cette dose peut également entraîner de la verse si les cultivars choisis sont sensibles. En fonction du cultivar et de l'historique du champ, cet apport pourrait être ajusté à la baisse.

Avoine nue :

Comme mentionné à la section 2.2.2.3, l'avoine nue a été testée à quatre sites situés dans une même région; le Centre-du-Québec. De plus, les essais ont été effectués par le même collaborateur, et sur des propriétés de sols similaires (exclusivement des sols G3, MO_{PAF} de 5,1 à 7,2 %). Ainsi, la très grande réponse de l'avoine nue aux apports de N pourrait également être liée aux conditions très spécifiques de réalisation de ces essais. Aucune VSRF n'a donc été déterminée spécifiquement pour ce type d'avoine, car il serait peu prudent de généraliser ces résultats à d'autres catégories de sols. Selon l'historique du champ, la dose d'azote pour l'avoine nue peut être rehaussée jusqu'à 75 kg N/ha sans tenir compte de la teneur en MO du sol.



3. FERTILISATION PHOSPHATÉE

Contrairement à l'azote où les VRSF sont calculées séparément pour chacune des trois céréales, les données des essais P du blé de printemps, de l'orge et de l'avoine ont été analysées conjointement. En plus des avantages statistiques (jeu de données plus équilibré, plus grand nombre d'observations, etc.), cela a permis une meilleure représentativité des différentes classes de fertilité et de saturation en P des sols. Finalement, la mise en commun des jeux de données est également soutenue par le fait que les trois cultures présentent une régie de fertilisation phosphatée et des exportations en P₂O₅ similaires (voir section 3.3).

3.1 Portrait et représentativité des données

La répartition des blocs des essais P des céréales (blé, orge et avoine) à travers les différentes classes de propriétés de sol (0-20 cm) est présentée au Tableau 27. Ainsi, environ 40 % des blocs ont été menés sur des sols argileux (G1), 35 % sur des sols loameux (G2) et 25 % sur des sols sableux (G3), ce qui traduit une bonne représentativité des trois groupes de textures de sol dans les essais. L'indice de saturation en phosphore ($ISP_1 = [P_{M3} \text{ (ppm)} / Al_{M3} \text{ (ppm)}] \times 100$), un meilleur indicateur agroenvironnemental de la disponibilité en P que le P_{M3} seul (Khiari *et al.*, 2000), a été inférieur au seuil de 7,6 % du règlement sur les exploitations agricoles (REA) (MDDEP, 2010) dans 91 % des blocs du groupe G1. Dans les sols des groupes G2 et G3, presque la totalité des blocs (98 %) avait un ISP₁ sous le seuil critique de 13,1 %, et 69 % avaient un ISP₁ inférieur à 6,5 %. En effet, hormis le blé, dans les sols des groupes de textures G2 et G3, la totalité des essais a été réalisée sur des sols ayant un ISP₁ en deçà du seuil critique de 13,1 %. Cette faible proportion de sites peu saturés en P est adéquate pour une bonne observation de la réponse à la fertilisation. Toutefois, la réponse au P dans les sols saturés ne pourra être étudiée adéquatement, particulièrement dans les sols de textures moyennes à grossières (G2 et G3). Parallèlement, toutes textures confondues, les essais P ont été menés sur des sols ayant de faibles teneurs en P_{M3} avec une majorité (90 %) ayant des teneurs inférieurs à 100 ppm P_{M3} et un peu plus de la moitié avaient moins de 50 ppm.

Tableau 27. Répartition des blocs des essais P de blé de printemps, d'orge et d'avoine selon différentes classes de propriétés de sol après la validation des données

pH _{eau}		Saturation en P (ISP ₁ , %) ²				Teneur en P _{M3} (ppm)		Groupe de textures ³	
Seuil ¹	Bloc (%)	G1		G2-G3		Seuil	Bloc (%)	Seuil	Bloc (%)
		Seuil	Blocs (%)	Seuil	Bloc (%)				
< 5,8	16	≤ 3,8	35	≤ 6,5	70	< 50	51	G1	40
5,9 – 7,0	73	3,8 – 7,6	56	6,6 – 13,1	28	51-100	39	G2	35
> 7,0	11	7,7 – 15,2	6	13,2 – 20	2	101 – 150	6	G3	25
-	-	> 15,2	3	> 20	0	151 – 200	4	-	-
-	-	-	-	-	-	> 200	0	-	-

¹ Le pH optimal se situe entre 6,0 et 7,0 pour le blé et l'orge et entre 5,8 et 7,0 pour l'avoine (CRAAQ, 2010).

² ISP₁ : indice de saturation en phosphore = $[P_{M3} \text{ (ppm)} / Al_{M3} \text{ (ppm)}] \times 100$, éléments extraits au Mehlich-3 (Mehlich, 1984).

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

3.2 Détermination des doses agronomiques optimales

3.2.1 Recherche d'indicateurs de fertilité du sol

Dans la littérature scientifique, plusieurs indicateurs de sol permettent de prédire la biodisponibilité du P du sol et la réponse à la fertilisation phosphatée des cultures (Khiari et Parent, 2005 ; Menon et Chien, 1995 ; Parent *et al.*, 2002). Parmi ceux-ci, le P_{M3} , l'ISP₁, le pH_{eau} et la teneur en argile ont été vérifiés avec le test de Cate-Nelson (1971). Lorsque possible, ces indicateurs ont été testés à l'intérieur des groupes de textures G1, G2 et G3.

Dans le but d'alléger la présentation des résultats, seuls les paramètres statistiques de l'indicateur retenu et dont la valeur de *P* est inférieure à 0,12 sont présentés (Tableau 28). Les modèles ont été sélectionnés afin de maximiser leur sensibilité, leur spécificité et leur précision, en plus de présenter un rendement relatif supérieur à 70 %. Les valeurs critiques obtenues sont ensuite utilisées pour les analyses de variance en tant que seuils de réponse agronomique.

Parmi tous les indicateurs de fertilité testés, l'indice de saturation en P des sols s'est avéré un bon indicateur potentiel de la réponse des céréales à l'apport de P₂O₅ (Tableau 28). Les seuils obtenus varient de 3,6 % dans les sols G1 à 6,3 % dans les G3. Tel qu'attendu, des seuils plus élevés ont généralement été obtenus dans les sols de textures grossières (G3) en comparaison aux sols de textures fines (G1). En effet, d'un point de vue environnemental, les études de Khiari *et al.* (2000) et de Pellerin *et al.* (2006) rapportent que le seuil critique de diffusion environnemental du P est plus faible dans les sols de textures fines que dans les sols de textures moyennes à grossières. Les seuils critiques retenus par le *Règlement sur les exploitations agricoles* (REA) sont d'ailleurs supérieurs dans les sols de textures moyennes à grossières que dans les sols de textures fines (MDDEP, 2010). Pour les sols des groupes de textures G2 et G3, en plus du seuil critique de réponse de 5,0 % d'ISP₁, un deuxième seuil de 2,3 % a été retenu (Tableau 28). Ces deux seuils critiques significatifs ont permis d'obtenir des classes de fertilité plus homogènes et plus représentatives du patron de distribution des rendements relatifs en fonction du niveau de saturation en P des sols.

Tableau 28. Valeurs critiques des indicateurs potentiels de sols significatifs selon les tests Cate-Nelson pour les essais P de blé de printemps, d'orge et d'avoine

Indicateur de sol	Groupes de textures ²	Valeur critique (%)	RRel ⁴ (%)	Sensitivité	Spécificité	<i>P</i> ⁵
ISP ₁ ¹	G1, G2, G3	3,3	85	0,81	0,56	< 0,001***
	G2, G3 (1 ^{er} seuil) ³	5,0	85	0,45	0,69	< 0,001***
	G2, G3 (2 ^e seuil) ³	2,3	85	0,97	0,31	0,07 t
	G1	3,6	85	0,83	0,77	< 0,001***
	G2	3,2	85	0,78	0,66	< 0,001***
	G3	6,3	74	0,60	1,00	< 0,001***

¹ISP₁ : indice de saturation en phosphore = $[P_{M3} \text{ (ppm)} / Al_{M3} \text{ (ppm)}] \times 100$, éléments extraits au Mehlich-3 (1984).

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

³Dans le sol des groupes de textures G2-G3, deux seuils différents ont été retenus en raison du patron de distribution des rendements relatifs en fonction de la saturation en P du sol.

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

⁵*** : *P* < 0,001 ; t : tendance.

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

Les résultats des ANOVA sont illustrés à la Figure 18 (pour plus d'explication concernant l'interprétation de la figure, consulter la section 2.2.2). Quatre modèles sont présentés : un modèle sans indicateur (A) ; selon les groupes de textures (G1 vs G2-G3, B) ; selon l'ISP₁ dans les G1 (C) et selon l'ISP₁ dans les G2-G3 (D).

Les analyses de variance réalisées sur l'ensemble du jeu de données (modèle sans indicateur, N = 452) ont révélé que les céréales tendaient ($P = 0,073$) à répondre aux apports phosphatés, avec une dose optimale de 90 kg P₂O₅/ha (Figure 18 ; modèle A). Les gains de rendement associés à l'application de cette dose étaient toutefois faibles, avec une moyenne de 7 %, variant de 5 à 9 %. Lorsque les données étaient analysées selon le groupe de textures de sol (modèle B), aucune différence significative n'a été observée entre les doses dans les sols G2-G3 tandis que dans les sols G1, l'apport de 90 kg P₂O₅/ha a mené aux meilleurs rendements ($P = 0,090$). Cela dit, le gain moyen toutes doses confondues était plus constant pour les sols G2-G3.

La considération de seuils d'ISP₁ spécifiques aux groupes de textures du sol démontre que l'ampleur de la réponse à la fertilisation phosphatée diffère selon la saturation en P du sol. En effet, dans les sols G1 (modèle C), une réponse aux apports de P allant de moyenne à élevée a été observée en dessous du seuil d'ISP₁ de 3,6 %. La plus forte réponse à la fertilisation a été obtenue dans les sols ayant un ISP₁ inférieur à 1,8 % (seuil obtenu selon la procédure de Cope et Rouse [1973]). En effet, dans ces derniers, les gains de rendements moyens ont été de 28,7 % (variant de 9 à 49 %) suivant l'application de la dose de 90 kg P₂O₅/ha par rapport au témoin. La forte réponse à la fertilisation en P dans ces sols peut s'expliquer, entre autres, par leur faible ISP, ce qui induit un fort pouvoir fixateur du P apporté par la fertilisation. Selon la classification de Tran *et al.* (1990), 40 % de ces sols avaient une capacité de fixation du P moyenne à élevée ($Al_{M3} > 1100$ ppm). Mackenzie *et al.* (2003) rapportent également des gains de rendement variant entre 3 et 25 % pour le blé et l'orge en Alberta. Dans une méta-analyse, Valkama *et al.* (2011) rapportent une plus faible augmentation du rendement moyen (17 ± 2 %) pour les céréales à la suite de l'apport de P dans des sols argileux finlandais de faible concentration en P (< 3 mg P_{acétate d'ammonium}/L de sol). À l'opposé, Bélanger *et al.* (2015) n'ont pas observé d'augmentation de rendement en réponse à la fertilisation phosphatée dans des essais de blé menés au Québec et au Manitoba sur des sols faiblement à moyennement concentrés en P. Pour les sols G1 dont l'ISP₁ se trouve entre 1,8 et 3,6 %, la réponse à l'engrais a plafonné dès l'apport de la plus petite dose testée, soit 30 kg P₂O₅/ha avec un gain de rendement moyen de 7,6 % (variant de 2 à 14 %). De même que les sols de la classe de fertilité précédente ($ISP_1 \leq 1,8$ %), 41 % des sols avaient une capacité de fixation du P de moyenne à élevée ($Al_{M3} > 1100$ ppm), selon la classification de Tran *et al.* (1990). Il convient de mentionner que malgré l'absence de différence significative entre les traitements tant dans cette classe de fertilité de sol ($1,8 \% < ISP_1 \leq 3,6 \%$) que dans la suivante ($ISP_1 > 3,6 \%$), des gains de rendements plus importants ont été observés dans la première catégorie que dans la seconde.

Pour les sols G1 ayant un ISP₁ supérieur à 3,6 %, la productivité des parcelles fertilisées a été similaire à celle du témoin ($ROM \approx 1$), traduisant un effet négligeable de la fertilisation sur les rendements, étant donné leur faible pouvoir fixateur du P ($Al_{M3} < 1100$ ppm pour 79 % des parcelles). Les résultats de la présente étude sont en accord avec ceux de Valkama *et al.* (2011) qui démontrent une absence de réponse à la fertilisation en P dans les sols ayant une concentration moyenne ou élevée en P. Malgré cette absence d'effet sur le rendement, il a déjà été observé dans la littérature scientifique que l'apport du P au démarrage pouvait avoir un effet bénéfique pour les cultures céréalières (Cantin, 2003).

Dans les sols G2-G3, deux seuils agronomiques de saturation en P ont été retenus, soit 2,3 et 5,0 %. En dessous 2,3 % d'ISP₁, les cultures ont fortement répondu à la fertilisation en P. Dans ces sols, la dose de 90 kg P₂O₅/ha a mené à l'obtention du rendement agronomique optimal avec un gain de rendement moyen de 12 % (variation de 6 à 19 %). Similairement aux sols G1 ayant un ISP₁ inférieur à 1,8 %, la forte réponse à la fertilisation en P dans ces sols peut s'expliquer par leur pouvoir fixateur du P apporté par fertilisation. En effet, 57 % de ces sols avaient une capacité de fixation du P moyenne (1100 ppm < Al_{M3} < 1600 ppm) et 28 % avaient une capacité de fixation du P élevée (Al_{M3} > 1600 ppm) selon la classification de Tran *et al.* (1990). Par conséquent, le P apporté sur ces sols par fertilisation se transformera rapidement en des formes de moins en moins disponibles pour les cultures (Benjannet *et al.*, 2018). Pour les sols G2-G3 ayant un ISP₁ entre 2,4 et 5,0 %, la plus petite dose testée (30 kg P₂O₅/ha) a permis d'obtenir le meilleur rendement. Pour cette catégorie de sol, les gains associés à l'application de cette dose de P par rapport au témoin ont été toutefois modestes. Les études Benjannet *et al.* (2018) à l'Île-du-Prince-Édouard, rapportent que les sols ayant un ISP₁ entre 2,4 et 5,0 % présentent un risque environnemental de diffusion du P très faible à faible selon leur pH_{eau}, en raison de leur forte capacité de fixation du P. Environ la moitié (51 %) de ces sols avaient une capacité de fixation moyenne à élevée (Al_{M3} > 1100 ppm). Au-delà du seuil agronomique d'ISP₁ de 5,0 %, les gains de rendements obtenus dans les parcelles fertilisées sont en moyenne similaires à ceux obtenus dans la classe de fertilité précédente. Toutefois, l'analyse des données montre un plus faible pouvoir fixateur du P et une plus faible teneur en P disponible. Valkama *et al.* (2011) ont observé une absence de réponse à la fertilisation en P dans les sols de texture grossière ayant une concentration moyenne ou élevée en P.

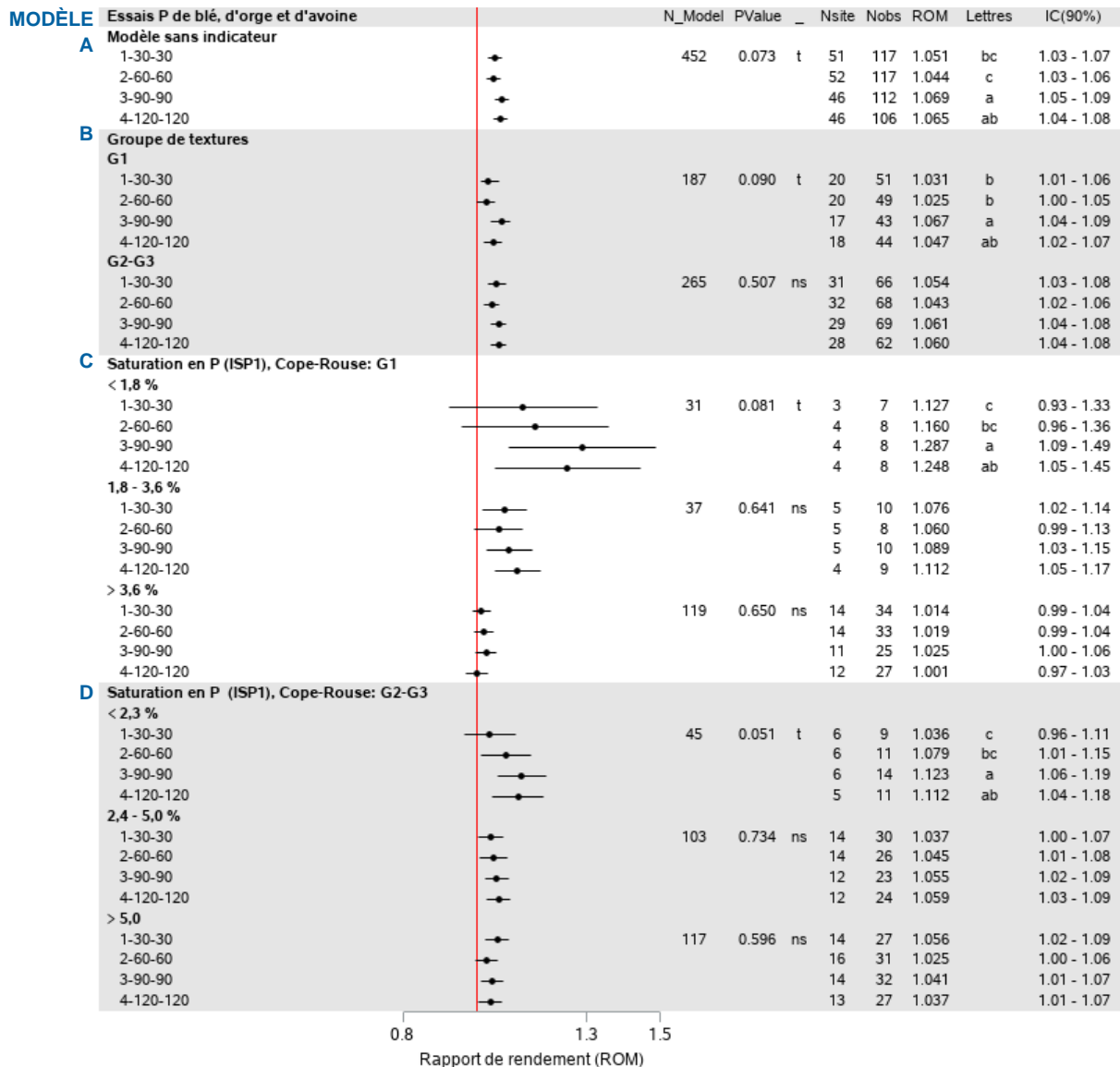


Figure 18. Résultats des analyses de variance sur la réponse des céréales (blé de printemps, orge et avoine) aux doses croissantes de phosphore. G1 : sols à texture fine ; G2 : sols à texture moyenne ; G3 : sols à texture grossière ; N_model : nombre d'observations du modèle ; Nsite : nombre de sites ; 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.

3.2.3 Considération de la verse

La fréquence et la gravité de la verse ont différé de manière non négligeable entre les trois céréales à l'étude. Conséquemment, les données traitant de la verse ont été analysées séparément par culture. La verse a été la plus importante dans l'avoine, suivie de l'orge et du blé.

Les essais P du blé ont été très peu atteints par de la verse sévère : en effet, trois essais seulement en ont enregistré, dans un total de neuf unités expérimentales (4,5 % des données). Les doses testées dans ces unités

expérimentales ont varié entre 0 et 120 kg P₂O₅/ha. La verse modérée, quant à elle, a affecté 11,0 % des unités expérimentales des essais P du blé. Les analyses de fréquence n'ont donc pas révélé d'effet significatif de la dose de P₂O₅ sur l'occurrence de la verse sévère ou modérée. Les conclusions sont les mêmes à l'intérieur des groupes de textures G1 et G2-G3, probablement en raison de la très faible occurrence de verse dans les essais de cette culture.

Les essais P de l'orge ont été touchés davantage par la verse, bien qu'à l'instar des essais de blé, l'effet de la dose de P₂O₅ sur la verse ait été non significatif dans les deux grands groupes de textures (G1 et G2-G3). Dans les essais réalisés dans les sols G1, toutefois, les proportions de parcelles versées sévèrement varient de 30 % pour les doses de 30 et de 120 kg P₂O₅/ha à 41 % pour la dose de 60 kg P₂O₅/ha, comparativement à 24 % pour le témoin (données non présentées). À l'opposé, les parcelles ont été très peu versées dans les sols G2-G3. Pour ces sols, seulement le traitement témoin et la dose de 120 kg P₂O₅/ha ont eu des parcelles versées sévèrement (7 et 8 % de verse pour ces deux traitements, respectivement). Contrairement aux résultats qui précèdent, les travaux de Mulder (1954) et de Pinthus (1974) ont rapporté une augmentation de la verse dans l'orge causée par une augmentation des doses de P₂O₅. Selon ces auteurs, cet effet pourrait être attribuable à l'interaction entre l'absorption du N et du P par la plante : les plus fortes doses de P₂O₅ entraîneraient un prélèvement du N supérieur dans la plante. Les observations de la présente étude ne permettent pas de confirmer cette hypothèse, les parcelles témoins n'ayant pas été moins sujettes à la verse sévère en comparaison des autres traitements. De surcroît, l'analyse des données démontre que l'apparition de la verse semble davantage causée par des effets de sites ou de variétés que par un effet de la fertilisation phosphatée.

Une plus grande occurrence de la verse a été mesurée pour l'avoine, en comparaison aux deux autres céréales, bien que l'effet de la dose sur l'occurrence de la verse demeure non significatif ($P = 0,31$). Dans l'ensemble, une portion non négligeable des parcelles des essais P a été sujette à la verse sévère. Toutes les textures confondues, le pourcentage de parcelles versées sévèrement varie de 22 % pour la dose de 30 kg P₂O₅/ha à 36 % pour la dose de 120 kg P₂O₅/ha, comparativement à 26 % pour le témoin (données non présentées). Lorsqu'analysées en tenant compte des groupes de textures de sols (G1 vs G2-G3), les données ne démontrent pas d'effet de la dose sur la verse dans les sols G1 ($P = 0,932$), ni dans les sols G2 et G3 ($P = 0,255$). Dans ces derniers sols, la plus forte fréquence d'apparition de la verse sévère a été obtenue avec l'apport de la dose de 120 kg P₂O₅/ha où 33 % des parcelles ont versé, suivies des parcelles témoins (29 % des parcelles). Entre ces deux traitements, l'occurrence de la verse était similaire entre les doses de P₂O₅. Ainsi, ces observations ne concordent pas à celles de Mulder (1954) et de Pinthus (1974) selon lesquelles une augmentation de la dose de P₂O₅ augmente la verse au moyen d'une interaction entre le N et le P. De plus, l'occurrence de la verse pourrait être plus liée à un effet de site ou de variété qu'à un effet de la fertilisation en P. La considération de tous les essais NPK réalisés sur l'avoine soutient cette observation, car peu importe l'élément testé (N, P ou K), les sites et les cultivars versés sont les mêmes. Les cultivars qui ont été sujets à la verse dans les essais P sont, par ordre d'importance : CDC Orrin, Dieter, Synextra et Nice.

3.2.4 Considération de la qualité des grains

La qualité des grains a été évaluée au moyen de leur teneur en protéines. Comme le contenu en protéines diffère selon la céréale à l'étude et que les critères de classement varient en fonction des marchés visés pour chaque céréale, les cultures ont fait l'objet d'analyses séparées. Dans le blé et l'orge, aucun effet de la dose de P_2O_5 n'a été observé en considérant l'ensemble du jeu de données ($P > 0,12$; Figure 19). Les teneurs en protéines ont varié entre 14,1 à 14,3 % dans les essais de blé ; et entre 11,3 et 11,5 % dans ceux d'orge. L'effet de la dose a également été vérifié dans les essais de blé panifiable, dans les essais réalisés dans les sols G1 et enfin, dans les sols G2 et G3 ; dans tous les cas, la teneur en protéines n'a pas été significativement affectée par la dose de P. Les mêmes conclusions ont été constatées dans l'orge quant aux groupes de textures.

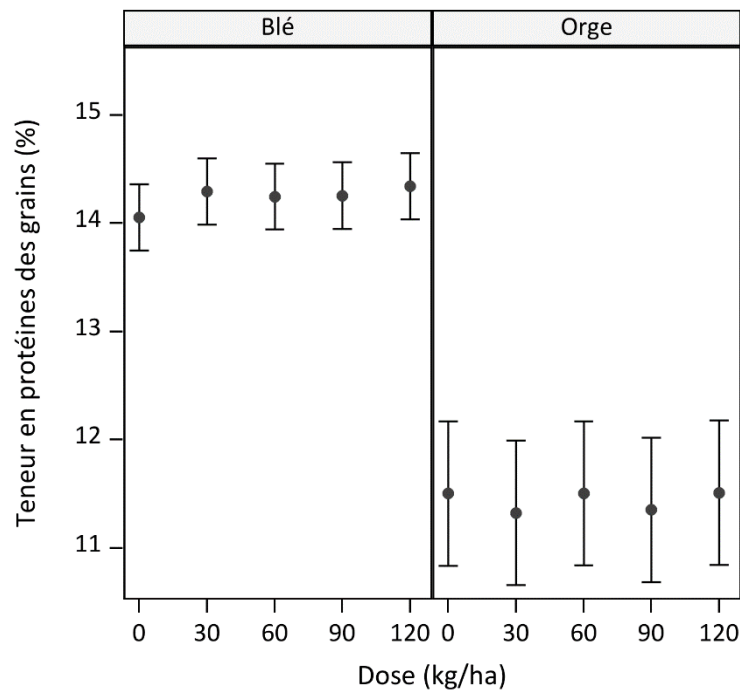


Figure 19. Teneur en protéines du blé de printemps et de l'orge en fonction des doses de phosphore. Valeurs estimées du modèle statistique et erreurs types ($P > 0,12$). Les teneurs en protéines du blé sont rapportées sur une base de 13,5 % d'humidité tandis que celles de l'orge sont rapportées en base sèche (0 % d'humidité).

Dans l'avoine, les données ont été analysées sans distinction quant au marché visé (alimentation humaine ou animale). Les résultats ont montré que l'effet de la fertilisation sur la teneur en protéines a varié en fonction de la texture du sol (Figure 20). En effet, dans les sols de type G1, la teneur en protéines a augmenté significativement avec l'application des doses croissantes de P_2O_5 ($P = 0,016$). À l'opposé, aucun effet significatif n'a été observé dans les sols G2-G3 ($P = 0,767$). Les teneurs en protéines des grains ont varié de 13,0 à 14,0 % et de 14,0 à 14,4 % dans les sols G1 et G2-G3, respectivement. Dans les sols G1, la plus forte concentration en protéines a été obtenue avec l'application de la plus forte dose testée (120 kg P_2O_5 /ha ; Figure 20). Cette augmentation de la concentration en protéines des grains parallèlement à l'augmentation du P_2O_5 pourrait être attribuable à une interaction positive entre les prélèvements en N et en P chez la plante : l'augmentation de la disponibilité en P entraînerait une augmentation du prélèvement en N par la plante. En effet, Eppendorfer (1978) a démontré que la fertilisation en P n'affectait pas directement la composition des protéines (en acides aminés)

dans les grains. Le P se limite plutôt à influencer la concentration en N de ceux-ci. Toutefois, selon ce dernier auteur, de plus faibles concentrations en protéines seraient attendues avec les plus fortes doses de P_2O_5 en raison de l'effet de dilution causé par l'obtention de plus hauts rendements.

Comparativement aux sols G1, les données des sols G2 et G3 ont présenté des teneurs en protéines plus élevées pour les mêmes traitements. Or, c'est plutôt l'effet inverse qui était attendu. En effet, dans les sols argileux, le niveau de fertilité en N, élément constituant majeur des protéines, est généralement plus élevé en comparaison aux sols sableux. Ceci s'explique par le fait que la réserve de N organique est plus grande dans les sols à texture fine, ce qui favorise un apport plus constant en azote en cours de saison (N'Dayegamiye *et al.*, 2007).

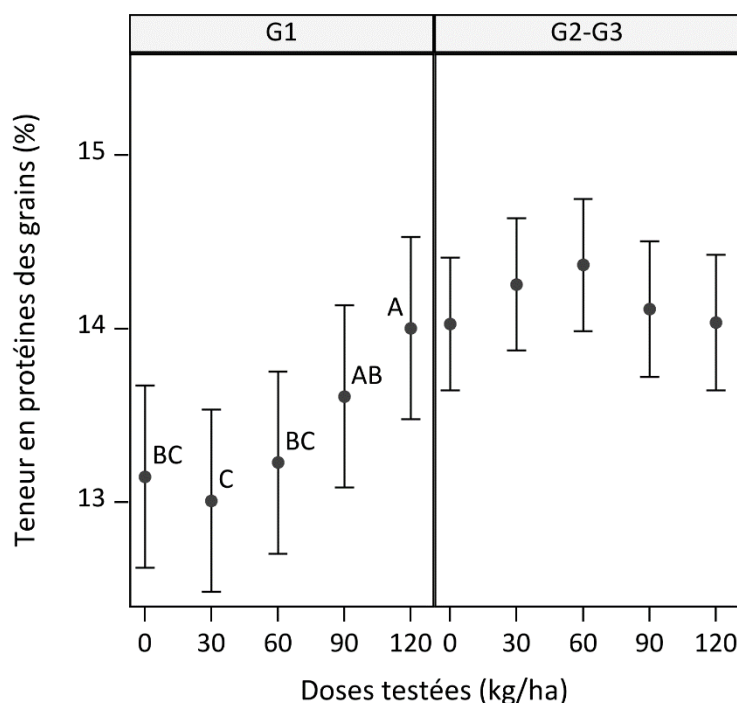


Figure 20. Teneur en protéines de l'avoine en fonction des doses de phosphore selon les groupes de textures de sol. Valeurs estimées présentées avec les erreurs types et les résultats du test de comparaison de moyennes LSD à 0,05. Les lettres indiquent les différences significatives entre les doses. Les teneurs en protéines sont rapportées sur une base sèche (0 % d'humidité).

3.3 Diagnostic nutritionnel et exportations en phosphore

Les concentrations et les exportations de P_2O_5 dans les grains et la paille (stabilisée à 14 % d'humidité) du blé, de l'orge et de l'avoine sont présentées dans le Tableau 29. Les concentrations moyennes de P_2O_5 dans les grains sont de $10,2 \pm 0,3$ kg/t, de $9,4 \pm 0,5$ kg/t et de $8,9 \pm 0,6$ kg/t pour l'avoine, le blé et d'orge, respectivement. De même que pour les grains, l'analyse de la paille montre que les concentrations en P_2O_5 des tissus sont en moyennes plus élevées pour l'avoine ($2,7 \pm 0,9$ kg/t), suivies de l'orge ($2,2 \pm 0,6$ kg/t) et du blé ($1,4 \pm 0,2$ kg/t).

Pour le blé et l'orge, les concentrations obtenues dans la présente étude sont similaires à celles présentées actuellement dans le guide du CRAAQ (CRAAQ, 2010) qui sont respectivement de $10,2 \pm 1,1$ kg P_2O_5 /tonne de matière sèche de grains (équivalent à $8,77 \pm 0,95$ kg/t de grains à 14 % d'humidité) et de $9,5 \pm 1,2$ kg P_2O_5 /tonne de matière sèche (équivalent à $8,2 \pm 1,0$ kg/t de grains à 14 % d'humidité). Dans le cas de l'avoine, la concentration en P_2O_5 des grains de cette étude est légèrement supérieure à celle présentée dans l'actuel guide du CRAAQ (2010) qui est de $10,8 \pm 1,2$ kg/tonne de matière sèche, équivalente à $9,3 \pm 1,0$ kg/t de grains à 14 % d'humidité.

De même que pour le N, la concentration en P_2O_5 du grain varie peu entre les variétés pour les trois cultures (données non présentées). Cependant, la Figure 21 montre que les exportations en P_2O_5 du blé, de l'orge et de l'avoine varient généralement de façon linéaire avec le rendement et que, hormis l'orge, certaines variétés ont tendance à produire de meilleurs rendements. Le patron de distribution des points permet de conclure que les différences au niveau de l'exportation en P_2O_5 entre les cultivars seraient principalement attribuables à de plus grandes productivités plutôt qu'à une variation de la concentration du P dans les grains (Figure 21). Il est également à noter que la plus grande productivité de certaines variétés peut refléter un effet de site si cette dernière a été utilisée dans un seul essai.

Bien que les concentrations en P_2O_5 dans les tissus soient un peu variables entre les trois cultures, les différences observées au niveau des productions de rendement entraînent une similarité entre les quantités de P_2O_5 exportées par ces cultures. En effet, malgré le fait que l'avoine montre des concentrations plus élevées, sa plus faible production de rendements en grains comparativement aux deux autres cultures ramène les exportations à un même niveau (Tableau 29). Les exportations en P_2O_5 de la population de tête, dans le cas où la paille est laissée au champ, sont donc en moyenne de 49 kg/ha pour le blé, 50 kg/ha pour l'orge et de 48 kg/ha pour l'avoine (Tableau 29B). Si la paille est récoltée, les exportations de P_2O_5 (grains et paille) totalisent, en moyenne, 55 kg/ha pour le blé, 59 kg/ha pour l'orge et 60 kg/ha pour l'avoine. Toutefois, les exportations en P_2O_5 de la paille ont été plus faibles pour le blé en comparaison aux deux autres cultures.

Tableau 29. (A) Concentration et (B) exportations de phosphore des céréales (blé, orge et avoine) selon le diagnostic nutritionnel et (C) rendements moyens associés à la population de tête dans les grains et la paille

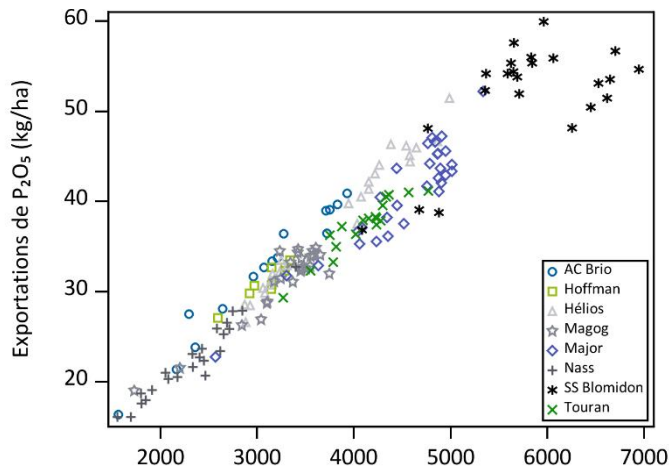
	Grains						Paille																	
	Blé		Orge		Avoine		Blé		Orge		Avoine													
(A)													Concentration en P₂O₅ (kg/tonne humide) ²											
Haut rdt ¹ et équilibre nutritionnel (« population de tête »)	9,4 ± 0,5		8,9 ± 0,6		10,2 ± 0,3		1,4 ± 0,2		2,2 ± 0,6		2,7 ± 0,9													
Faible rdt et équilibre nutritionnel	9,8 ± 0,3		9,1 ± 0,7		10,0 ± 0,9		1,7 ± 0,4		2,5 ± 0,7		2,1 ± 0,5													
Faible rdt et déséquilibre nutritionnel	9,6 ± 0,7		9,1 ± 1,0		10,9 ± 1,3		1,9 ± 0,6		3,2 ± 1,6		3,3 ± 1,3													
Haut rdt et déséquilibre nutritionnel	8,3 ± 0,6		8,8 ± 0,8		11,3 ± 0,9		1,5 ± 0,2		2,4 ± 1,1		2,8 ± 0,9													
(B)													Exportations en P₂O₅ (kg/ha) ³											
	Moy	Med	Min	Max	Moy	Med	Min	Max	Moy	Med	Min	Max	Moy	Med	Min	Max	Moy	Med	Min	Max	Moy	Med	Min	Max
Haut rdt et équilibre nutritionnel (« population de tête »)	49	47	41	60	50	50	43	53	48	47	44	54	6	6	5	9	9	8	5	17	12	11	6	20
Faible rdt et équilibre nutritionnel	40	41	21	46	40	39	26	51	42	44	37	46	7	7	3	8	8	8	3	16	8	8	6	11
Faible rdt et déséquilibre nutritionnel	32	33	16	48	35	36	10	48	37	37	17	55	6	6	2	12	10	8	3	27	12	11	3	31
Haut rdt et déséquilibre nutritionnel	52	53	39	57	49	48	43	59	56	54	46	68	9	8	7	11	9	8	5	17	12	11	6	22
(C)													Rendement de la population de tête (kg/ha)											
Haut rdt et équilibre nutritionnel (« population de tête »)	5170				5602				4667				4593				3974				4256			

¹ Rdt : Rendement.

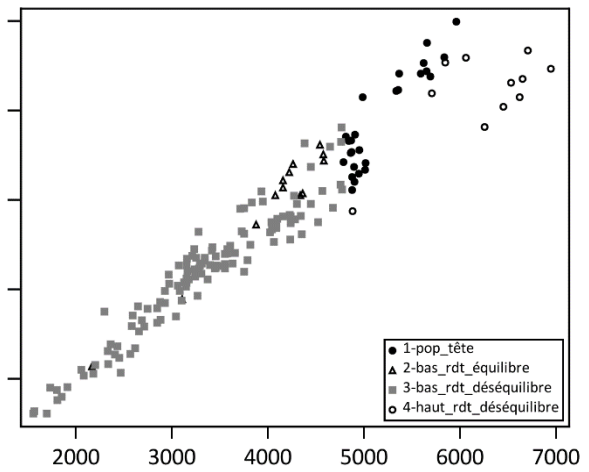
² Les valeurs sont exprimées sur la base d'une humidité moyenne de 14 %.

³ Moy : moyenne ; Med : médiane ; Min : valeur minimale ; Max : valeur maximale.

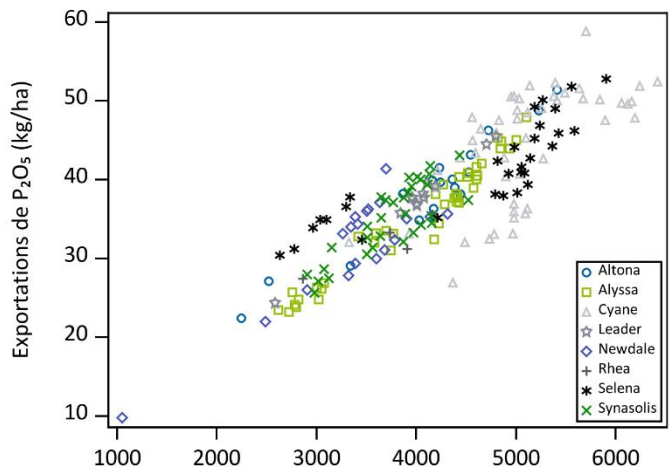
Blé de printemps (A)



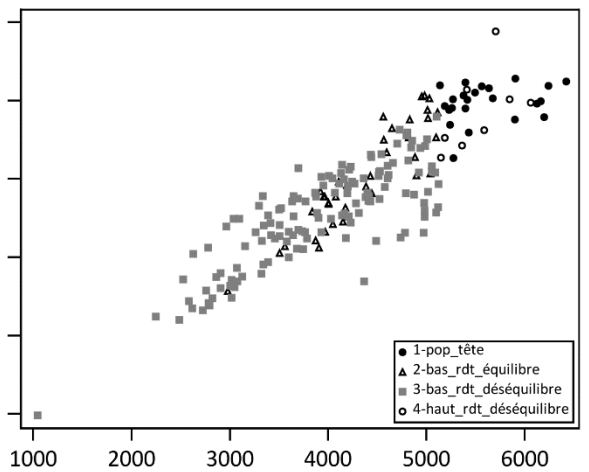
(B)



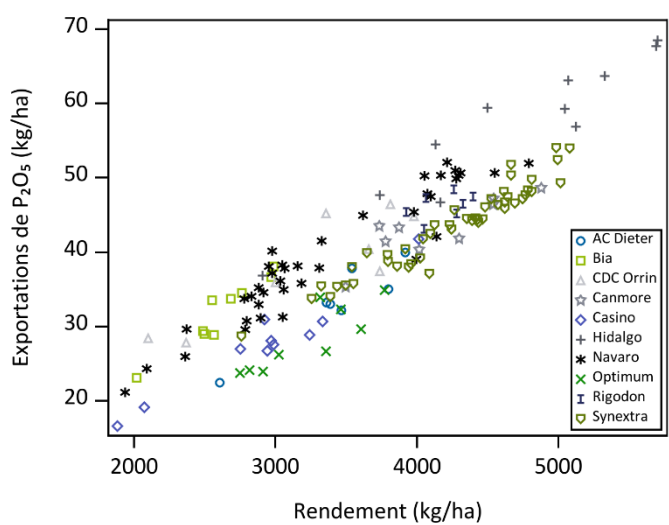
Orge (C)



(D)



Avoine (E)



(F)

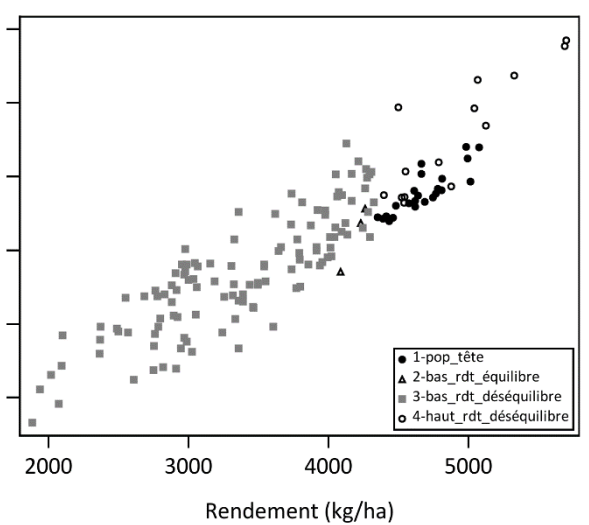


Figure 21. Exportations de phosphore du blé de printemps, de l'orge et de l'avoine en fonction des rendements en grains selon les variétés (A, C, E) et le diagnostic nutritionnel (B, D, F).

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

Les recommandations en P_2O_5 suggérées pour les cultures du blé, de l'orge et de l'avoine sont présentées au Tableau 30. Afin de favoriser la protection de l'environnement et de minimiser les pertes de P, les classes de fertilité ont tenu compte des seuils agroenvironnementaux du REA. Ces nouvelles recommandations considèrent aussi l'indice de saturation en P (ISP_1) du sol, un indicateur agroenvironnemental plus fiable et plus performant que la considération du P_{M3} seul afin d'évaluer la disponibilité du P. Enfin, les VSRF ont été établies distinctement selon les groupes de textures.

Dans les sols du groupe de textures G1, quatre classes de fertilité ont été retenues à partir des seuils d' ISP_1 de 1,8 %, 3,6 % et de 7,6 %. Dans les sols ayant un ISP_1 inférieur à 1,8 %, la dose de 90 kg P_2O_5 /ha est proposée. Entre 1,9 et 3,6 % d' ISP_1 , la plus petite dose testée, 30 kg P_2O_5 /ha, a permis d'obtenir le rendement optimal. Toutefois, le choix d'une dose basée sur les exportations des cultures serait préférable pour cette catégorie de sols. En effet, selon une étude de Giroux *et al.* (2002), un bilan d'apport équilibré ou légèrement supérieur de 20-30 kg/ha de P_2O_5 à la surface du sol (apports de P inférieurs aux exportations des cultures) entraînerait une diminution de la teneur en P disponible dans les sols déjà faiblement saturés en P. Ainsi, un bilan équilibré ou modérément excédentaire serait nécessaire afin de maintenir le même niveau de teneur en P et surtout le P disponible en solution du sol dont la dynamique est affectée plus rapidement (ou fortement) que celle de l' ISP_1 (Zheng *et al.* 2003). En dépit des gains de rendement plus faibles que dans la 1^{re} classe pour ces sols, l'apport du P par fertilisation reste nécessaire en vue d'éviter d'abaisser la teneur en P disponible, suivant la rétroversion du P dans le sol et les exportations par la plante. La dose de 60 kg P_2O_5 /ha visant à combler les exportations serait donc proposée pour cette catégorie de sol. Le choix de cette dose est donc basé sur les exportations des trois cultures qui sont en moyenne de 55 kg/ha pour le blé, de 59 kg/ha pour l'orge et de 60 kg/ha pour l'avoine. Dans les sols G1 ayant un ISP_1 compris entre 3,6 % et 7,6 % la dose optimale de 30 kg P_2O_5 /ha a été retenue, soit la plus petite dose testée. Les gains de rendement observés y sont plus modestes que dans les classes précédentes, mais l'objectif est de maintenir un certain niveau de fertilité phosphatée, tel qu'expliqué précédemment. Enfin, au-delà du seuil agroenvironnemental de 7,6 %, la recommandation d'un apport nul est favorisée.

Dans les sols G2-G3, trois seuils d' ISP_1 de 2,3 %, 5,0 % et 13,1 % ont permis de distinguer quatre classes de fertilité. Pour les sols ayant un ISP_1 inférieur ou égal à 2,3 %, la dose agronomique optimale de 90 kg P_2O_5 /ha a été retenue. Pour la deuxième classe de fertilité du sol (2,4 à 5,0 % d' ISP_1), la dose de 30 kg P_2O_5 /ha a permis d'obtenir le rendement optimal, cependant, en raison de la capacité de fixation du P de ces sols, la dose de 60 kg P_2O_5 /ha a été retenue. Tel qu'expliqué pour les sols G1 dans le paragraphe précédent, le choix de cette dose considère les exportations des trois cultures et vise l'adoption d'un bilan équilibré du P sur les sols, ce qui permettra d'éviter une baisse à court terme du P disponible des sols à la suite de la transformation du P dans le sol et des exportations par la plante. En ce qui a trait à la dernière classe, il faut noter qu'aucun site des groupes de textures G2 et G3 n'avait un ISP_1 supérieur à 13,1 % dans les essais d'orge et d'avoine. Seulement 2 % du jeu de données (7 observations provenant des essais de blé) ont eu un ISP_1 situé au-delà de ce seuil. Par conséquent, aucune analyse statistique n'a été effectuée. Cependant, étant donné le peu de réponse dans les sols ayant un ISP_1 compris entre 5,0 et 13,1, les probabilités d'observer une réponse en sol saturé demeurent faibles et

l'obtention d'une réponse n'était pas attendue dans cette catégorie de sol. Ainsi, la recommandation d'un apport nul est favorisée dans les sols G2-G3 ayant un ISP_1 supérieur au seuil agroenvironnemental de 13,1 %.

En général, les recommandations faites dans le cadre de cette étude sont similaires à celles actuellement utilisées au Québec par le CRAAQ (2010). Comparativement aux grilles de fertilisation étrangères, les recommandations sont généralement plus faibles ou similaires que celles des autres provinces et états. Il convient de mentionner que les VSRF sont établies à partir des essais de fertilisation où les deux autres éléments majeurs (N et K) ont été apportés en quantité suffisante pour le développement de la céréale. Plusieurs auteurs ont observé des interactions entre les apports en P et les apports en N (Gilson *et al.*, 1958) ou en K (Hackett, 1966) sur le rendement en grains. Une fertilisation complémentaire équilibrée doit donc être suivie.

Tableau 30. Fertilisation phosphatée du blé de printemps, de l'orge et de l'avoine – 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	≤ 1,8	Au semis, incorporé	90 ⁵
	1,9 – 3,6		(60) ⁶
	3,7 – 7,6		30 ⁵
	> 7,6		0 ⁷
G2, G3	≤ 2,3	Au semis, incorporé	90 ⁵
	2,4 – 5,0		(60) ⁶
	5,1 – 13,1		30 ⁵
	> 13,1		0 ⁷

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

² ISP_1 : saturation en P du sol = $[P_{M3} \text{ (ppm)} / Al_{M3} \text{ (ppm)}] \times 100$, éléments extraits au Mehlich-3 (Mehlich, 1984) et dosé par spectroscopie d'émission au plasma (SEP ou ICP : *Inductively coupled plasma*).

³ Les catégories ont été déterminées en tenant compte des seuils environnementaux du REA (Règlement sur les Exploitations Agricoles ; MDDEP, 2010).

⁴ VSRF : Valeurs scientifiques de référence en fertilisation.

⁵ Dose agronomique optimale pour cette catégorie de sols.

⁶ Dose proposée, basée sur les exportations des cultures, en vue de limiter les risques de perte de rendements et de diminution rapide de la fertilité phosphatée des sols faiblement saturés et fixateurs en P. L'exportation en P₂O₅ est en moyenne de 55 kg/ha pour le blé, 59 kg/ha pour l'orge et de 60 kg/ha pour l'avoine.

⁷ Dose nulle considérant l'absence de gain par la fertilisation dans cette catégorie de sols.



Dans les sols du groupe de textures G1 ayant un ISP_1 compris entre 1,9 % et 3,6 %, et dans les sols G2-G3 ayant un ISP_1 compris entre 2,4 % et 5,0, les choix des doses sont basés sur les exportations de la culture plutôt que sur les gains de rendement afin d'éviter de diminuer davantage la teneur en P disponible des sols en raison d'un bilan de P négatif sur les sols.

Dans les sols du groupe de textures G1 ayant un $ISP_1 > 7,6$ %, et dans les sols G2-G3 ayant un $ISP_1 > 13,1$ %, un apport nul a été recommandé. S'il était jugé plus prudent de recommander un apport afin d'assurer un bon démarrage des plantules, particulièrement en cas de printemps froid, l'intervalle 0 – 20 kg P₂O₅/ha pourrait être proposé.

Tableau 31. Comparaison des recommandations en P₂O₅ pour la production de blé de printemps, d'orge et d'avoine au Canada et à l'étranger

Provinces /États	Mode et période d'application	Fractionnement	Indicateurs		Dose P ₂ O ₅ (kg/ha)			Source
			Fertilité du sol ¹	Autres	Blé	Orge	Avoine	
Québec (CAN)	-	-	0-13 ppm P _{M-3}	-	80	80	70	CRAAQ (2010)
			14-27	-	65	65	50	
			28-40	-	45	45	40	
			41-54	-	35	35	30	
			55-67	-	30	30	20	
			68-112 112 et +	-	0-20 0	0-20 0	0-20 0	
Ontario (CAN)	Blé, orge : Privilégier l'application simultanée du P avec la semence ; Avoine : Avant les semis, incorporés	-	P bicarbonate de sodium	-	0-110	0-110	0-70	MAAARO (2017)
Nouveau-Brunswick (CAN)	-	-	P du sol	-	20-100	20-100	0-68	New Brunswick Department of Agriculture, Fisheries and Aquaculture (2001)
Prairie (CAN)	Placer la moitié de la quantité de P avec la semence.	-	P	-	-	-	20-30	Prairie Oat Production Manual (2010)
Alberta ² (CAN)	Avoine, blé : Dans la ligne de semis ou en bande, à l'automne ou au printemps.	-	Orge : P _{Kelowna/Kelowna} modifié	Type de sol, Précédent cultural	11-45	0-56	0-50	Orge, avoine : Alberta Agriculture and Rural Development (2008) ; Blé : Alberta Agriculture and Rural Development (2004)
Minnesota (É-U)	À la volée, incorporé	-	P _{Bray I} , P _{Olsen}	Objectif de rendement	En bande : 0-45 À la volée : 0-90	En bande : 0-39 À la volée : 0-78	0-78	University of Minnesota extension (2018)
Vermont (É-U) ³	-	-	P Morgan modifié	-	0-134	0-134	0-134	University of Vermont Extension (2017)
Wisconsin (É-U)	-	-	Texture du sol, P _{Bray I}	Objectif de rendement	0-106	0-84	0-78	Laboski et Peters (2012)

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

² Dans les sols pauvres, frais et humides, il est généralement avantageux d'apporter 10 à 15 lb/acre (11 à 17 (kg/ha) de P₂O₅ avec la semence.

³ Un démarreur de 11-22 kg P₂O₅/ha (10-20 lb/acres) est recommandé dans des conditions de semis hâtif, de drainage limitant et de labour conventionnel.

Dans le but d'homogénéiser les unités et faciliter les comparaisons, les coefficients suivants ont été utilisés lorsque nécessaire :

1 ppm = 2,24 kg/ha ; 1 lb/ac = 1,12 kg/ha ; 1 t de blé = 36,744 0 bu ; 1 t d'orge = 45,93 bu ; 1 ac = 0,404 69 ha.

4. FERTILISATION POTASSIQUE

À l’instar de la méthode employée pour la détermination des VSRF de phosphore au chapitre précédent, les données des essais K de blé, d’orge et d’avoine ont été analysées conjointement. Cette mise en commun des jeux de données est soutenue par la régie de fertilisation potassique similaire entre les trois cultures, de même que par des exportations en K_2O qui sont du même ordre. Cette mise en commun a permis notamment permis une meilleure couverture du spectre des teneurs en K_{M3} des sols dans tous les groupes de textures. Plus spécifiquement, aucun essai de blé n’avait été effectué en sol G1 peu pourvu en K_{M3} (< 100 ppm), ce qui constituait une lacune de représentativité. Bien que la teneur en K du sol soit généralement corrélée à la teneur en argile du sol (Sharpley, 1989), certains sols G1 (riches en argile) peuvent avoir une faible teneur en K_{M3} sur le territoire québécois comme le démontrent certains essais d’orge et d’avoine qui ont été réalisés sur ces types de sols.

4.1 Portrait et représentativité des données

La répartition des blocs des essais K des trois céréales combinées selon différentes classes de propriétés de sol (0-20 cm) est présentée au Tableau 32. Dans les sols à texture fine (G1), 17 % des blocs des essais étaient sur des sols de moins de 100 ppm de K_{M3} et 21 % se trouvaient dans l’intervalle 101 à 200 ppm de K_{M3} . Une majorité des essais réalisés en sols G1 se trouvaient toutefois dans la partie supérieure du spectre de richesse en K_{M3} , avec 62 % des blocs qui détenaient plus de 201 ppm. Dans les sols à texture moyenne à grossière (G2-G3), ce sont plutôt les sols faiblement pourvus en K_{M3} qui prévalaient, avec 78 % des blocs qui avaient moins de 100 ppm. Cette répartition est adéquate en vue de la détermination de la réponse à la fertilisation potassique sous différentes teneurs en K_{M3} sur différentes textures de sol. Ces dernières étaient réparties de façon équilibrée entre les trois groupes, soit 38, 35 et 27 % respectivement pour G1, G2 et G3.

Tableau 32. Répartition des blocs des essais K selon différentes classes de propriétés de sol après la validation des données

pH _{eau}		Teneur en K_{M3} (ppm)				Groupe de textures ²		Teneur en argile	
Seuil ¹	Blocs (%)	G1		G2-G3		Seuil	Blocs (%)	Seuil	Blocs (%)
		Seuil	Blocs (%)	Seuil	Blocs (%)				
< 5,8	19	≤ 100	17	≤ 100	78	G1	38	≤ 30 %	65
5,8 – 7,0	73	101 – 200	21	101 – 200	20	G2	35	31 – 60 %	22
> 7,0	7	201 – 300	46	201 – 300	2	G3	27	> 60 %	10
-	-	301 – 400	13	301 – 400	-	-	-	nd	3
-	-	> 400	3	> 400	-	-	-	-	-

¹ Le pH optimal de l’avoine est de 5,8 à 7,0 et tandis que celui du blé et de l’orge est de 6,0 à 7,0 (CRAAQ, 2010).

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

nd : non disponible.

4.2 Détermination des doses agronomiques optimales

4.2.1 Recherche d’indicateurs de fertilité du sol

Plusieurs facteurs peuvent influencer la biodisponibilité du K dans le sol et par conséquent, influencer la réponse du blé, de l’orge et de l’avoine aux apports d’engrais potassique. Le potentiel de plusieurs indicateurs à expliquer

la réponse à la fertilisation des sols a donc été vérifié avec le test de Cate-Nelson (1971) : la teneur du sol en K extrait par la méthode Mehlich-3 (K_{M3}), la teneur du sol en argile, la CEC et différents ratios de K_{M3} sur des teneurs de bases échangeables (CEC, Ca, Mg). Lorsque c'était possible, les indicateurs ont été testés par groupe de textures de sols (G1, G2 et G3).

Pour alléger la présentation des résultats, seuls les résultats des tests de l'indicateur retenu et dont la valeur de P est inférieure à 0,12 sont présentés au Tableau 33. Les modèles ont été sélectionnés afin de maximiser leur sensibilité, leur spécificité et leur précision, en plus de présenter un rendement relatif supérieur à 70 %. Les valeurs critiques obtenues ont ensuite été utilisées pour les analyses de variance en tant que seuils agronomiques de réponse.

Tableau 33. Valeurs critiques des indicateurs de sols significatifs selon les tests de Cate-Nelson pour les essais K dans les essais de blé, d'orge et d'avoine

Indicateur de sol	Groupe de textures ¹	Valeur critique	RRel (%) ²	Sensitivité	Spécificité	P ³	
K Mehlich-3	G1, G2, G3	90,4 ppm	83	0,56	0,63	< 0,001	***
	G1	165,0 ppm	89	0,80	0,53	< 0,001	***
	G2	80,0 ppm	84	0,43	0,94	< 0,001	***
	G3	77,2 ppm	90	0,70	0,71	< 0,001	***
	G2, G3	73,6 ppm	89	0,59	0,72	< 0,001	***

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

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

³ *** : $P < 0,001$.

4.2.2 Effet de la dose de potassium sur les rendements en grains

Les résultats des analyses de variance (ANOVA) des essais K combinés du blé, de l'orge et de l'avoine sont présentés à la Figure 22 (voir la section 2.2.2 pour les explications sur l'interprétation de la figure et des résultats). Parmi les modèles envisagés, seuls ceux permettant l'interprétation agronomique de la réponse à la fertilisation sont présentés.

D'abord, une ANOVA a été effectuée sans tenir compte des indicateurs de fertilité des sols afin de visualiser globalement l'effet de la fertilisation sur le rapport de rendement (ROM) des trois céréales à l'étude (Figure 22A). Ce modèle (A) a démontré un effet significatif ($P = 0,002$, $N = 589$) de l'apports des doses croissantes de K sur le ROM. Considérant les résultats de ce modèle, la dose agronomique optimale est de 60 kg K_2O /ha et permet d'obtenir un gain de rendement moyen de 4,4 % et s'étendant de 2 à 6 %, en regard d'un intervalle de confiance à 90 %.

MODÈLE

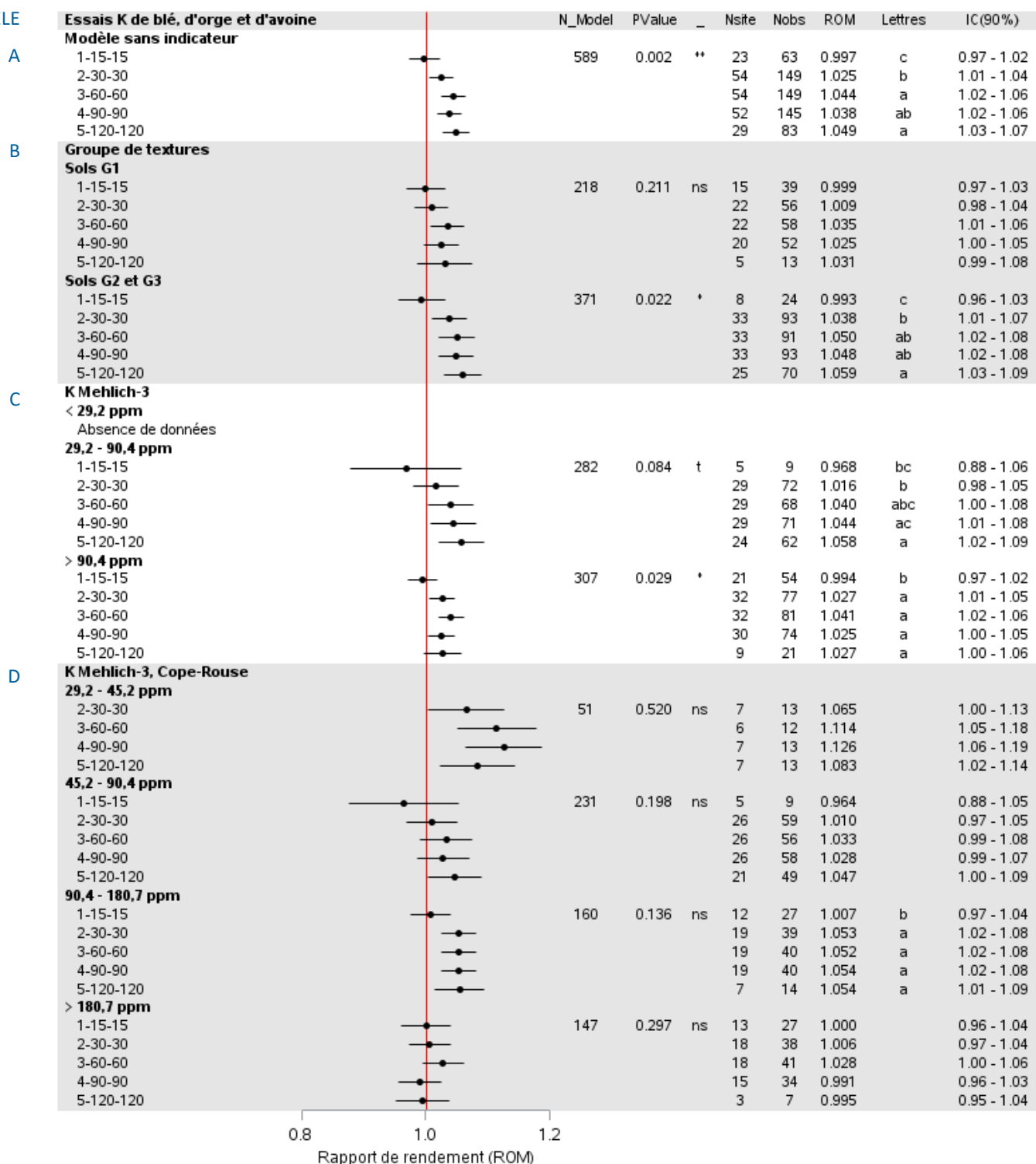


Figure 22. Résultats des analyses de variance sur la réponse du blé, de l'orge et de l'avoine aux doses

croissantes de potassium. G1 : sols à texture fine ; G2 : sols à texture moyenne ; G3 : sols à texture grossière ; N_model : nombre d'observations du modèle ; Nsite : nombre de sites ; Nobs : nombre d'observations ; ROM : rapport de rendement (rendement parcelle fertilisée/rendement parcelle témoin) ; IC : Intervalle de confiance ; Les moyennes d'une même catégorie qui ne partagent pas la même lettre sont significativement différentes au seuil $P < 0,12$. Exceptionnellement dans le modèle D, le $P = 0,132$ a été interprété comme une tendance.

Les résultats de l'analyse des données par groupe de textures (G1 vs G2-G3, modèle B) ont suggéré que la dose agronomique optimale était supérieure dans les sols de textures moyennes à grossières. En effet, dans ces derniers, un effet significatif des apports de K_2O sur le ROM est observé, pour une dose agronomique optimale de 60 kg K_2O/ha (gain moyen de 5,0 %). Dans les sols de textures fines, toutefois, l'effet non significatif suggère que la plus petite dose testée a été suffisante pour l'obtention des meilleurs rendements. Ce besoin en K_{M3} supérieur dans les sols G2 et G3 est conforme à ce qui était attendu, considérant que les sols du groupe G1 étaient généralement mieux pourvus en K_{M3} vu leur plus grand contenu en argile qui sous-tend une plus grande disponibilité du K en raison de son adsorption aux phyllosilicates (Blake *et al.*, 2008 ; Power et Prasad, 1997).

La considération de la teneur en K_{M3} du sol (modèle C) indépendamment de la texture a permis la précision de la réponse observée avec les modèles précédents. Les essais réalisés sur des sols de moins de 90,4 ppm de K_{M3} ont répondu aux différents apports de K ($P = 0,084$). Les résultats de ce modèle suggèrent que la dose agronomique optimale est de 60 kg K_2O/ha . L'application de cette dose optimale entraîne des gains de rendements variant de 0 à 8 % avec moyenne de 4,0 %. Au-delà du seuil de 90,4 ppm, une réponse a aussi été enregistrée ($P = 0,029$), pour une dose agronomique optimale de 30 kg K_2O/ha menant à un gain moyen de 2,7 % (entre 1 et 5 %). Enfin, au-delà de 90,4 ppm, une procédure de Cope-Rouse (modèle D) a permis la détermination d'un seuil à partir duquel la réponse à l'engrais cessait. En effet, entre 90,4 et 180,7 ppm, la dose optimale a été de 30 kg K_2O/ha , en considérant une faible tendance de $P = 0,136$ et les intervalles de confiance. Au-delà de 180,7 ppm de K_{M3} , les gains sont nuls (ROM = 1) et la plus petite dose testée, voire un apport nul, pourrait être retenue comme optimale.

4.2.3 Considération de la verse

De manière générale, le blé est le plus tolérant à la verse, suivi de l'orge et de l'avoine (CRAAQ, 2012). Toutefois, dans le cadre de cette étude, aucun effet de la dose de K_2O n'a été détecté par les analyses de fréquence dans le blé, l'orge ou l'avoine, et ce, peu importe les groupes de textures considérés, bien que les sols des essais G2 et G3 étaient moins pourvus en K que ceux des sols G1.

Dans l'avoine, culture la plus affectée par la verse, bien que les différences ne soient pas statistiquement significatives, l'interprétation numérique des données à partir des tableaux de fréquences a montré que l'apparition de la verse sévère avait diminué avec l'augmentation des doses de K_2O dans les deux grands groupes de textures de sols. Les travaux de Mohr *et al.* (2007) ont effectivement démontré un effet significatif ($P = 0,009$) de la fertilisation potassique sur la verse de l'avoine, ainsi qu'une interaction entre les fertilisations azotées et potassiques ($P = 0,03$) dans des sols de 101 à 220 ppm de K_{NaHCO_3} . En effet, il est généralement admis que dans les sols peu pourvus en K, les apports de K sont favorables à la réduction de la verse, puisque le K agit en augmentant l'épaisseur des membranes de la tige et la résistance à l'écrasement (Rajkumara, 2008).

Les résultats obtenus dans la présente étude diffèrent donc de ceux de la littérature scientifique qui indique que dans les sols peu pourvus en K, les plants sont plus fragiles, favorisant plus fréquemment la cassure des tiges que pour les plants non carencés (Mulder, 1954 ; Pinthus, 1974). De manière générale et à l'instar de ce qui a été présenté à la section 3 sur le phosphore, l'apparition de la verse semble davantage liée à des effets de sites et de cultivars. La considération de tous les essais NPK réalisés confirme cette observation, car peu importe l'élément testé (N, P ou K), les sites et les cultivars versés sont les mêmes, et ce, dans toutes les cultures à l'étude.

4.2.4 Critères d'évaluation de la qualité des grains

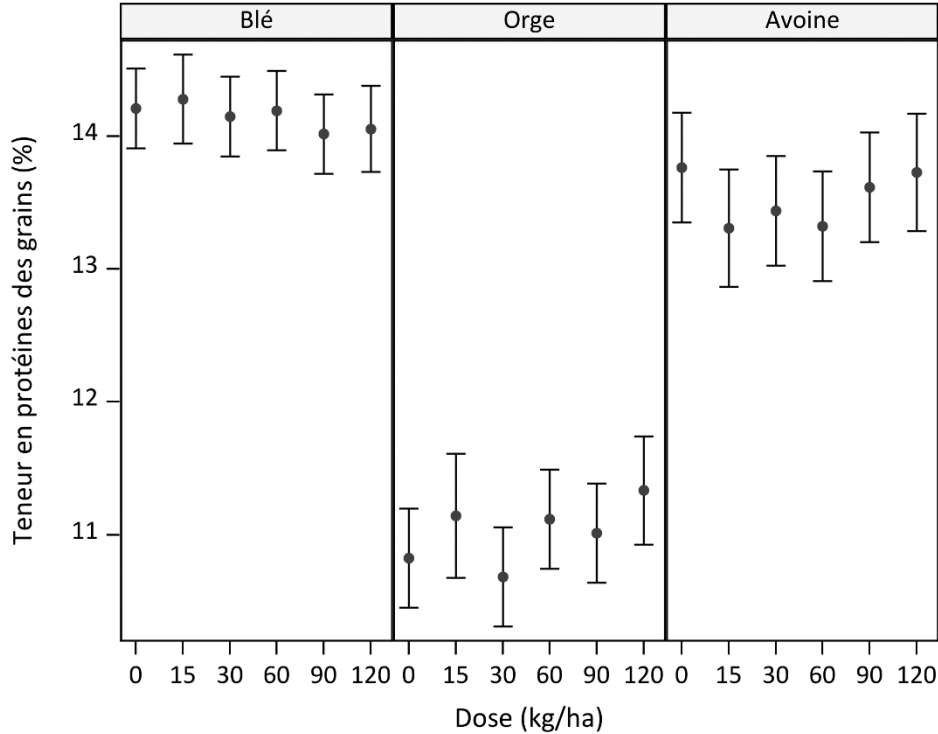


Figure 23. Teneur en protéines des grains en fonction des doses de K₂O appliquées dans le blé, l'orge et l'avoine. Les trois cultures ont été analysées séparément. Les valeurs présentées sont les estimations du modèle statistique pour chaque traitement ($P > 0,12$). La teneur en protéines du blé est présentée sur une base de 13,5 % d'humidité, tandis que les teneurs de l'orge et de l'avoine sont présentées sur une base de matière sèche, conformément à la pratique dans chacune des cultures.

La teneur en protéines des grains varie selon la culture à l'étude. Ainsi, les trois cultures ont fait l'objet d'analyses séparées pour la détermination de l'effet des doses de K₂O sur la teneur en protéines des grains. Conformément aux modèles de réponse présentés plus haut, l'effet de la dose de K₂O sur la teneur en protéines a d'abord été validé dans les groupes de textures G1 et G2-G3, puis de part et d'autre du seuil agronomique de réponse de 90,4 ppm de K_{M3}.

Dans les trois cultures, des effets significatifs ou des tendances à un effet de la dose de K₂O sur la teneur en protéines ont été observés dans les essais réalisés en sols G1. Dans l'avoine, la teneur en protéines a diminué avec l'augmentation des doses de K₂O. Dans le blé et l'orge, l'effet a été plus confus, car aucun patron n'était visible quant aux doses. Quant au modèle basé sur l'indicateur K_{M3}, il n'a pas démontré d'effet significatif ($P > 0,12$) de part et d'autre du seuil de 90,4 ppm de K_{M3} dans aucune des cultures à l'étude.

Dans le blé, sans égard à la teneur du sol en K_{M3} et à la dose de K₂O appliquée, la teneur en protéines moyenne a été de $14,2 \pm 0,3$ %. Dans l'orge, celle-ci était de $11,0 \pm 0,4$ % alors qu'elle atteignait $13,5 \pm 0,4$ % dans l'avoine. Cette absence d'effet correspond aux résultats d'autres études, notamment dans le blé (Boquet et Johnson, 1987 ; Duncan *et al.*, 2018 ; Tremblay *et al.*, 2011) et l'avoine (Gaspar *et al.*, 1994). Dans l'avoine, bien que l'effet ne soit pas significatif, la moyenne du traitement témoin (aucun apport de K₂O) était la plus élevée. Selon

Eppendorfer (1978), cette observation pourrait s'expliquer par un effet de dilution causé par les rendements plus élevés dans les parcelles fertilisées. Des conditions de carences en K peuvent effectivement diminuer le rendement et ainsi augmenter les teneurs en azote et en acides aminés des grains. Pour les cultures dans lesquelles la teneur en protéines est un critère de classement en fonction du marché visé, les moyennes atteignaient les teneurs minimales requises (> 12,5 % pour le blé panifiable) ou étaient sous la limite (< 12,5 % dans l'orge brassicole).

4.3 Diagnostic nutritionnel et exportations

À l'instar des essais précédents (N et P), le diagnostic nutritionnel basé sur les rendements et la composition des grains a été effectué séparément pour chaque culture. Les résultats sont présentés au Tableau 34. L'analyse des grains de la population de tête a permis d'établir des concentrations de 4,3 ; 5,7 et 5,4 kg K₂O/tonne de grains stabilisés à 14 % d'humidité dans, respectivement, le blé, l'orge et l'avoine (Tableau 34 A). De manière générale, les valeurs retrouvées dans la présente étude sont similaires à celles rapportées dans l'actuel guide du CRAAQ (2010) lorsque ces dernières sont ramenées à 14 % d'humidité. La concentration en K₂O de la paille a varié davantage entre les cultures : 10,7 kg K₂O/tonne de paille dans le blé, contre 13,9 et 15,6 dans l'orge et l'avoine, respectivement.

Les exportations médianes de la population de tête (Tableau 34 B), calculées à partir du rendement associé à ce groupe (Tableau 34 C) ont été respectivement de 22, 32 et 25 kg K₂O/ha pour le blé, l'orge et l'avoine, dans le cas où la paille était laissée au champ. Si celle-ci était également récoltée, les exportations médianes atteignaient plutôt 73, 85 et 90 kg K₂O/ha pour le blé, l'orge et l'avoine, respectivement.

Dans les trois cultures, les exportations en K₂O des grains ont augmenté plutôt linéairement avec le rendement en grains (Figure 24). Dans le blé et l'orge, les coefficients de variation (données non présentées) étaient faibles pour les concentrations des grains inter-variétés. Ainsi, c'est majoritairement le rendement en grains, plutôt que la variété, qui a influencé la quantité de K₂O exportée par les grains. L'avoine, quant à elle, a présenté une variabilité plus importante pour la concentration en K₂O des grains (18 %). Celle-ci peut être due au site expérimental (regroupant les effets du sol, de la météo, des années, etc.) ou à la variété : à l'exception des variétés Synextra et Navaro, chaque variété a été testée à un seul site.

Enfin, dans les trois cultures, la paille a présenté une variabilité plus importante que les grains pour les valeurs d'exportations (9 à 128 ; 28 à 79 et 29 à 118 kg K₂O/ha pour respectivement le blé, l'orge et l'avoine). D'une part, des coefficients de variation plus élevés ont été observés pour la paille entre les différentes variétés. D'autre part, les rendements en paille ont également été très variables, notamment entre les sites. Ces deux éléments peuvent expliquer la variabilité observée entre les valeurs minimales et maximales d'exportations de paille.

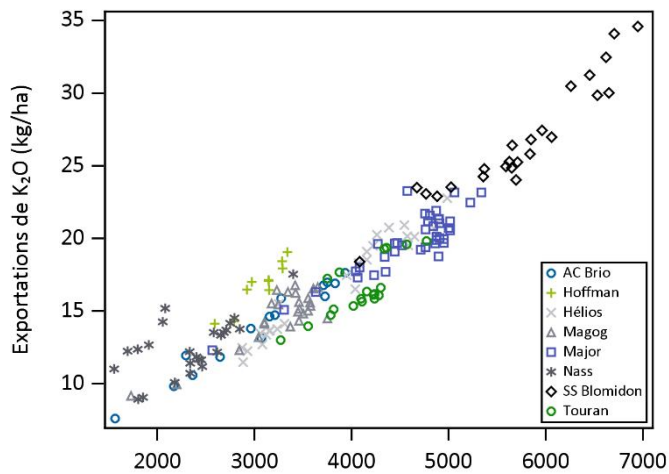
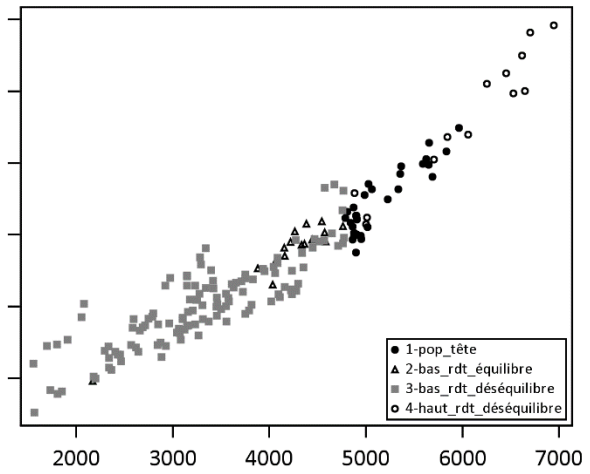
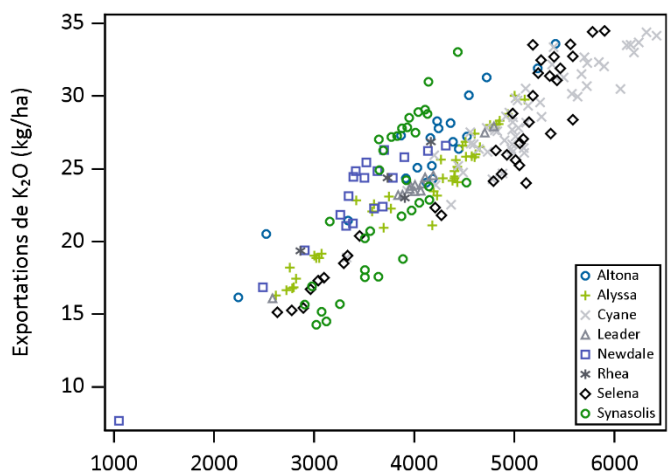
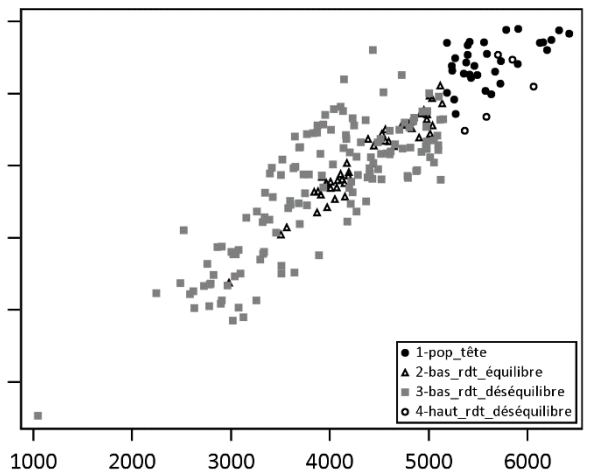
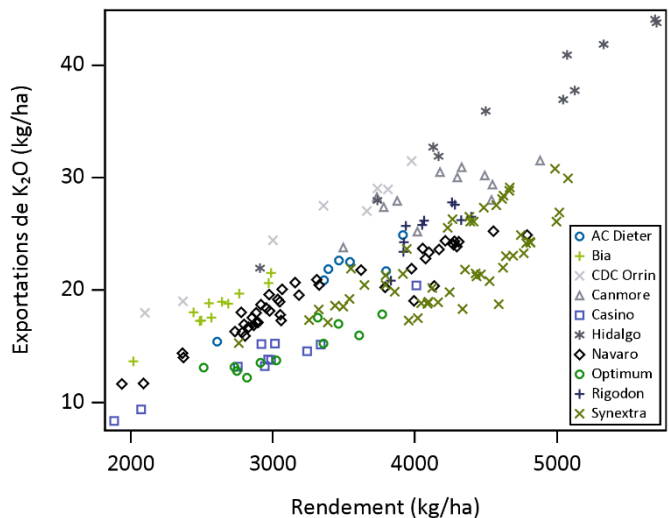
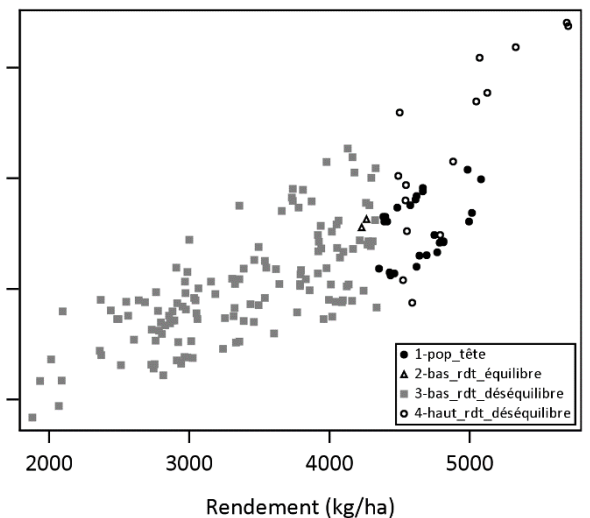
Blé (A)**(B)****Orge (C)****(D)****Avoine (E)****(F)**

Figure 24. Exportations de K_2O en fonction des rendements en grains du blé, de l'orge et de l'avoine, identifiées selon les variétés (A, C, E) et le diagnostic nutritionnel (B, D, F).

Tableau 34. Concentrations en K₂O (A) et exportations en K₂O (B) en fonction du diagnostic nutritionnel et rendements moyens associés à la population de tête (C) dans les grains et la paille du blé, de l'orge et de l'avoine

	Grains						Paille																	
	Blé		Orge		Avoine		Blé		Orge		Avoine													
(A) Concentration en K₂O (kg/tonne humide) ²																								
Haut rdt ¹ et équilibre nutritionnel (« population de tête »)	4,4 ± 0,2		5,7 ± 0,3		5,5 ± 0,6		9,5 ± 7,0		14,9 ± 4,7		16,1 ± 9,1													
Faible rdt et équilibre nutritionnel	4,5 ± 0,2		5,8 ± 0,2		6,1 ± 0,1		17,7 ± 7,1		11,4 ± 6,3		23,1 ± 1,2													
Faible rdt et déséquilibre nutritionnel	4,7 ± 0,7		6,0 ± 0,7		6,0 ± 1,0		13,7 ± 6,1		14,2 ± 4,4		18,8 ± 4,2													
Haut rdt et déséquilibre nutritionnel	4,6 ± 0,3		5,3 ± 0,3		6,6 ± 1,2		15,5 ± 4,0		15,9 ± 5,0		17,8 ± 2,6													
(B) Exportations en K₂O (kg/ha) ³																								
	Moy	Med	Min	Max	Moy	Med	Min	Max	Moy	Med	Min	Max	Moy	Med	Min	Max	Moy	Med	Min	Max	Moy	Med	Min	Max
Haut rdt et équilibre nutritionnel (« population de tête »)	22	22	19	27	32	32	29	35	25	26	21	31	45	45	9	128	55	55	28	82	66	45	29	118
Faible rdt et équilibre nutritionnel	19	19	10	21	25	25	17	31	26	26	26	26	70	80	8	105	37	41	7	82	86	86	81	92
Faible rdt et déséquilibre nutritionnel	15	15	8	24	24	24	8	33	20	19	8	33	48	52	9	101	43	43	15	87	67	61	25	147
Haut rdt et déséquilibre nutritionnel	28	28	20	35	30	31	27	33	32	31	19	44	90	86	46	157	62	66	48	76	78	67	45	127
(C) Rendement de la population de tête (kg/ha)																								
Haut rdt et équilibre nutritionnel (« population de tête »)	5 170				5 602				4 667				4 493				3 974				4 256			

¹ Les valeurs sont exprimées sur la base d'une humidité moyenne de 14 %.

² Rdt : Rendement.

³ Moy : moyenne ; Med : médiane ; Min : valeur minimale ; Max : valeur maximale.

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

Suivant l'ensemble des analyses, des VSRF sur la base de la teneur en K_{M3} du sol ont été établies (Tableau 35). Comme aucune analyse n'a été possible dans les sols ayant des teneurs inférieures à 30 ppm K_{M3} , une dose d'entretien de 90 kg K_2O/ha est proposée afin de couvrir les exportations de la culture. Cette dose correspond également à la dose actuellement recommandée (CRAAQ, 2010) dans la catégorie de sols la moins pourvue en K. Pour les sols ayant entre 31 et 90 ppm de K_{M3} , la dose agronomique optimale de 60 kg K_2O/ha a été retenue. Au-delà de ce seuil et jusqu'à 180 ppm, un apport de 30 kg K_2O/ha est proposé, ce après quoi un apport nul est recommandé en raison de l'absence de gains par la fertilisation potassique. De manière générale, ces recommandations (0 à 90 kg K_2O/ha) sont égales ou inférieures aux recommandations faites ailleurs au Canada et dans le nord-est des États-Unis, où les plus fortes doses recommandées atteignent 90 à 134 kg K_2O/ha (Tableau 36). Toutes les institutions recensées utilisent la teneur en K du sol (bien que dosée par différentes méthodes) comme indicateur de fertilité potassique, tandis que seul l'état du Wisconsin (États-Unis) fait une distinction des recommandations en fonction de la texture du sol.

Tableau 35. Fertilisation potassique du blé de printemps, de l'orge et de l'avoine – 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	Au semis, incorporé	(90) ⁴
	31 – 90		60 ⁵
	91 – 180		30 ⁶
	> 180		0 ⁷

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 : Valeur scientifique de référence en fertilisation.

⁴ En l'absence de données dans cette catégorie de sols, dose d'entretien proposée afin de couvrir les exportations en K_2O .

⁵ Dose agronomique optimale dans cette catégorie de sols.

⁶ Dose agronomique optimale dans cette catégorie de sols considérant les intervalles de confiance.

⁷ Dose nulle considérant l'absence de gain par la fertilisation dans cette catégorie de sols.



- Dans le cadre des essais K, la teneur minimale rencontrée était de 29,2 ppm K_{M3} . Ainsi, en l'absence de données pour les sols ayant une teneur en K_{M3} inférieure à 30 ppm, une dose d'entretien de 90 kg K_2O/ha est proposée. Celle-ci correspond aux exportations des populations de tête (section 4.3). Cette dose correspond à l'actuelle recommandation dans le CRAAQ (2010) pour la catégorie de sol la plus pauvre et est similaire aux recommandations en Ontario.
- La dose nulle retenue pour les sols de plus de 180,7 ppm de K_{M3} pourrait être remplacée par la plus petite dose testée, comme c'est habituellement le cas. Celle-ci serait donc de 15 kg K_2O/ha .

Tableau 36. Comparaison des recommandations en K₂O pour la production de blé, d'orge et d'avoine en Amérique du Nord

Provinces /États	Mode et période d'application	Fractionnement	Indicateurs		Dose K ₂ O (kg/ha)			Source
			Fertilité du sol	Autres	Blé	Orge	Avoine	
Québec (CAN)	-	-	0-22 ppm K _{M-3}	-	90	90	90	CRAAQ (2010)
			23-45		75	75	70	
			46-67		60	60	50	
			68-89		45	45	40	
			90-112		20	20	20	
			113-223		0-20	0-20	0-20	
		224 et +	0	0	0			
Ontario* (CAN)	Avoine : avant le semis, incorporé	Orge, blé : Appliquer avec la semence une partie ou la totalité des apports de K nécessaires.	K acétate d'ammonium	-	0-90	0-90	0-70	MAAARO (2017)
Nouveau-Brunswick (CAN)	-	-	K du sol	-	60-100	60-100	0-90	New Brunswick Department of Agriculture, Fisheries and Aquaculture (2001)
Prairie (CAN)	-	-	K du sol	-	-	-	0-12	Prairie Oat Production Manual (2010)
Alberta (CAN)	Avoine : Dans la ligne de semis ou en bande, à l'automne ou au printemps.	-	K acétate d'ammonium	-	-	0-134	-	Orge, avoine : Alberta Agriculture and Rural Development (2008) ; Blé : Alberta Agriculture and Rural Development (2004)
Minnesota (É-U)	Blé, orge : En bande ou à la volée ; Avoine : À la volée et incorporé	-	K du sol	Objectif de rendement	À la volée : 0-213 En bande : 0-107	En bande : 0-62 À la volée : 0-123	0-146	University of Minnesota extension (2018)
Vermont (É-U)	-	-	K Morgan modifié	-	0-134	0-134	0-134	University of Vermont Extension (2017)
Wisconsin (É-U)	-	-	Texture du sol, K _{Bray1}	Objectif de rendement	0-106	0-84	0-73	Laboski et Peters (2012)

* Pour les sols ayant plus de 250 ppm de K_{AA}, l'application de potasse risque de réduire le rendement ou la qualité des cultures. Par exemple, l'épandage de potasse dans des sols pauvres en magnésium peut provoquer une carence en magnésium.

Dans le but d'homogénéiser les unités et faciliter les comparaisons, les coefficients suivants ont été utilisés lorsque nécessaire :

1 ppm = 2,24 kg/ha ; 1 lb/ac = 1,12 kg/ha ; [§] 1 t de blé = 36,744 0 bu ; 1 t d'orge = 45,93 bu ; 1 ac = 0,404 69 ha.

5. CONCLUSION

Les travaux réalisés par l'IRDA dans le cadre du Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation 2020-2023 (MIRVRF) ont permis de générer de nouvelles connaissances centrales pour la fertilisation du blé de printemps, de l'orge et de l'avoine, en plus de mettre à jour les classes de fertilité et doses optimales d'apports des éléments majeurs pour ces cultures. Ces recommandations reposent sur l'analyse des données validées d'expérimentations scientifiques québécoises réalisées au champ, appuyée de l'expertise agronomique et de principes scientifiques reconnus dans le domaine de la nutrition des cultures. Dans l'ensemble, les doses optimales proposées sont supérieures, similaires ou inférieures à celles des grilles antérieures (CRAAQ, 2010), sans compromettre la qualité des grains et les rendements. En effet, toutes les recommandations considèrent les effets de la fertilisation sur les risques de verse, la teneur en protéines et le poids spécifique des grains. Chacune des céréales fait l'objet d'une recommandation en azote distincte, tandis que les recommandations en P_2O_5 et en K_2O sont communes aux trois cultures. 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. La fertilisation phosphatée est dorénavant 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 la 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.

6. FERTILISATION DU BLÉ DE PRINTEMPS

VALEURS SCIENTIFIQUES DE RÉFÉRENCE EN FERTILISATION

AZOTE				
Groupe de textures	Classe de fertilité MO _{PAF} (%)	Période d'application	Fractionnement ¹ (kg N/ha)	VSRF (kg N/ha)
G1	≤ 3,8	Au semis, incorporé	60	120
		En post-levée	60	
	> 3,8	Au semis, incorporé	45	90
		En post-levée	45	
G2, G3	-	Au semis, incorporé	60	120
		En post-levée	60	

PHOSPHORE ²				
Groupe de textures	Classe de fertilité ISP ₁ (%)	Période d'application	VSRF (kg P ₂ O ₅ /ha)	
G1	≤ 1,8	Au semis, incorporé	90	
	1,9 – 3,6		(60) ³	
	3,7 – 7,6		30	
	> 7,6		0	
G2, G3	≤ 2,3	Au semis, incorporé	90	
	2,4 – 5,0		(60) ³	
	5,1 – 13,1		30	
	> 13,1		0	

POTASSIUM ²				
Groupe de textures	Classe de fertilité K _{M3} (ppm)	Période d'application	VSRF (kg K ₂ O/ha)	
G1, G2, G3	≤ 30	Au semis, incorporé	(90) ³	
	31 – 90		60	
	91 – 180		30	
	> 180		0	

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

Les exportations moyennes sur un hectare de la culture à l'équilibre nutritionnel et à haut rendement sont de 120 kg N, 49 kg P₂O₅ et 22 kg K₂O si seuls les grains sont récoltés. La récolte de la paille exportera 31 kg N, 6 kg P₂O₅ et 45 kg K₂O supplémentaires à l'hectare.

Les essais de fertilisation ont été réalisés avec des cultivars résistants à la verse et appropriés à la région agro-climatique.

Les essais de fertilisation du blé de printemps ont été réalisés de cultivars de blé panifiable (90 %) et de provende (10 %). Les VSRF présentées sont applicables à ces deux types de blés.

¹ Le fractionnement de la dose 90 kg N/ha est présenté tel que testé, tandis que celui de la dose 120 kg N/ha a été modifié (60 + 60). Dans ces catégories de sols, l'apport de 120 kg N/ha a été testé en deux apports, soit 30 N au semis et 90 N en post-levée.

² Les données des essais de blé, d'orge et d'avoine ont été combinées et analysées conjointement pour le phosphore et le potassium.

³ Les valeurs entre parenthèses sont le résultat de considérations basées sur les exportations de la culture. Voir p. 82 pour le P et p. 94 pour le K.



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

7. FERTILISATION DE L'ORGE

VALEURS SCIENTIFIQUES DE RÉFÉRENCE EN FERTILISATION

AZOTE				
Groupe de textures	Classe de fertilité MO _{PAF} (%)	Période d'application	Fractionnement ¹ (kg N/ha)	VSRF (kg N/ha)
G1	≤ 5,0	Au semis, incorporé	60	60 - 90 ^{2,3}
		En post-levée	0 – 30	
G2, G3	-	Au semis, incorporé	60	90 ^{3,5}
		En post-levée	30	

PHOSPHORE ⁶				
Groupe de textures	Classe de fertilité ISP ₁ (%)	Période d'application	VSRF (kg P ₂ O ₅ /ha)	
G1	≤ 1,8	Au semis, incorporé	90	
	1,9 – 3,6		(60) ⁷	
	3,7 – 7,6		30	
	> 7,6		0	
G2, G3	≤ 2,3	Au semis, incorporé	90	
	2,4 – 5,0		(60) ⁷	
	5,1 – 13,1		30	
	> 13,1		0	

POTASSIUM ⁶				
Groupe de textures	Classe de fertilité K _{M3} (ppm)	Période d'application	VSRF (kg K ₂ O/ha)	
G1, G2, G3	≤ 30	Au semis, incorporé	(90)	
	31 – 90		60	
	91 – 180		30	
	> 180		0	

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

Les exportations moyennes sur un hectare de la culture à l'équilibre nutritionnel et à haut rendement sont de 79 kg N, 50 kg P₂O₅ et 32 kg K₂O si seuls les grains sont récoltés. La récolte de la paille exportera 25 kg N, 9 kg P₂O₅ et 55 kg K₂O supplémentaires à l'hectare.

Les essais de fertilisation ont été réalisés avec des cultivars résistants à la verse et appropriés à la région agro-climatique.

¹ Les fractionnements sont présentés tel que testés. Si l'apport total visé était de 70 à 80 kg/ha, une application inférieure à 60 kg/ha au semis pourrait permettre de conserver une dose minimale pratique en post-levée.

² Si le cultivar est sensible à la verse et selon l'historique du champ, l'apport de N en post-levée peut-être omis afin de réduire les risques de verse.

³ Dans l'orge brassicole, si la dose totale de N est supérieure à 60 kg N/ha, celle-ci devrait être apportée tôt en saison et fractionnée en vue de maximiser le rendement tout en minimisant le risque de dépasser le seuil de 12,5 % de protéines.

⁴ Dans cette catégorie de sols (G1, > 5,0 % de MO_{PAF}), les essais ont été réalisés exclusivement en régions périphériques (01, 02 et 08). Dans les régions centrales, la dose de 30 kg N/ha pourrait s'avérer insuffisante. Dans le cas d'une majoration de la dose par l'agronome, une attention particulière devrait être portée au risque de verse, plus important dans les régions centrales (RGCC 2020).

⁵ Dans cette catégorie de sols (G2-G3, < 3,0% de MO_{PAF}), la dose de 120 kg N/ha a mené aux meilleurs rendements. Ainsi, si le cultivar est résistant à la verse et selon l'historique du champ, la dose de N pourrait être ajustée à la hausse.

⁶ Les données des essais de blé, d'orge et d'avoine ont été combinées et analysées conjointement pour le phosphore et le potassium.

⁷ Les valeurs entre parenthèses sont le résultat de considérations basées sur les exportations de la culture. Voir p. 82 pour le P et p. 94 pour le K.



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

8. FERTILISATION DE L'AVOINE

VALEURS SCIENTIFIQUES DE RÉFÉRENCE EN FERTILISATION

AZOTE			
Groupe de textures	Classe de fertilité MO _{PAF} (%)	Période d'application	VSRF (kg N/ha)
G1	–	Au semis, incorporé	– ²
	(> 4,0) ¹		25 ^{3,4,5}
G2, G3	≤ 4,1	Au semis, incorporé	75 ⁶
	> 4,1	Au semis, incorporé	25 ^{3,5}

PHOSPHORE ⁷			
Groupe de textures	Classe de fertilité ISP ₁ (%)	Période d'application	VSRF (kg P ₂ O ₅ /ha)
G1	≤ 1,8	Au semis, incorporé	90
	1,9 – 3,6		(60) ⁸
	3,7 – 7,6		30
	> 7,6		0
G2, G3	≤ 2,3	Au semis, incorporé	90
	2,4 – 5,0		(60) ⁸
	5,1 – 13,1		30
	> 13,1		0

POTASSIUM ⁷			
Groupe de textures	Classe de fertilité K _{M3} (ppm)	Période d'application	VSRF (kg K ₂ O/ha)
G1, G2, G3	≤ 30	Au semis, incorporé	(90) ⁸
	31 – 90		60
	91 – 180		30
	> 180		0

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

Les exportations moyennes sur un hectare de la culture à l'équilibre nutritionnel et à haut rendement sont de 95 kg N, 48 kg P₂O₅ et 25 kg K₂O si seuls les grains sont récoltés. La récolte de la paille exportera 33 kg N, 12 kg P₂O₅ et 66 kg K₂O supplémentaires à l'hectare.

Selon l'historique du champ, la dose de N pour l'avoine nue peut être rehaussée jusqu'à concurrence de 75 kg N/ha.

Les essais de fertilisation ont été réalisés avec des cultivars résistants à la verse et appropriés à la région agro-climatique.

¹ La valeur de 4,0 % correspond à la plus petite teneur en MO_{PAF} rencontrée en sols G1 et n'a pas été déterminée par la méthode de Cate-Nelson.

² Impossibilité de conclure sur une VSRF vu l'absence de données dans cette catégorie de sols. Un apport de 50 kg/ha est envisageable.

³ L'apport de 25 kg N/ha peut présenter des contraintes techniques d'application si des engrais concentrés en N sont utilisés (ex. : l'urée).

⁴ Dans les sols G1, les essais ont été réalisés en régions périphériques (01, 02, 08) sur des sols bien pourvus en MO_{PAF} (moyenne de 6,5 %, jusqu'à 11 %).

⁵ Dans les régions centrales, la dose de 25 kg N/ha pourrait s'avérer insuffisante. Dans le cas d'une majoration de la dose par l'agronome, une attention particulière devrait être portée au risque de verse, plus important dans les régions centrales (RGCC 2020).

⁶ Si le cultivar est sensible à la verse et selon l'historique du champ, la dose peut être ajustée à la baisse jusqu'à 50 kg N/ha. La dose de 75 kg N/ha a été testée en deux apports : 50 kg/ha au semis et 25 kg/ha en post-levée. Cette dose est ici présentée en un apport afin de limiter les risques de verse.

⁷ Les données des essais de blé, d'orge et d'avoine ont été combinées et analysées conjointement pour le phosphore et le potassium.

⁸ Les valeurs entre parenthèses sont le résultat de considérations basées sur les exportations de la culture. Voir p. 82 pour le P et p. 94 pour le K.



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

Remerciements

L'équipe de l'IRDA tient à remercier d'une manière spéciale les divers intervenants et spécialistes pour leur collaboration facilitant la prise en compte des contraintes et des pratiques culturelles de la culture du blé de printemps, de l'orge et de l'avoine. Nos gratitudee sont exprimées également à Anne Vanasse, Athyna Cambouris, Elisabeth Vachon, Jean Goulet, Denis Pageau et Gilles Tremblay pour le partage de leurs jeux de données et les échanges fructueux.

9. RÉFÉRENCES

- AHDB. (2005). *Avoiding lodging in winter wheat - practical guidelines*. Agriculture and Horticulture Development Board. <https://ahdb.org.uk/knowledge-library/lodging>
- Aidoo, J. P. (2017). *Optimizing Oat Yield, Quality and Stand-ability in Central Alberta*. University of Alberta.
- Arregui, L. M. et Quemada, M. (2008). Strategies to Improve Nitrogen Use Efficiency in Winter Cereal Crops under Rainfed Conditions. *Agronomy Journal*, 100(2), 277-284. <https://doi.org/10.2134/agronj2007.0187>
- Ayoub, M., Guertin, S., Lussier, S. et Smith, D. L. (1994). Timing and Level of Nitrogen Fertility Effects on Spring Wheat Yield in Eastern Canada. *Crop Science*, 34(3), 748-756.
- Bäckman, S. T., Vermeulen, S. et Taavitsainen, V.-M. (1997). Long-term fertilizer field trials: comparison of three mathematical response models. *Agricultural and Food Science*, 6(2), 151-160. 10.23986/afsci.72778
- Baker, C. K., Fullwood, A. E. et Colls, J. J. (1990). Lodging of winter barley (*Hordeum vulgare* L.) in relation to its degree of exposure to sulphur dioxide. *New Phytologist*, 114(2), 191-197.
- Balkcom, K. S., Duzy, L. M., Price, A. J. et Kornecki, T. S. (2019). Oat, Rye, and Ryegrass Response to Nitrogen Fertilizer. *Crop, Forage & Turfgrass Management*, 5(1), 180073.
- Bélanger, G., Richards, J. E., Milburn, P. et Walker, D. (1998). Influence of previous cropping practices on the response of spring wheat to applied N. *Canadian Journal of Soil Science*, 78(2), 267-273.
- Berry, P. M. (2012). Lodging Resistance in Cereals. Dans *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology* (p. 6202-6216). Springer New York.
- Berry, P. M., Sterling, M. et Mooney, S. J. (2006). Development of a model of lodging for barley. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 192(2), 151-158.
- Berry, P. M., Sterling, M., Spink, J. H., Baker, C. J., Sylvester-Bradley, R., Mooney, S. J., Tams, A. R. et Ennos, A. R. (2004). Understanding and Reducing Lodging in Cereals. *Advances in Agronomy*.
- Bishop, R. F. et Maceachern, C. R. (1971). Response of spring wheat and barley to nitrogen, phosphorus and potassium. *Canadian Journal of Soil Science*, 51(1), 1-11.
- Blake, G. R., Steinhardt, G. C., Pombal, X. P., Muñoz, J. C. N., Cortizas, A. M., Arnold, R. W., Schaetzl, R. J., Stagnitti, F., Parlange, J. -Y., Steenhuis, T. S., Chesworth, W., Mualem, Y., Morel-Seytoux, H. J., Spaargaren, O., Chesworth, W., Soon, Y. K., Orlov, D. S., Spaargaren, O., Oertli, J. J., ... Chesworth, W. (2008). Potassium cycle. Dans W. Chesworth (dir.), *Encyclopedia of Soil Science* (p. 583-587). Springer Netherlands.
- Boquet, D. J. et Johnson, C. C. (1987). Fertilizer Effects on Yield, Grain Composition, and Foliar Disease of Doublecrop Soft Red Winter Wheat. *Agronomy Journal*, 79(1), 135-141.
- Brady, J. (1934). Some factors influencing lodging in cereals. *The Journal of Agricultural Science*, 24(2), 209-232.
- Brinkman, M. A. et Rho, Y. D. (1984). Response of Three Oat Cultivars to N Fertilizer. *Crop Science*, 24(5), 973-977.
- CEAEQ. (2003). Méthode d'analyse - Détermination de la matière organique par incinération : méthode de perte au feu (PAF). Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec. MA. 1010 – PAF 1.0. Édition : 2003-03-27.
- Collins, M., Brinkman, M. A. et Salman, A. A. (1990). Forage Yield and Quality of Oat Cultivars with Increasing Rates of Nitrogen Fertilization. *Agronomy Journal*, 82(4), 724-728.

- Comec, N. (2008). La fertilisation azotée pour qualité et rentabilité. *Perspectives agricoles*, (343), 34-37.
- Commission canadienne des grains. (2019a). *Qualité de l'avoine - Teneur en protéines*.
<https://grainscanada.gc.ca/fr/recherche-donnees/qualite-exportations/cereales/avoine/2019/preliminaire/teneur-en-proteines.html>
- Commission canadienne des grains. (2019b). *Qualité de l'orge brassicole de l'Ouest canadien en 2019*.
<https://www.grainscanada.gc.ca/fr/recherche-donnees/qualite-exportations/cereales/orge-brassicole/2019/preliminaire/qualite-de-l-orge.html>
- Commission canadienne des grains. (2020a). Chapitre 7. Avoine. Dans *Guide officiel du classement des grains* (p. 1-26). <https://www.grainscanada.gc.ca/fr/qualite-grains/guide-officiel-classement-grains/07-avoine/07-oats-f.pdf>
- Commission canadienne des grains. (2020b). *Méthodes et analyses utilisées par la Commission canadiennes des grains pour mesurer la qualité du blé*. <https://www.grainscanada.gc.ca/fr/recherche-donnees/qualite-exportations/cereales/ble/methodes-et-analyses.html>
- Conry, M J. (1995). Effect of Timing of N Application on the Grain Yield and Grain Quality of Spring-Sown Malting Barley. *Irish Journal of Agricultural and Food Research*, 34(1), 25-31.
- Conry, Michael J. (1997). Effect of Fertiliser N on the Grain Yield and Quality of Spring Malting Barley Grown on Five Contrasting Soils in Ireland. *Biology and Environment: Proceedings of the Royal Irish Academy*, 97B(3), 185-196.
- 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.
- CPVQ. (1996). *Grilles de référence en fertilisation* (2e ed.; édité par Conseil des productions végétales du Québec inc). Agdex 540. Publication 02-9605.
- CRAAQ. (2010). *Guide de référence en fertilisation*. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (2e éd.). Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec, Commission chimie et fertilité des sols, Québec, Canada.
- CRAAQ. (2012). *Guide de production - Les céréales à paille*. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec, Sainte-Foy, QC (édité par CRAAQ).
- Delin, S., Lindén, B. et Berglund, K. (2005). Yield and protein response to fertilizer nitrogen in different parts of a cereal field: Potential of site-specific fertilization. *European Journal of Agronomy*, 22(3), 325-336.
- Duncan, E. G., O'Sullivan, C. A., Roper, M. M., Biggs, J. S. et Peoples, M. B. (2018). Influence of co-application of nitrogen with phosphorus, potassium and sulphur on the apparent efficiency of nitrogen fertiliser use, grain yield and protein content of wheat: Review. *Field Crops Research*, 226(April), 56-65.
- Dupont, F. M., Hurkman, W. J., Vensel, W. H., Tanaka, C., Kothari, K. M., Chung, O. K. et Altenbach, S. B. (2006). Protein accumulation and composition in wheat grains: Effects of mineral nutrients and high temperature. *European Journal of Agronomy*, 25(2), 96-107.
- Eppendorfer, W. H. (1978). Effects of nitrogen, phosphorus and potassium on amino acid composition and on relationships between nitrogen and amino acids in wheat and oat grain. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 29(12), 995-1001.
- Fowler, D. B. (2003). Crop nitrogen demand and grain protein concentration of spring and winter wheat. *Agronomy Journal*, 95(2), 260-265.
- Fowler, D. B., Brydon, J., Darroch, B. A., Entz, M. H. et Johnston, A. M. (1990). Environment and genotype

- influence on grain protein concentration of wheat and rye. *Agronomy Journal*, 82(4), 655-664.
- Gaines, T. P. et Gaines, S. T. (1994). Soil texture effect on nitrate leaching in soil percolates. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 25(13-14), 2561-2570.
- Gaspar, P. E., Reeves, D. L., Schumacher, T. E. et Fixen, P. E. (1994). Oat cultivar response to potassium chloride on soils testing high in potassium. *Agronomy Journal*, 86(2), 255-258.
- Gilson, J. C. et Bjarnarson, V. W. (1958). Effects of Fertilizer Use on Barley in Northern Manitoba. *Journal of Farm Economics*, 40(4), 932-941.
- Goulet, J. et Menkovic, E. (2017). *Comment optimiser le rendement des céréales*.
[https://www.craaq.qc.ca/documents/files/Evenements/EPHY1701/Les bonnes pratiques dans les céréales de printemps_épurer.pdf](https://www.craaq.qc.ca/documents/files/Evenements/EPHY1701/Les_bonnes_pratiques_dans_les_cereales_de_printemps_epurer.pdf)
- Hamill, M. L. (2002). *The effect of cultivar, seeding date, seeding rate and nitrogen fertility on oat (Avena sativa L.) yield and milling quality*. University of Manitoba.
- Häner, L. et Brabant, C. (2016). L'art de fractionner l'azote pour optimiser le rendement et la teneur en protéines du blé. *Recherche agronomique suisse*, 7(2), 80-87.
- Holzappel, C. (2016). *Annual Report for the Agricultural Demonstration of Practices and Technologies (ADOPT) Program. Optimal Nitrogen Rates for Wheat with and without Plant Growth Regulators*.
<https://iharf.ca/wp-content/uploads/2016/04/Nitrogen-Rates-for-Wheat-with-and-without-Plant-Growth-Regulators.pdf>
- Institut de la statistique du Québec. (2020). *Superficie des grandes cultures et production, par regroupement de régions agricoles, Québec, 2007-2019*. <https://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/agriculture/grandes-cultures/grandes-cultures-2007-2019.html>
- ISQ. (2020a). Superficie des grandes cultures, rendement à l'hectare et production, par regroupement de régions administratives, Québec, 2007-2020. *Banque de données des statistiques officielles sur le Québec*, Mise à jour : 21 juillet 2020.
- ISQ. (2020b). *Superficie des grandes cultures, rendement à l'hectare et production, par regroupement de régions administratives, Québec, 2007-2020*. Institut de la statistique du Québec.
<https://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/agriculture/grandes-cultures/grandes-cultures-2007-2019.html>
- Izydorczyk, M. S. et McMillan, T. (2020). *Production d'orge, teneur en nutriments de l'orge, et qualité de l'orge brassicole dans l'Ouest canadien 2020*. Commission canadienne des grains.
- Khiari, L. et Parent, L. (2005). Phosphorus transformations in acid light-textured soils treated with dry swine manure. *Canadian Journal of Soil Science*, 85(1), 75-87.
- Khiari, L., Parent, L., Pellerin, A., Alimi, A. R. A., Tremblay, C., Simard, R. R. et Fortin, J. (2000). An Agri-Environmental Phosphorus Saturation Index for Acid Coarse-Textured Soils. *Journal of Environmental Quality*, 29(5), 1561-1567.
- LeSouder, C. (2020). *FRACTIONNER L'AZOTE EN TROIS APPORTS*. ARVALIS - Institut du végétal.
<https://www.arvalis-infos.fr/fractionner-l-azote-en-trois-apports-@/view-12293-arvarticle.html#:~:text=Satisfaire les besoins élevés du blé courant montaison&text=La plante absorbe alors une,est donc le plus conséquent.>
- Ma, B. L., Zheng, Z., Pageau, D., Vera, C., Fregeau-Reid, J., Xue, A. et Yan, W. (2017). Nitrogen and phosphorus uptake, yield and agronomic traits of oat cultivars as affected by fertilizer N rates under diverse environments. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 108(3), 245-265.

- MAAARO. (2017). *Guide agronomique des grandes cultures - Publication 811F* (édité par C. Brown, J. Follings, M. Moran et B. Rosser). <http://www.omafra.gov.on.ca/french/crops/pub811/pub811.pdf>
- MAAARO. (2021). *Production et commercialisation de l'avoine de meunerie en Ontario*. <http://www.omafra.gov.on.ca/french/crops/facts/98-018.htm>
- Magliano, P. N., Prystupa, P. et Gutiérrez-Boem, F. H. (2014). Protein content of grains of different size fractions in malting barley. *Journal of the Institute of Brewing*, 120(4), 347-352.
- MAPAQ. (2020). *Portrait diagnostique sectoriel de l'industrie des grains au Québec*. <https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Publications/Monographiegrain.pdf>
- May, W. E., Brandt, S. et Hutt-Taylor, K. (2020). Response of oat grain yield and quality to nitrogen fertilizer and fungicides. *Agronomy Journal*, 112(2), 1021-1034.
- May, W. E., Mohr, R. M., Lafond, G. P., Johnston, A. M. et Stevenson, F. C. (2004). Effect of nitrogen, seeding date and cultivar on oat quality and yield in the eastern Canadian prairies. *Canadian Journal of Plant Science*, 84(4), 1025-1036.
- MDDEP. (2010). *Règlement sur les exploitations agricoles (REA)*. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs. http://www.environnement.gouv.qc.ca/milieu_agri/agricole/index.htm
- Mehlich, A. (1984). Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. *Communications in soil science and plant analysis*, 15(12), 1409-1416.
- Menon, R. G. et Chien, S. H. (1995). Soil testing for available phosphorus in soils where phosphate rock-based fertilizers are used. *Fertilizer research*, 41(3), 179-187.
- Miransari, M. et Mackenzie, A. F. (2011). Development of a soil N test for fertilizer requirements for wheat. *Journal of Plant Nutrition*, 34(5), 762-777.
- Mohr, R. M., Grant, C. A., May, W. E. et Stevenson, F. C. (2007). The influence of nitrogen, phosphorus and potash fertilizer application on oat yield and quality. *Canadian Journal of Soil Science*, 87(4), 459-468.
- Mulder, E. G. (1954). Effect of mineral nutrition on lodging of cereals. *Plant and Soil*, (5), 246-306.
- N'Dayegamiye, A., Giroux, M. et Gasser, M. O. (2007). La contribution en azote du sol reliée à la minéralisation de la MO : facteur climatique et régions agricoles influençant les taux de minéralisation d'azote.
- Oplinger, E. S. et Wiersma, D. W. (1984). Belgian lodging rating system. *Field crops*, 26(4), 7.
- Parent, L., Pellerin, A. et Khiari, L. (2002). Le flux et la dynamique du phosphore dans les sols agricoles québécois. Colloque sur le phosphore.
- Pellerin, A., Parent, L., Fortin, J., Tremblay, C., Khiari, L. et Giroux, M. (2006). Environmental Mehlich-III soil phosphorus saturation indices for Quebec acid to near neutral mineral soils varying in texture and genesis. *Canadian Journal of Soil Science*, 86(4), 711-723.
- Pinthus, M. J. (1974). Lodging in Wheat, Barley, and Oats: The Phenomenon, its Causes, and Preventive Measures. *Advances in Agronomy*, 25, 209-263.
- Power, J. F. et Prasad, R. (1997). Soil Fertility Management for Sustainable Agriculture. Dans Taylor & Francis (dir.), (p. 384).
- Rajkumara, S. (2008). Lodging in cereals--A review. *Agricultural reviews*, 29(1), 55-60.
- RGCQ. (2017). Guide des Réseaux Grandes Cultures du Québec. <https://cerom.qc.ca/reseau-grandes-cultures-du-quebec/guides-rgcq.html>

- RGCQ. (2019). Guide des Réseaux Grandes Cultures du Québec. <https://cerom.qc.ca/reseau-grandes-cultures-du-quebec/guides-rgcq.html>
- Semican. (2021). Guide de semences céréales et fourragères.
- Sharpley, A. N. (1989). Relationship Between Soil Potassium Forms and Mineralogy. *Soil Science Society of America Journal*, 53(4), 1023-1028.
- Simmons, S. R., Oelke, E. A. et Anderson, P. M. (1985). *Growth and Development Guide for Spring Wheat* (édité par University of Minnesota). [https://conservancy.umn.edu/bitstream/handle/11299/165834/Growth and Development Guide for Spring Wheat.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://conservancy.umn.edu/bitstream/handle/11299/165834/Growth%20and%20Development%20Guide%20for%20Spring%20Wheat.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Statistique Canada. (2020). *Tableau 32-10-0359-01 Estimation de la superficie, du rendement, de la production, du prix moyen à la ferme et de la valeur totale à la ferme des principales grandes cultures, en unités métriques et impériales*. <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/tv.action?pid=3210035901>
- Subedi, K. D., Ma, B. L. et Xue, A. G. (2007). Planting Date and Nitrogen Effects on Grain Yield and Protein Content of Spring Wheat. *Crop Science*, 47(1), 36-44. <https://doi.org/10.2135/cropsci2006.02.0099>
- Traineau, M. et Métayer, J.-P. (2016). Effet du poids spécifique sur la valeur énergétique du blé et de l'orge chez les animaux monogastriques. *Lettre d'information ARVALIS pour la filière alimentation animale*, 44, 3.
- Tremblay, G. J., Boisvert, J., Fréchette, G. É., Saulnier, M., Alexandre, R. et Vanasse, A. (2011). Évaluation à moyen terme des besoins en engrais minéraux (N, P, K) d'une rotation en grandes cultures sur sol argileux. *Canadian Journal of Soil Science*, 91(4), 637-646. 10.4141/cjss10013
- Weegels, P. L., Hamer, R. J. et Schofield, J. D. (1996). Functional Properties of Wheat Glutenin. *Journal of Cereal Science*, 23(1), 1-17.
- Ziadi, N., Bélanger, G., Cambouris, A. N., Tremblay, N., Nolin, M. C. et Claessens, A. (2008). Relationship between phosphorus and nitrogen concentrations in spring wheat. *Agronomy Journal*, 100(1), 80-86. 10.2134/agronj2007.0119

Annexe I

Annexe I-A. Localisation et description sommaire des sites des essais de fertilisation de blé de printemps

Expéditeur des données (Institution)	Site	Série de sol, texture ¹	Essais NPK			Essais N			Essais P		Essais K	
			Lat.	Long.	Argile %	Matière organique		Rendement grains	Saturation en P ²	Rendement grains	Teneur en K ²	Rendement grains
						PAF ¹ %	WB ¹ %	Moy. kg/ha	ISP ₁ (%)	Moy. kg/ha	K _{M3} kg/ha	Moy. kg/ha
Programme de soutien aux essais de fertilisation (PSEF, MAPAQ)	B-1	St-André, LSA-LS	47,35	-70,01	20	7,4	nd	1794	15,0	1766	354	1802
	B-2	Kamo uraska, A-AL	47,35	-70,03	46	4,4	nd	3460	6,1	4204	506	4128
	B-3	La Pocatière, A-ALO	47,35	-70,03	56	3,4	nd	4355	5,5	4109	633	4454
	B-4	Batiscan, L-Li	46,68	-71,92	12	4,4	nd	2544	10,0	2982	316	2997
	B-5	Dupas, LLi	46,26	-72,94	22	3,5	nd	4002	6,5	4584	153	4235
	B-6	Chaloupe, LLi	46,29	-72,80	15	3,6	nd	5886	na	na	131	6365
	B-7	Le Bras, L	nd	nd	15	na	nd	na	2,7	3457	Na	na
	B-8	St-Jude, L-LLi	46,61	-71,17	24	3,8	nd	2428	4,2	2806	112	2603
	B-9	Rivière-du-loup, L	46,61	-71,19	19	4,6	nd	2440	20,0	2749	150	2652
	B-10	Le Bras, SL-LS	46,65	-70,94	9	4,6	nd	2681	0,8	2681	83	3120
	B-11	Chicot vers St-Benoit, L-LLi	46,61	-71,17	24	4,7	nd	2501	2,1	2529	117	2338
	B-12	Chicot, L-LS-LSA	45,60	-73,91	19	5,0	nd	2460	2,4	3268	94	2905
	B-13	Sainte-Rosalie, L-LA-LSA	45,57	-73,97	25	6,9	nd	4456	7,2	5083	106	4716
	B-14	Brandon, A-LA	46,13	-73,38	38	4,5	nd	5112	6,2	5447	394	5785
	B-15	Saint-Urbain, L-LA-LLiA	46,15	-73,39	30	2,6	nd	2205	6,9	3788	364	3136
	B-16	Saint-Urbain, ALO-LS	45,58	-73,25	36	4,0	nd	2721	2,6	3137	744	3020
	B-17	Saint-Benoit, ALo	45,58	-73,24	76	7,3	nd	3129	21,0	2690	982	3008
	B-18	Saint-Jacques, LS	45,17	-73,42	19	4,3	nd	3557	9,3	4662	207	4200
	B-19	Kingsey, LA-LS-LSA	45,20	-73,41	26	2,8	nd	4438	4,2	4852	143	4840
	B-20	Savoie, LS	46,15	-71,75	17	5,3	nd	3163	4,0	3479	358	3587
	B-21	St-André, LS-LSA	46,12	-71,90	15	4,8	nd	2951	13,0	2967	133	3206
Les Moulins de Soulanges	B-36	nd, LA	nd	nd	31	8,2		1860	na	na	na	na
Agriculture et agroalimentaire Canada (AAC)	B-22	Lanoraie, S	nd	nd	5	nd	2,0	2391	na	na	na	na
	B-23	Lanoraie, S	nd	nd	5	nd	2,7	2185	na	na	na	na
	B-24	Lanoraie, S	nd	nd	5	nd	2,4	1248	na	na	na	na
	B-25	Saint-Blaise, LLiA	nd	nd	28	nd	2,2	3216	na	na	na	na
	B-26	Sabrevois, LA	nd	nd	29	nd	1,8	1985	na	na	na	na
	B-27	Massueville, SL	nd	nd	9	nd	4,3	2308	na	na	na	na
	B-28	Bearbrook; Saint-Laurent, AL	nd	nd	46	nd	3,4	3005	na	na	na	na
	B-29	Sainte-Brigide ; Botreaux, L	nd	nd	19	nd	2,9	3083	na	na	na	na
	B-30	Massueville, S	nd	nd	9	nd	3,9	1350	na	na	na	na
	B-31	Bearbrook, L	nd	nd	22	nd	2,4	1332	na	na	na	na
	B-32	Sainte-Brigide, L	nd	nd	18	nd	3,1	1429	na	na	na	na
B-33	Massueville, SL	nd	nd	7	nd	4,0	2004	na	na	na	na	
Centre de Recherche sur les grains (CEROM)	B-34	Sainte-Rosalie, LA	nd	nd	nd	nd	4,8	3378	6,5	3814	624	3770
	B-35	Sainte-Rosalie, LA	nd	nd	nd	nd	4,8	2125	6,5	2207	624	2154

¹ A, Argile; ALi, Argile Limoneuse; ALo, Argile Lourde; L, Loam; LA, Loam argileux; LLi, Loam Limoneux; LLiA, Loam Limono-Argileux; LSA, Loam Sablo-Argileux; LSA, Loam sableux; S, Sable; SL, Sable loameux; na, non applicable; nd, non disponible; PAF: matière organique dosée par la méthode de perte au feu; WB: matière organique dosée par la méthode Walkley-Black.

² Les seuils critiques de richesse en P et en K préétablis au protocole étaient un ISP de 7,6 ou 13,1 % selon la teneur en argile pour les essais P et une teneur de 200 kg K_{M3}/ha pour les essais K.

Annexe I-B. Localisation et description sommaire des sites des essais en fertilisation de l'orge

Expéditeur des données (Institution)	Essais NPK				Essais N		Essais P		Essais K		
	Site	Série de sol, texture ¹	Lat.	Long.	Matière	Rendement	Saturation	Rendement	Teneur en	Rendement	
					Organique ²	grains	en P ³	grains	K ³	grains	
				Argile %	Moy. %	Moy. kg/ha	ISP ₁ %	Moy. kg/ha	K _{M3} kg/ha	Moy. kg/ha	
Programme de soutien aux essais de fertilisation (PSEF, MAPAQ)	O-1	Kamouraska, A, ALi	47,35	-70,03	56	4,5	4 350	7,8	4 015	726	4 295
	O-2	Lac au Saumon, LA, LLiA	48,43	-67,39	31	10,3	4 662	6,7	4 579	105	4 570
	O-3	Kamouraska, A, ALi	47,35	-70,03	54	4,3	3 786	na	na	na	na
	O-4	Saint-Pascal, ALi, LLiA, ALi, LA	47,38	-69,99	45	4,1	3 391	2,1	2 992	610	3 950
	O-5	Irène, LLi	48,54	-67,62	19	4,5	5 037	2,7	4 839	132	5 001
	O-6	Luce, LS	47,86	-69,48	19	nd	nd	10,0	5 897	90	4 670
	O-7	Saint-André, LSA	47,67	-69,68	21	6,8	3 064	11,0	2 591	267	2 929
	O-8	Alma, ALi	48,51	-71,58	46	8,0	3 006	1,4	3 334	402	2 807
	O-9	Larouche, ALi	48,46	-71,60	54	6,7	4 228	4,9	4 439	538	4 424
	O-10	Achigan, S, LS, SL	46,30	-72,83	6	3,4	3 226	60,0	2 335	129	3 458
	O-11	Sainte-Rosalie, LA, LLiA	46,34	-72,90	33	3,8	4 547	6,1	5 155	538	5 099
	O-12	Roulier, LLiA, ALi	47,44	-79,47	44	5,9	4 929	1,4	4 765	297	4 640
	O-13	Duhamel, LLi	47,25	-79,35	25	nd	nd	4,6	2 994	na	na
	O-14	Roquemaure, A, ALo	48,68	-79,21	60	9,1	4 696	na	na	564	5 385
	O-15	Du creux, L	46,59	-70,93	20	5,6	4 922	2,7	5 492	212	5 492
	O-16	Bois-Francis, L, LS, LSA	46,47	-71,02	19	6,6	4 054	5,7	3 950	305	3 969
	O-17	Le Bras, LLi, L	46,61	-71,17	19	2,9	3 804	2,4	4 134	93	3 960
	O-18	Le Bras, LLi, L	46,61	-71,17	22	3,5	3 125	3,0	3 409	114	2 821
	O-19	Sabrevois, L	45,21	-73,29	21	3,1	4 586	3,4	4 745	171	4 770
	O-20	Saint-Blaise, L, LS, LSA	45,17	-73,48	20	4,6	4 904	3,7	5 070	76	5 243
	O-21	Saint-Benoit, LS	45,18	-73,49	15	2,3	5 199	1,1	5 951	288	6 133
	O-22	Providence, LLiA, ALi	45,35	-73,06	35	4,2	3 726	4,2	4 108	204	3 843
	O-23	Bois-Francis, L, LS	46,16	-71,73	15	5,8	2 701	1,0	3 833	174	3 403
	O-24	Kingsey, LS	46,15	-71,76	11	6,3	3 875	8,8	4 605	161	4 160
Semican	O-25	nd, LS	nd	nd	nd	6,5	4 676	na	na	na	na
Tous les sites		-	-	-	30	5,3	3 742	7,0	3 885	258	3 959

¹ A, Argile; ALi, Argile Limoneuse; ALo, Argile Lourde; L, Loam; LA, Loam argileux; LLi, Loam Limoneux; LLiA, Loam Limono-Argileux; LSA, Loam Sablo-Argileux; LS, Loam sableux; S, Sable; SL, Sable loameux; nd, non disponible; na, non applicable

² La matière organique dosée par la méthode de perte au feu. Pour le site de Semican la matière organique dosée par la méthode de Walkley-Black a été convertie en utilisant l'équation du Centre d'expertise en analyse agroenvironnementale du Québec (CEAEQ) MA 1010 PAF édition 2003-03-27 : $MO_{PAF} = 0,993 2 * MO_{WB} + 0,587$.

³ Les seuils critiques préétablis au protocole étaient un ISP₁ de 7,6 ou 13,1 % selon la teneur en argile pour les essais P et une teneur de 200 kg K_{M3}/ha pour les essais K.

Annexe I-C. Localisation et description sommaire des sites des essais de fertilisation de l'avoine

Expéditeur des données (Institution)	Site	Essais NPK				Essais N		Essais P		Essais K	
		Série de sol, texture ¹	Lat.	Long.	Argile %	Matière org anique ² Moy. %	Rendement en grains Moy. kg/ha	Teneur en P ³ ISP ₁ %	Rendement en grains Moy. kg/ha	Teneur en K ³ K _{M3} kg/ha	Rendement en grains Moy. kg/ha
Programme de soutien aux essais de fertilisation (PSEF, MAPAQ)	A-1	Saint-Pacôme, LS, LSA	47,34	-70,09	21	5,0	4669	5,4	4383	257	4877
	A-2	Val Brillant, LLi, L, LA	48,41	-67,39	30	5,0	2678	4,5	2673	261	2788
	A-3	Amqui, LA, LLi, LLiA	48,40	-67,36	29	5,2	3873	7,0	4169	336	4082
	A-4	Irène, LLiA, LA	48,41	-67,36	29	9,9	3801	5,1	4471	113	4517
	A-5	Luce, LS,	47,86	-69,48	15	3,1	3407	nd	2214	101	3583
	A-6	Taillon, LLiA, LA	48,51	-71,58	38	9,2	2919	13,7	2692	230	3506
	A-7	Hébertville, AL, LLiA	48,51	-71,57	46	6,8	4076	12,9	3858	173	3881
	A-8	Larouche, AL	48,46	-71,60	52	5,4	3396	2,8	3454	440	3399
	A-9	Roquemaure, ALo	48,66	-79,17	87	10,1	2525	1,9	2459	557	2741
	A-10	Palmarolle, ALo	48,68	-79,24	80	8,6	3962	2,6	4276	464	4155
	A-11	Guérin, ALo	47,40	-79,35	70	6,2	4240	2,3	5339	752	4383
	A-12	Le Bras, L	46,61	-71,18	21	3,0	3035	10,1	3378	229	3611
	A-13	Le Bras, L, LLi	46,61	-71,18	24	4,0	4205	5,1	4423	183	3838
	A-14	Le Bras, L	46,61	-71,17	17	2,2	3499	1,9	3124	88	3560
	A-15	Beaurivage sur Le Bras, L, LS	46,61	-71,17	20	3,3	4362	3,7	4542	153	4434
	A-16	Arthabaska, LS	46,16	-71,73	15	7,0	2791	1,0	3021	158	2971
	A-17	Bedford, LS, L	46,12	-71,9	18	5,8	4403	11,0	4043	121	4067
	A-18	Kingsey, LS, L	46,15	-71,76	17	5,5	2846	4,4	2795	204	2998
	A-19	Kingsey, LS	46,15	-71,76	11	5,5	2762	8,7	2841	129	2990
Agriculture et agroalimentaire Canada (AAC)	A-20	Labarre, ALi	48,85	-72,55	49	3,6	5035	na	na	na	na
	A-21	Labarre, ALi	48,85	-72,55	49	4,7	3705	na	na	na	na

¹A, Argile; ALi, Argile limoneuse; ALo, Argile lourde; L, Loam; LA, Loam argileux; LLi, Loam limoneux; LLiA, Loam limono-argileux; LSA, Loam sablo-argileux; LS, Loam sableux; S, Sable; SL, Sable loameux; LS, Loam sableux; Li, Limon; AS, Argile sableuse; na, non applicable; nd, non disponible.

² La matière organique a été dosée par la méthode de perte au feu pour les sites du PSEF et par la méthode Walkley-Black pour les sites d'AAC.

³ Les seuils de richesse en P et en K préétablis au protocole étaient un ISP₁ de 7,6 ou 13,1 % selon la teneur en argile, et une teneur de 200 kg K_{M3}/ha.

Annexe II

Annexe II-A. Portrait des essais de blé de printemps avant la validation des données

	PSEF	AAC	Les Moulins de Soulanges	CEROM
Nombre de sites <i>Total, avant validation</i>	21	12	1	2
Période	2013 à 2016	2004 à 2006	2018	1998 et 2002
Régions administratives	Bas St-Laurent Capitale-Nationale Mauricie Chaudière-Appalaches Lanaudière Laurentides Montérégie Centre-du-Québec	Lanaudière Montérégie	Saguenay—Lac-St-Jean	Montérégie
Période(s) de semis	Début mai jusqu'à la fin mai en régions périphériques	Fin avril (20) jusqu'à début mai (9)	nd	10 et 28 mai
Durée moyenne des essais	108 ± 7 jours	104 ± 6 jours	nd	88 ± 4 jours
Doses testées (kg/ha) <i>L'intervalle testé varie également en fonction des sites et des années.</i>	N 0 à 210 P ₂ O ₅ 0 à 120 K ₂ O 0 à 120	0 à 200 N	0 à 120 N	N 0 à 120 P ₂ O ₅ 0 à 60 K ₂ O 0 à 60
Groupes de textures représentés	41 % de G1 34 % de G2 25 % de G3	50 % de G3 25 % de G1 et de G2	G1 seulement	G1 seulement
P _{Mehlich-3} moyen des sols	72 ± 56 ppm	236 ± 286 ppm	31 ppm	55 ppm
ISP ₁ moyen des sols	7,1 ± 5,1 %	15,3 ± 16,3 %	2,0 %	6,4 ± 0,3 %
K _{Mehlich-3} moyen des sols	138 ± 117 ppm	130 ± 38 ppm	357 ppm	278 ± 9 ppm
Matière organique du sol	4,5 ± 1,3 % Méthode par perte au feu	2,9 ± 0,8 % Méthode Walkley-Black	8,2 % Méthode par perte au feu	4,8 % Méthode Walkley-Black
pH _{eau} du sol	6,3 ± 0,6	6,6 ± 0,5	6,0	7,6 ± 0,1
Structure des unités expérimentales	Plan aléatoire de 3 blocs complets. Essais NPK indépendants.	Un essai N de 4 blocs aléatoires complets de 8 traitements (6 traitements considérés dans l'analyse de l'effet de la dose sur le rendement)	Un essai N de 3 blocs complets aléatoires de 7 traitements (quatre traitements considérés dans l'analyse de l'effet de la dose sur le rendement)	11 traitements de fertilisation N-P-K : 1 témoin 0-0-0 + 4 doses N (0-60-90-120) + 3 doses P (0-30-60) + 3 doses K (0-30-60), avec la dose centrale constante pour les éléments non testés.
Variétés culturales	AC Brio Hoffman Hélios Magog Major Nass SS Blomidon Touran	AC Barrie	Variétés confidentielles de blé panifiable	AC Barrie Diablo

	PSEF	AAC	Les Moulins de Soulanges	CEROM
Espacement entre-rang	12 à 19 cm	15 cm	nd	18 cm
Densité de population	<i>Taux de semis :</i> 375-450 grains/m ²	<i>Taux de semis :</i> 150 kg/ha (400-425 grains/m ²)	nd	<i>Densité visée :</i> 425 plants/m ²
Application des engrais	Volée Incorporation des engrais au semis	Volée Engrais laissés en surface	nd	Volée Incorporation des engrais au semis
Précédents culturaux	Blé Orge Soya Inconnu	Blé Pomme de terre Soya	nd	Blé de printemps Maïs grain
Irrigation	Non irrigué	Non irrigué	Non irrigué	Non irrigué
Évaluations à la récolte	Hauteur des plants Verse Nitrate	Verse	Verse Hauteur des plants	<i>Disponible pour un site :</i> Verse Hauteur des plants
Évaluations post-récolte	Teneur en protéines Indice de chute Poids mille grains Poids spécifique Analyses de biomasses de récolte	Poids mille grains Poids à l'hectolitre Teneur en N et P des pailles en % Teneur en N et P des grains en %	Teneur en protéines Indice de chute	<i>Disponible pour un site :</i> Poids spécifique Poids mille grains Teneur en protéines

Nd, information non disponible.

Annexe II-B. Portrait des essais d'orge avant la validation des données

	PSEF	Semican
Nombre de sites <i>Total, avant validation</i>	N : 22 P : 23 K : 23	N : 1
Période	2013-2017	2014
Régions administratives	Bas-Saint-Laurent Saguenay--Lac-Saint-Jean Mauricie Abitibi-Témiscamingue Chaudière-Appalaches Montérégie Centre-du-Québec	Centre-du-Québec
Période(s) de semis	30 avril - 5 juin	21 mai
Durée moyenne des essais	103 jours (91 - 117 jours)	92 jours
Doses testées (kg/ha) <i>L'intervalle testé varie en fonction des sites.</i>	N 0 à 120 P ₂ O ₅ 0 à 120 K ₂ O 0 à 120	N 0 à 120
Groupes de textures représentés	G1 42 % G2 30 % G3 28 %	G3 100 %
P _{Mehlich-3} moyen des sols	73,2 ± 97,1 ppm	27 ppm
ISP ₁ moyen des sols	7,0 ± 8,8 %	2,7 %
K _{Mehlich-3} moyen des sols	129,4 ± 80,2 ppm	144 ppm
Matière organique du sol	5,3 ± 2,1 %	6 %*
N-NO ₃ au printemps 0-30 cm	10 ± 6 ppm (Essai N)	nd
pH _{eau} du sol	6,34 ± 0,46	7,4
Structure des unités expérimentales	3 blocs complets aléatoires Essais NPK indépendants	Dispositif en carré latin (4 répétitions)
Variétés culturales	Altona, Alyssa, Bentley, Champion, Cyane, Leader, Newdale, Rhea, Selena, Synasolis	Cerveza, Newdale
Espacement entre-rang	13 à 19 cm	17,8 cm
Application des engrais	À la volée et incorporé (En présemis) À la volée et laissé en surface (En saison / fin tallage)	À la volée et incorporé (début tallage) À la volée et laissé en surface (En saison / fin tallage)
Précédents culturaux	Avoine, Blé, Mais, Orge, Prairie de graminées, Soya	Blé d'automne
Irrigation	Non	Non
Évaluation post-récolte	Verse, taille des plants, humidité du grain	Verse, Grains minces (thin), Grains ventrus (plump), humidité du grain
Évaluation de la qualité du grain	Poids mille grains, poids spécifique	Poids spécifique, poids mille grains, protéine, cendre, amidon

nd, non disponible. * La MO a été dosée initialement par la méthode de Walkley-Black. Cependant, dans le cadre de ce travail, la valeur a été convertie en MO_{PAF} en utilisant l'équation du Centre d'expertise en analyse agroenvironnementale du Québec (CEAEQ) MA 1010 PAF édition 2003-03-27 : MO_{PAF} = 0,993 2 × MO_{WB} + 0,587.

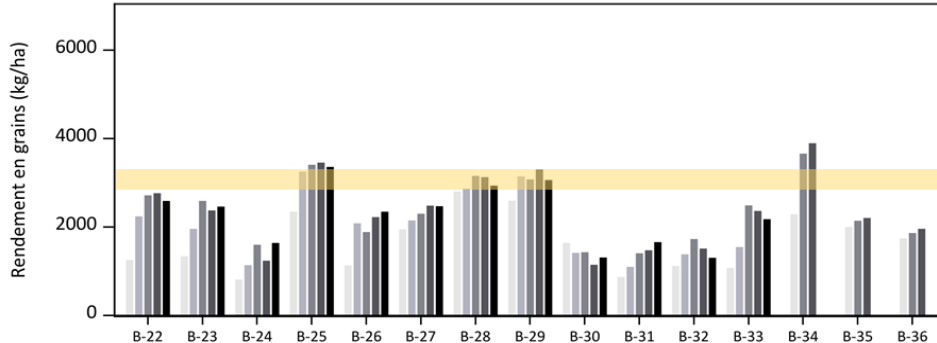
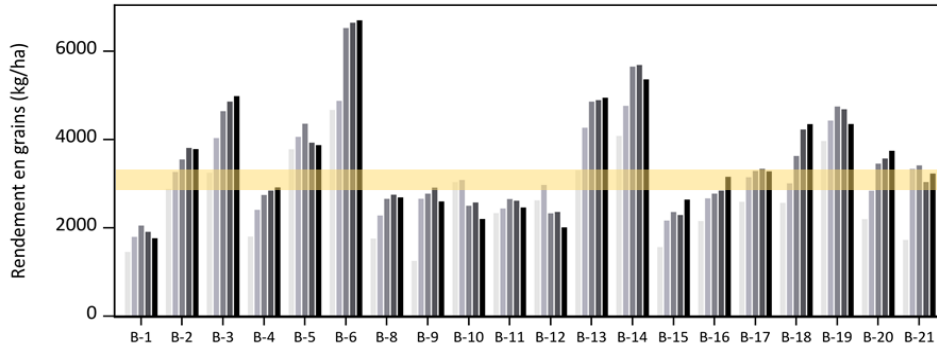
Annexe II-C. Portrait des essais d'avoine avant la validation des données

	PSEF	Agriculture et agroalimentaire Canada
Nombre de sites <i>Total, avant validation</i>	19	2
Période	2013-2018	2013-2014
Régions administratives	Bas-Saint-Laurent Saguenay–Lac-Saint-Jean Abitibi-Témiscamingue Chaudière-Appalaches Centre-du-Québec	Saguenay–Lac-Saint-Jean
Période de semis	5 mai au 6 juin	21 au 22 mai
Durée moyenne des essais	111 ± 9 jours	111 ± 8 jours
Doses testées (kg/ha) <i>L'intervalle testé varie en fonction des sites.</i>	N 0 à 100 P ₂ O ₅ 0 à 120 K ₂ O 0 à 120	N 0 à 150
Classes texturales représentées	G1 : 37 % G2 : 32 % G3 : 32 %	G1 : 100 %
P _{Mehlich-3} moyen des sols	60 ± 41 ppm (essais P)	100 ± 44 ppm
ISP ₁ moyen des sols	5,8 ± 4,0 % (essais P)	nd
K _{Mehlich-3} moyen des sols	116 ± 81 ppm (essais K)	254 ± 23 ppm
Matière organique du sol	5,9 ± 2,2 % (essais N) <i>Méthode par perte au feu</i>	4,2 ± 0,8 % <i>Méthode Walkley-Black</i>
pH _{eau} du sol	6,1 ± 0,5	6,5
Structure des unités expérimentales	Essais NPK indépendants Blocs complets aléatoires - 3 répétitions	Essai N en tiroirs (split-plot) en blocs complets aléatoires, avec 4 doses de N en parcelles principales et 10 cultivars en sous-parcelles. - 4 répétitions
Variétés culturales	Bia Canmore Casino CDC Orrin Dieter Hidalgo Navaro Nice Optimum Rigodon Synextra	Bullet CDC Minstrel CDC Morrison CDC Orrin CDC Seabiscuit CDC Orrin CFA1317 Dieter OA1225-2 OA1331-5 OA1331-5-5 OA1357-2 SA060123 CFA1107
Espacement entre-rang	13 à 19 cm	18 cm
Densité de population	<i>Taux de semis : 325 à 375 grains/m²</i>	<i>Population visée : 300 plants/m²</i>
Application des engrais	À la volée et incorporé (en présemis) ou laissé en surface (post-levée)	À la volée et incorporé en présemis
Précédents culturaux	Aucune, Avoine, Blé, Maïs, Orge, Prairie de graminées, Soya	Céréale (espèce non précisée)
Évaluation à la récolte	Verse Hauteur des plants Humidité des grains Nitrate du sol (essais N)	Verse Hauteur des plants Humidité des grains
Évaluation de la qualité des grains	Poids mille grains Poids spécifique Analyses de biomasses de récolte	Poids mille grains Poids spécifique Qualité de mouture (contenu en gruau et proportion de grains non décortiqués) Qualité de la composition (teneurs en b-glucane, en protéines et en huile)

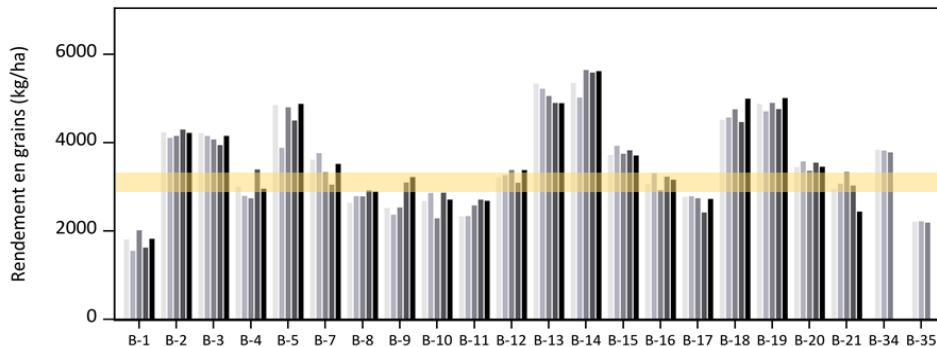
nd : non disponible.

Annexe II

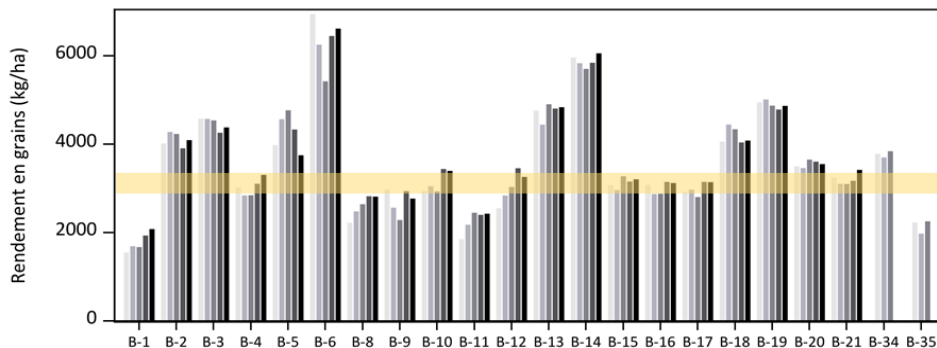
Blé, essais N



Blé, essais P

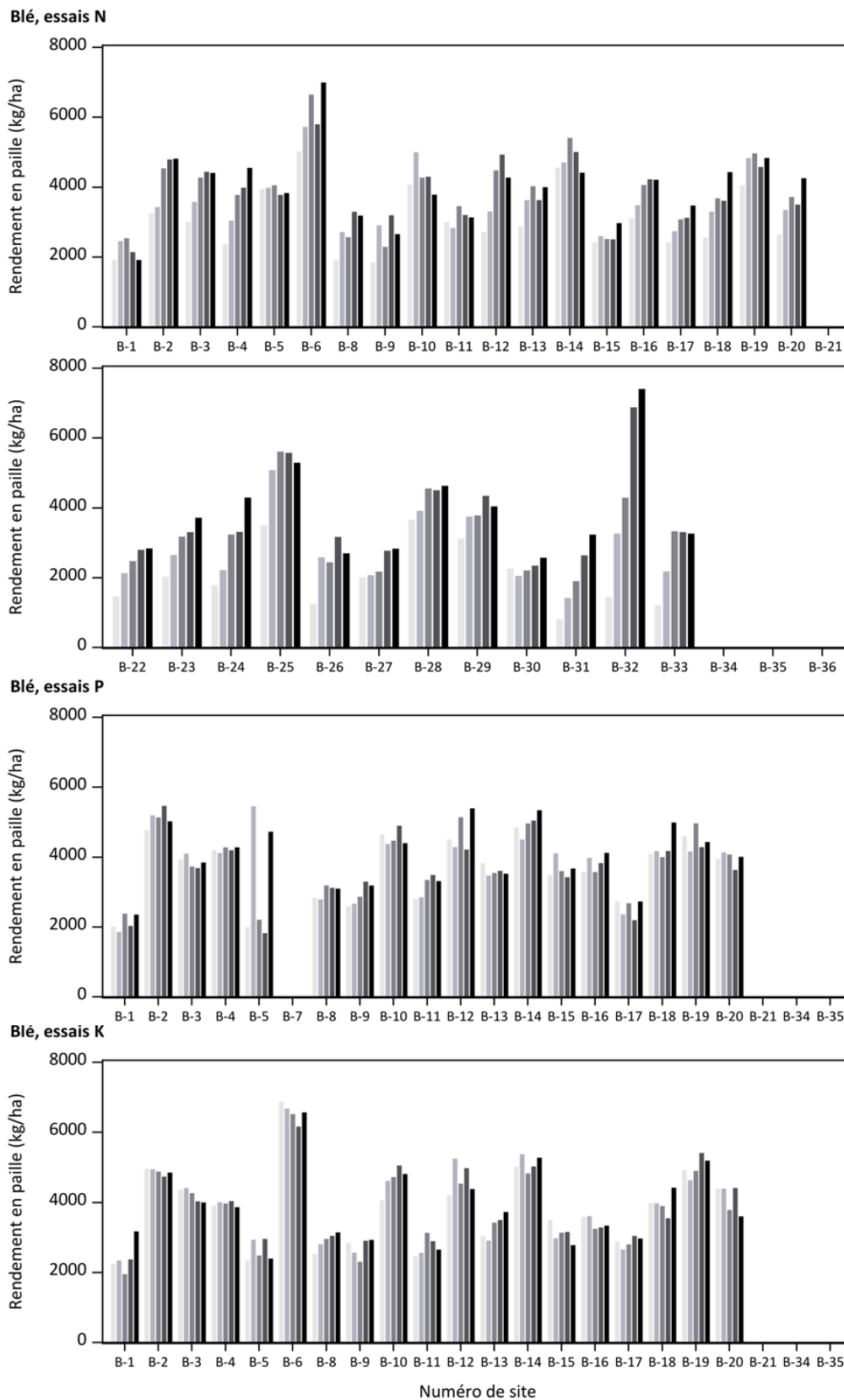


Blé, essais K



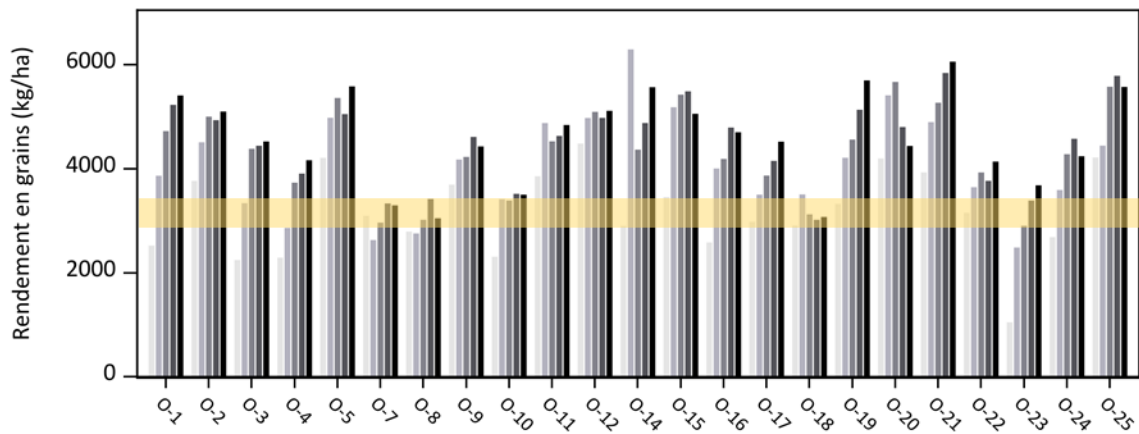
Numéro de site

Annexe III-A. Rendements en grains des essais de blé selon les sites et les doses croissantes d'engrais. Les barres d'histogrammes de gris pâle à gris foncé représentent les doses croissantes de N, P₂O₅ ou K₂O selon l'essai. La bande jaune illustre les rendements provinciaux moyens pour la période 1998-2018 (Statistique Canada, 2020).

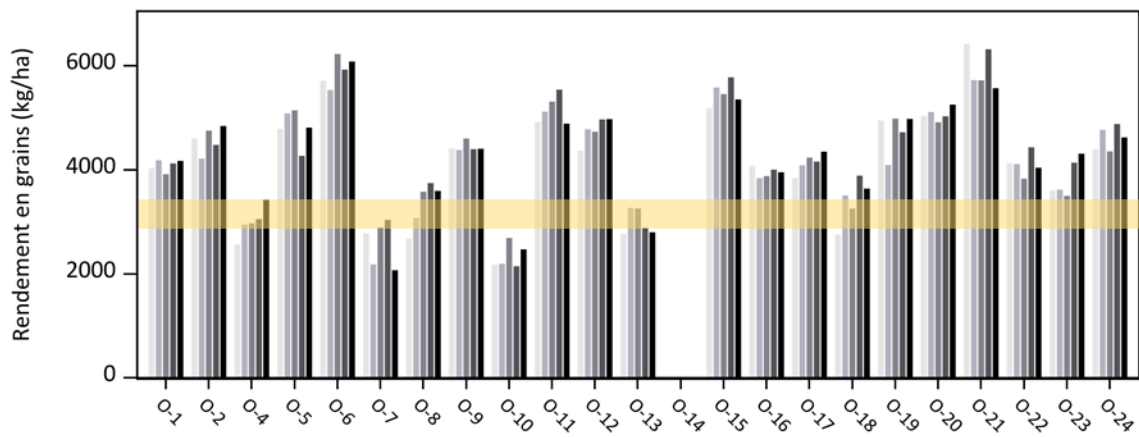


Annexe III-B. Rendements en paille des essais de blé selon les sites et les doses croissantes d'engrais. Les barres d'histogrammes de gris pâle à gris foncé représentent les doses croissantes de N, P₂O₅ ou K₂O selon l'essai.

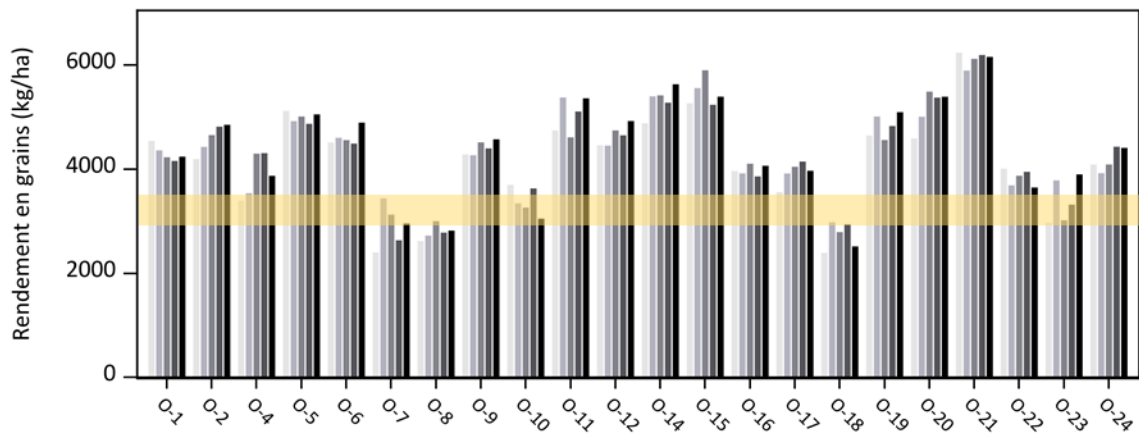
Orge, essais N



Orge, essais P



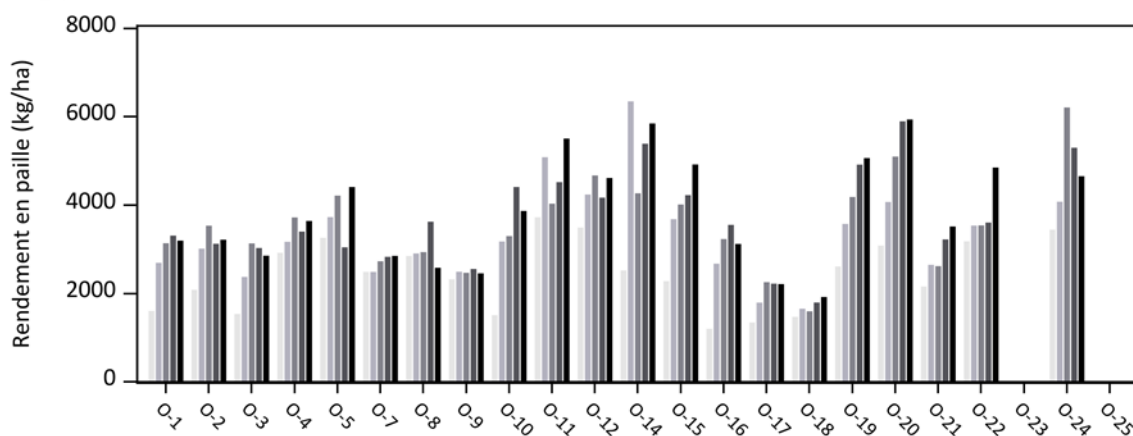
Orge, essais K



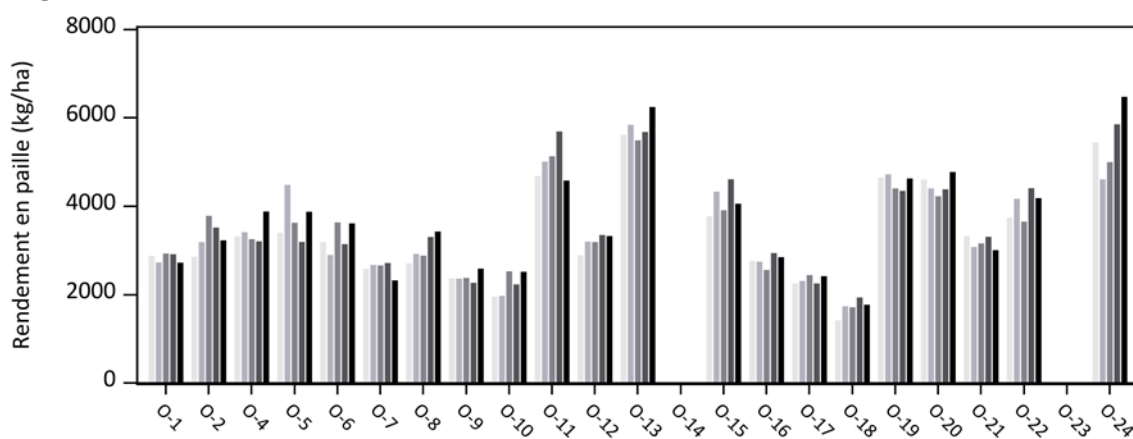
Numéro de site

Annexe III-C. Rendements en grains des essais d'orge selon les sites et les doses croissantes d'engrais. Les barres d'histogrammes de gris pâle à gris foncé représentent les doses croissantes de N, P₂O₅ ou K₂O selon l'essai. La bande jaune illustre les rendements de référence pour la période des essais (ISQ, 2020a).

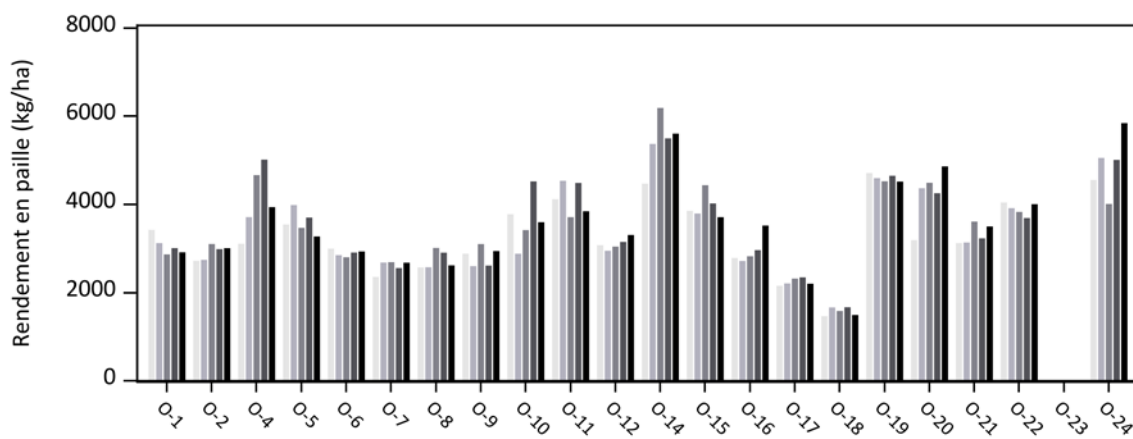
Orge, essais N



Orge, essais P



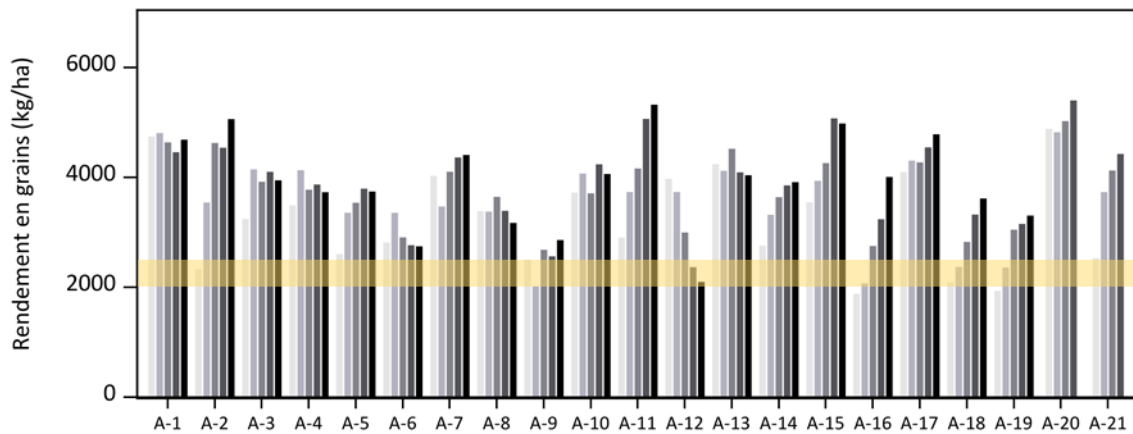
Orge, essais K



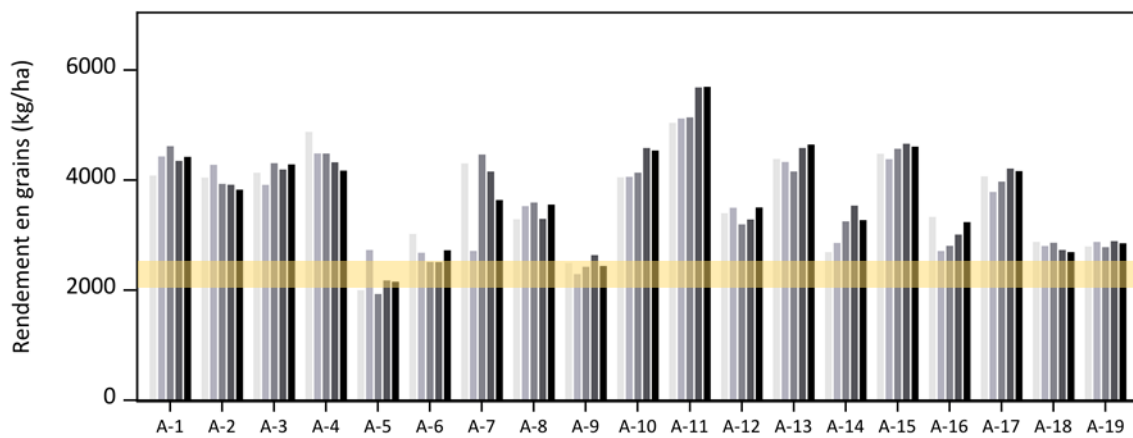
Numéro de site

Annexe III-D. Rendements en paille des essais d'orge selon les sites et les doses croissantes d'engrais. Les barres d'histogrammes de gris pâle à gris foncé représentent les doses croissantes de N, P₂O₅ ou K₂O selon l'essai.

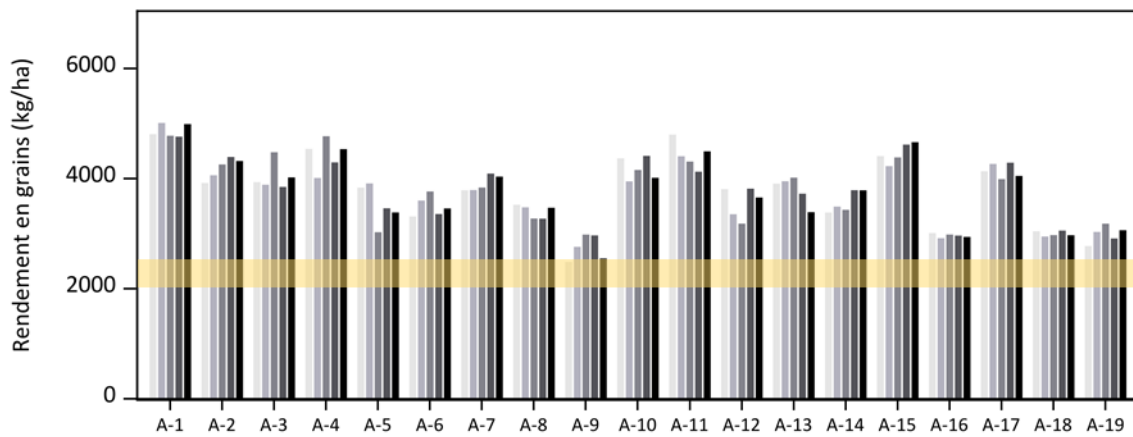
Avoine, essais N



Avoine, essais P



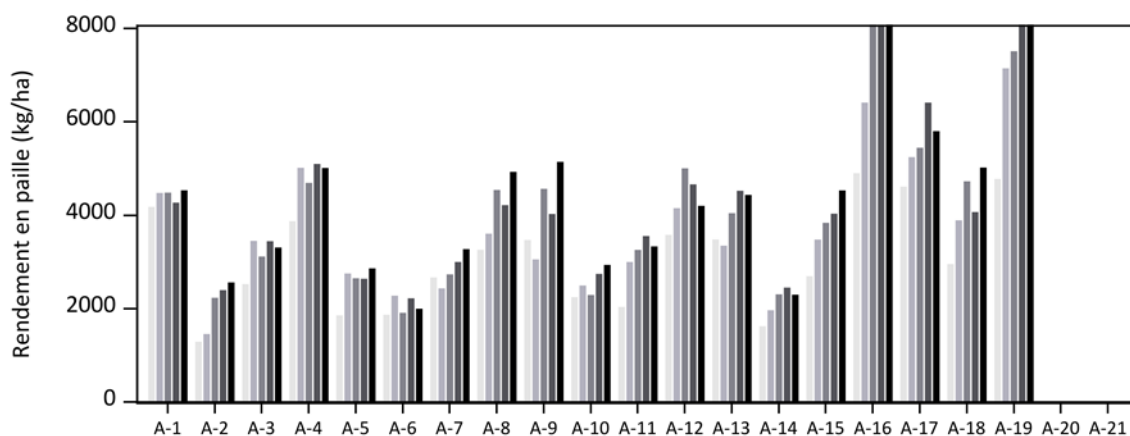
Avoine, essais K



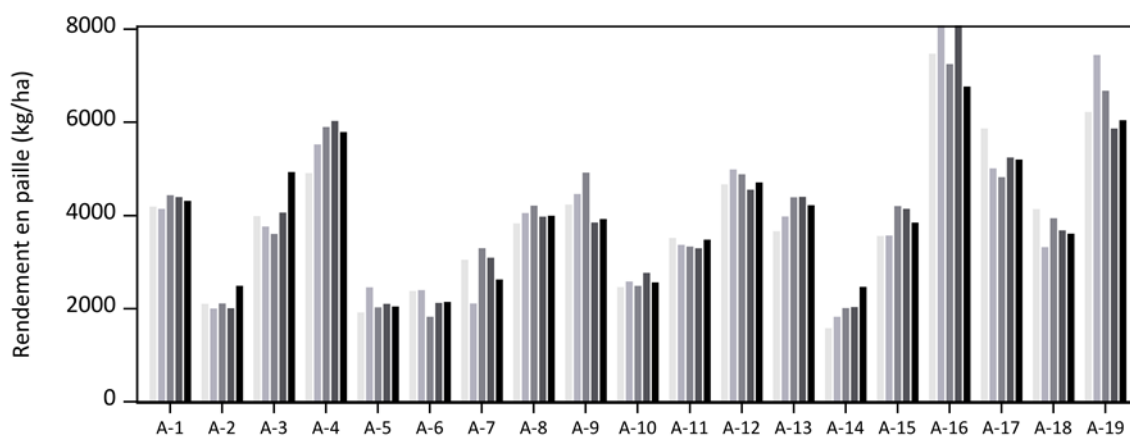
Numéro de site

Annexe III-E. Rendements en grains des essais d'avoine selon les sites et les doses croissantes d'engrais. Les barres d'histogrammes de gris pâle à gris foncé représentent les doses croissantes de N, P₂O₅ ou K₂O selon l'essai. La bande jaune illustre les rendements de référence provinciaux pour la période des essais (ISQ, 2020b).

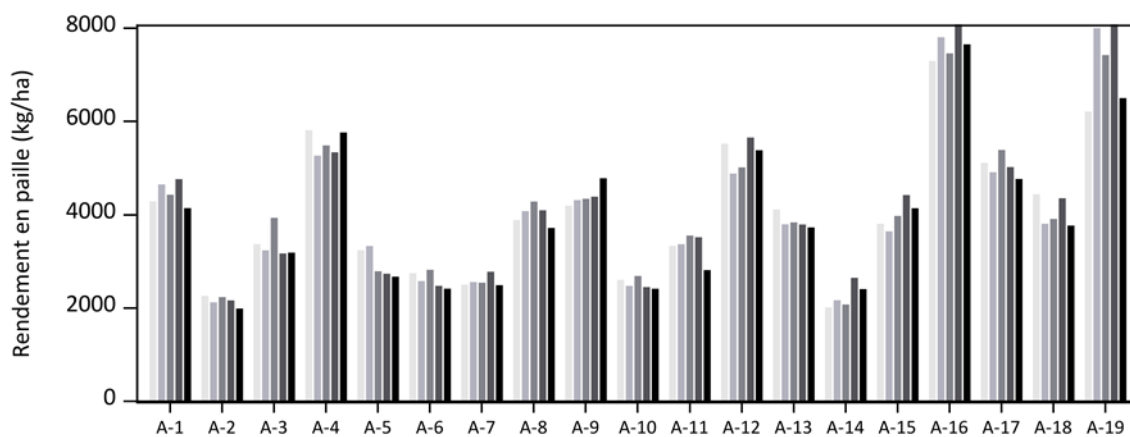
Avoine, essais N



Avoine, essais P



Avoine, essais K



Numéro de site

Annexe III-F. Rendements en paille des essais d'avoine selon les sites et les doses croissantes d'engrais. Les barres d'histogrammes de gris pâle à gris foncé représentent les doses croissantes de N, P₂O₅ ou K₂O selon l'essai.

Annexe IV

Annexe IV-A. Sommaire des données exclues de l'analyse et justifications – blé de printemps

Code du site	Donnée exclue	Raison justifiant l'exclusion
B-1	Essai N : 103, 203	Parcelles abandonnées en début de saison.
	Essai N : 303	Parcelle affectée par un traitement herbicide.
	Essai K : 111	Parcelle clairsemée et affichant un faible rendement par rapport à l'ensemble du site.
	Essai K : 113 (paille)	Rendement en paille anormalement élevé (+69 %) par rapport à l'ensemble du site.
B-2	Essai K : 316	Rendement anormalement faible (-26 %) par rapport à l'ensemble du site.
	Essai P : 109 (paille)	Rendement anormalement élevé (+37 %) par rapport à l'ensemble du site.
B-4	Essai N : 307	Forte pression de mauvaises herbes, photo à l'appui.
	Essai N : 111	Les grains sont contaminés par des mauvaises herbes ou de la terre.
	Essai P : 116, 216, 215	
	Essai K : 106, 301, 305	
	Essai K : bloc 3	L'exclusion des parcelles 301 (T12) et 305 (T15) restreint les comparaisons à deux doses seulement, ce qui risque de biaiser la sélection de la dose agronomique optimale.
	Essais N, P et K (paille)	Paille contaminée par les mauvaises herbes. Impossible de les séparer, car le matériel était mélangé à la sortie de la batteuse.
B-5	Essai N : 113	Perte de grains d'environ 300 g.
	Essai P : bloc 3	Grands écarts et incohérence entre les rendements en grains et en paille des traitements du bloc 3 qui révèlent une problématique non identifiée. Doute sur la qualité des données.
B-6	Essai K : 106 (paille)	Rendement anormalement élevé (+30 %) par rapport à l'ensemble du site.
	Essai K : 207	Cette parcelle est infestée en totalité par les mauvaises herbes, ce qui s'est traduit par des rendements anormalement faibles (-29 %) par rapport à l'ensemble du site.
B-7	Essais N et K	Essais annulés en début de saison, forte pression de mauvaises herbes.
	Essai P	En fin de saison, l'équipe a appris que le producteur avait appliqué de la chaux l'automne précédent l'essai, ce qui est contraire aux indications du protocole. En effet, un chaulage récent peut influencer fortement la disponibilité du P apporté par fertilisation et ainsi affecter la réponse de la culture.
B-9	Essai K : bloc 1	L'opérateur a récolté la zone problématique plutôt que la zone définie pour la récolte.
	Essai K : blocs 2 et 3	De grandes variations entre les données révèlent une problématique non identifiée. Doute sur la qualité des données.
	Essai N : bloc 1	L'opérateur a récolté la zone problématique plutôt que la zone définie pour la récolte.
	Essai N : 302 (paille)	Rendement anormalement faible (-64 %) par rapport à l'ensemble du site.
	Essai P	En fin de saison, l'équipe a appris que le producteur avait appliqué de la chaux l'automne précédent l'essai, ce qui est contraire aux indications du protocole. En effet, un chaulage récent peut influencer fortement la disponibilité du P apporté par fertilisation et ainsi affecter la réponse de la culture.
B-10	Essais N, P et K	Forte présence de fusariose dans tout l'essai. Les grains sont ratatinés et légers. La densité de population est très élevée (environ 675 grains/m ²), probablement parce que le semoir n'a pas été calibré.
B-11	Essai N : 203	La masse du grain est contaminée par de la paille.
	Essai N : 104	La masse de la paille est contaminée par les mauvaises herbes.

Code du site	Donnée exclue	Raison justifiant l'exclusion
B-12	Essais N, P et K	La structure du sol est massive et dégradée sur l'ensemble du site. Les rendements sont inférieurs aux rendements de référence régionaux et provinciaux de l'année concernée. Le patron de rendement suggère qu'un facteur autre que les traitements ait pu affecter les rendements.
B-16	Essai N : bloc 2	Une corrélation positive est observée entre le rendement et la population.
	Essai N : bloc 3	Mauvais rendements localisés à un endroit précis, suggérant un effet du terrain non contrôlé par le dispositif expérimental. Doute sur la qualité des données
	Essai N : 220 (paille)	Rendement en paille anormalement élevé (+35 %) par rapport à l'ensemble du site.
B-17	Essai P : 101, 102, 201, 202, 301	Mauvais rendements localisés, suggérant un effet du terrain non contrôlé par le dispositif expérimental.
	Essai P : 211	L'opérateur a roulé dans la parcelle par erreur ; effet marqué sur le rendement.
B-19	Essai N : bloc 3	Contamination avec les engrais du producteur en bordure du dispositif.
B-20	Essais P et K (paille)	Doute sur la qualité des données.
B-21	Essais P et K (paille)	Doute sur la qualité des données.
B-24	Essai N : bloc 1	Données manquantes pour T3, T4 et T6.
	Essai N : T5 des blocs 2, 3 et 4	Patron de rendement problématique suggérant un effet du terrain non contrôlé par le dispositif expérimental.
B-30	Essais N, P et K	Doute sur la qualité des données : rendements très faibles et présentant de grandes variations entre les traitements ; très peu d'informations explicatives, problématique apparente.
B-32	Essai N : bloc 1	Doute sur la qualité des données : patron de rendement en W ; absence de correspondance entre les rendements en paille et en grains.
B-33	Essai N : bloc 1	Doute sur la qualité des données : faibles rendements inexplicables, problématique apparente du bloc.
B-34	Essai K : bloc 2	T11 manquant, ce qui ne laisserait que le témoin (T9) et la dose intermédiaire (T10) du bloc 2 ; ce peu d'observations dans l'analyse va biaiser la détermination de la dose optimale.
B-35	Essai K : parcelle 117	Rendement anormalement faible (-34 %) par rapport à l'ensemble du site.
	Essai N	La récolte de l'essai N a été effectuée sur deux jours, par traitement et non par bloc ; biais non contrôlé par le dispositif expérimental.
B-36	Variété 18, bloc 3	Mauvais rendements localisés, suggérant un effet du terrain non contrôlé par le dispositif expérimental.
	Variété 23, bloc 2, T6	Rendement anormalement faible (-59 %) par rapport à l'ensemble du site.
	Essai N	Le patron de rendement suggère qu'un facteur autre que les traitements ait pu affecter les rendements ; plusieurs doutes subsistent sur différents facteurs de l'expérience qui n'ont peut-être pas été contrôlés.

Annexe IV-B. Sommaire des données exclues de l'analyse et justifications – orge

Code du site	Donnée exclue	Raison justifiant l'exclusion
O-2	Essai P : 103	Rendement en grains anormalement bas (CV = 25 %) par rapport à l'ensemble du site.
O-4	Essai K	Le patron de rendement suggère qu'un facteur autre que les traitements ait pu affecter les rendements dans le bloc 3. Très forte pression de mauvaises herbes. Abandon par la Coordination des parcelles 106, 107, 206 et 207, donc absence de témoin pour les blocs 1 et 2.
	Essai P	Un problème de drainage a affecté les rendements.
O-5	Essai N : 201 (paille) et 104 (exportation)	201 : rendement en paille anormalement bas (CV = 46 %) par rapport à l'ensemble du site. 104 : Les grains sont noirs.
	Essai P : 216 (paille)	Rendement en paille anormalement élevé (CV = 28 %) par rapport à l'ensemble du site.
O-6	Essais P et K	Forte pression des mauvaises herbes dans plusieurs parcelles. Très grande fluctuation des rendements sur tout le site, inconstance des patrons de rendement. Dans le bloc 1, erreur de sélection des rangs de récolte, rangs comptés à partir de la gauche, alors qu'il fallait plutôt compter à partir de la droite afin d'éviter les rangs affectés par une mauvaise levée.
O-7	Essai P : 312 et 313	312 : Présence de roches dans les grains, car la batteuse a piqué dans la terre. 313 : L'opérateur de la batteuse n'a pas mis le sac pour récupérer le grain.
	Essai K	Le patron de rendement suggère qu'un facteur autre que les traitements a pu affecter les rendements, notamment un effet de terrain non contrôlé par le dispositif expérimental.
O-10	Essai P	Site particulièrement riche en P (1475 kg P _{M3} /ha, ISP ₁ de 60 %) laissant croire à un historique récent d'applications répétées d'engrais de ferme, le champ se situant à proximité d'un bâtiment d'élevage.
O-11	Essais N, P et K (Exportations)	Beaucoup de grains immatures (encore verts) à la récolte, photos à l'appui.
O-12	Essai N : bloc 1 (paille)	Pas de correspondance entre les patrons de rendements en grains et de rendements en paille.
	Essai K : bloc 1	Patron de rendement suggérant un effet du terrain non contrôlé par le dispositif expérimental dans le bloc 1.
O-13	Essai P	Patron de rendement suggérant un effet du terrain non contrôlé par le dispositif expérimental dans le bloc 3. Problème de semis (des rangs ont été semés en double).
O-14	Essai N : 102	Abandonnée à la suite du dénombrement des plants en raison d'un mauvais établissement de la culture.
	Essai N : blocs 1 et 3	Fluctuation importante des rendements en grains par rapport à l'ensemble du site.
	Essai P	Essai endommagé par des animaux.
	Essai K : bloc 1	Mauvais établissement de la culture dans la parcelle témoin qui entraîne l'exclusion du bloc en entier (impossibilité de calculer les rapports de rendement).
	Essai K : 111 et 310	Parcelles endommagées par des animaux.
O-15	Essai N : 207 et 210	Rendement en grains anormalement bas (CV jusqu'à 23 %) par rapport à l'ensemble du site.
	Essai P : 301	Grains échappés.
O-16	Essai K : 106 et 209	Manque d'uniformité au niveau de la hauteur des plants et de la coloration du feuillage dans certaines parcelles. Diminution du rendement par rapport au reste du bloc.
O-17	Essai P : bloc 1	Forte présence de mauvaises herbes ayant affecté grandement les rendements dans le bloc 1.
O-18	Essai P : 316	Rendements en grains anormalement faibles (CV = 25 %) par rapport à l'ensemble du site, probablement causé par la faible population (CV = 35 %).
	Essai K	Forte pression de mauvaises herbes, semis clairsemé et rendements faibles.
O-19	Essai P : 304	Rendements en grains anormalement faibles (CV = 41 %) par rapport à l'ensemble du site, alors que le rendement en paille est parmi les plus élevés.

Code du site	Donnée exclue	Raison justifiant l'exclusion
O-23	Essai P : 106	Perte des grains, car le sac était mal accroché dans la batteuse.
	Essai P : 207	Parcelle située dans une baissière, non uniforme et à faible croissance.
	Essai K : 213, 214	Indication du collaborateur d'exclure les données de l'analyse.
O-24	Essai K : 307 (paille)	Rendement en paille anormalement élevé (CV = 40 %) par rapport à l'ensemble du site.
	Essais N, P et K (Exportations)	Valeurs aberrantes quant aux teneurs en N de la biomasse.
O-25	Essai N : Parcelles 212, 259, 260, 279 et 280 Répétitions 3, 9 et 16	Données partielles entraînant l'exclusion des répétitions 3, 9 et 16 (témoins manquants).
		Exclusion du cultivar Cerveza et de la densité de semis de 200 grains/m ² afin d'assurer la correspondance entre ces données et celles du PSEF, lesquelles sont majoritaires.
.	Essais P : parcelles ayant des ROM < 0,90	Des facteurs difficilement identifiables et non contrôlés par le dispositif expérimental ont eu une action dépressive sur les rendements de certaines parcelles fertilisées. Ainsi, les données des parcelles non productives, ayant un ROM < 0,90 ont été exclues des analyses.

Annexe IV-C. Sommaire des données exclues de l'analyse et justifications – avoine

Code du site	Donnée exclue	Raison justifiant l'exclusion
A-2	Essai N	Sol caillouteux. Population faible probablement causée par une levée faible et non uniforme.
	Essai P : 308	Le rendement en paille de la parcelle est anormalement élevé (+52 %) par rapport aux rendements en paille de l'ensemble du site.
A-3	Essais N, P et K	Les grains contenaient beaucoup de résidus impossibles à éliminer (photos à l'appui). Les grains ont été pesés avec les débris.
A-4	Essai N : 105	Parcelle endommagée par un animal.
	Essai P : 208	Parcelle endommagée par un animal.
	Essai K : 214	Parcelle endommagée par un animal.
A-5	Essai N : 307	Exclusion recommandée par la Coordination des essais sur la base de la maladie foliaire affectant la parcelle, la croissance très faible et le peu de regain en saison. Plants grisâtres et chétifs.
	Essai P	Patron de rendement suggérant un effet du terrain non contrôlé par le dispositif expérimental. De plus, les échantillons de sol ont été égarés pour cet essai.
	Essai K : 302, 303	Le rendement en grains de la parcelle 302 est anormalement faible (-28 %) par rapport au reste du site. Exclusions recommandées par la Coordination des essais sur la base de la maladie foliaire affectant la parcelle, la croissance très faible et le peu de regain en saison. Plants grisâtres et chétifs.
A-7	Essais NPK	Doute sur la qualité des données : Les longueurs de certaines parcelles dépassent les longueurs des parcelles implantées. De plus, la Coordination des essais a remarqué que les nombres de rangs récoltés consignés étaient erronés, entraînant une mauvaise surface de récolte invalidant le calcul du rendement.
A-8	Essai N : 105, 205	La parcelle 105 a reçu une double dose de P et de K, tandis que la parcelle 205 n'a pas reçu de P ni de K.
A-9	Essai N : 214	Rendement en grains anormalement élevé (+109 %) par rapport aux autres rendements des témoins alors que la parcelle était pourtant fortement atteinte par les mauvaises herbes.
A-10	Essais N, P et K : bloc 1	Le passage d'un tracteur a écrasé des rangs dans les blocs 1 des trois essais.
A-11	Essai K : 111, 211, 311	Les parcelles 111, 211 et 311 ont des densités de population et des rendements anormalement élevés par rapport à l'ensemble du site.

Code du site	Donnée exclue	Raison justifiant l'exclusion
A-12	Essai K : 211	Présence de terre dans les échantillons de grains et de paille.
A-13	Essai P : 202	Erreur à la pesée des grains : la masse du grain sec est plus élevée que celle du grain humide.
	Essai K : 311, 312	Ces parcelles sont situées dans une baissière, laquelle est demeurée très humide en début de saison. La croissance de l'avoine en a été affectée.
A-14	Essai P : 116, 216, 316	Une forte pression des mauvaises herbes a été soulevée par le collaborateur. La parcelle 216 étant le témoin du bloc 2, son exclusion entraîne l'exclusion des rendements du bloc 2 vu l'impossibilité de calculer le ROM et le RR.
A-16	Essai P : 115, 215, 216 Essai K : 302	Une baissière du terrain a entraîné une faible croissance de l'avoine dans les parcelles concernées.
	Essais N, P et K (paille)	Le rendement de la paille a été calculé par différence de masse. Cette méthodologie diffère des autres essais et mène à des rendements anormalement élevés (2 à 4 fois supérieurs à la moyenne de toutes les parcelles), hautement improbables et incomparables aux autres sites.
A-17	Essai N : bloc 1 (paille)	Les rendements en paille fluctuent fortement entre les traitements par rapport à l'ensemble du site.
A-18	Essai N (nitrate)	L'échantillonnage du nitrate a été fait dans une zone tondue à côté de l'essai.
	Essai P : 316	Rendements en grains anormalement bas (-37 %) par rapport à l'ensemble du site.
	Essai K : Bloc 1	Rendements anormalement élevés (+48 %) de la parcelle 104 par rapport à l'ensemble du site. La parcelle 104 étant un témoin, son exclusion entraîne l'exclusion des rendements en paille du bloc 1 vu l'impossibilité de calculer le ROM et le RR.
A-19	Essais N, P et K (paille)	Le rendement de la paille a été calculé par différence de masse. Cette méthodologie diffère des autres essais et mène à des rendements anormalement élevés (2 à 4 fois supérieurs à la moyenne de toutes les parcelles), hautement improbables et incomparables aux autres sites.
A-20	Essai N : bloc 2	Quatre cultivars sur dix avaient des courbes de réponse en U, suggérant un effet du terrain non contrôlé par le dispositif (blocage). Afin d'éviter tout biais éventuel d'interprétation, toutes les données du bloc 2 de ce site ont été exclues.
A-20	non applicable	La structure du dispositif expérimental oblige la considération d'une quarantaine de répétitions par site, donnant un poids démesuré à ces données dans l'analyse. Seuls les cultivars communs à ceux du PSEF ont été conservés pour l'analyse, afin d'atténuer le poids donné à ce site.
A-21		Dans le dispositif expérimental, les doses de N sont en parcelles principales et les cultivars sont en sous-parcelles. Les combinaisons de cultivar*année ont été considérés comme des sites distincts afin de favoriser leur intégration au modèle statistique et de valoriser la grande quantité de données.
.	Essais P : parcelles ayant des ROM < 0,90	Des facteurs difficilement identifiables et non contrôlés par le dispositif expérimental ont eu une action dépressive sur les rendements de certaines parcelles fertilisées. Ainsi, les données des parcelles non productives, ayant un ROM < 0,90 ont été exclues des analyses.