

L'IRDA a été constitué en mars 1998 par quatre membres fondateurs, soit le Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ), l'Union des producteurs agricoles (UPA), le Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) et le ministère de l'Économie, de l'Innovation et des Exportations (MEIE).

L'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement est une corporation de recherche à but non lucratif qui travaille à chaque année sur une centaine de projets de recherche en collaboration avec de nombreux partenaires du milieu agricole et du domaine de la recherche.

Notre mission

L'IRDA a pour mission de réaliser des activités de recherche, de développement et de transfert en agroenvironnement visant à favoriser l'innovation en agriculture, dans une perspective de développement durable.

Notre vision

En 2016, l'IRDA est reconnu à l'échelle canadienne comme un chef de file en recherche, développement et transfert en agroenvironnement. L'IRDA se démarque par son approche intégrée et par le dynamisme de ses partenariats qui lui permettent d'anticiper les problèmes et de proposer des solutions novatrices répondant aux besoins des agriculteurs et de la société.

Pour en savoir plus

www.irda.qc.ca

PARTENAIRES

**Agriculture, Pêcheries
et Alimentation**

Québec 

Cultivons l'avenir 2
Une initiative fédérale-provinciale-territoriale



Agriculture et
Agroalimentaire Canada

Agriculture and
Agri-Food Canada

Canada 

Approche intégrée de fertilisation azotée permettant la production rentable de pommes de terre biologiques générant un bilan de phosphore équilibré.

Rapport final

Présenté à :

Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation

Programme Innov'Action agroalimentaire, un programme issu de l'accord Cultivons l'avenir 2, conclu entre le ministre de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec et Agriculture et Agroalimentaire Canada.

Préparé par :

Christine Landry, agr., biol., Ph.D
Chercheure IRDA

Mylène Marchand-Roy, agr., M.Sc.
Professionnelle de recherche, IRDA

Julie Mainguy, agr. B. Sc.
Professionnelle de recherche, IRDA

LE RAPPORT PEUT ÊTRE CITÉ COMME SUIT :

Landry, C., M. Marchand-Roy, J. Mainguy. 2020. Approche intégrée de fertilisation azotée permettant la production rentable de pommes de terre biologiques générant un bilan de phosphore équilibré. Projet Innov'Action no. IA116643. Rapport final. IRDA. 57 pages.

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

ÉQUIPE DE RÉALISATION DU PROJET

- Responsable scientifique : Christine Landry, agr., Ph.D., Chercheure, IRDA
- Mylène Marchand-Roy, agr., M.Sc., professionnelle de recherche, IRDA
- Julie Mainguy, agr., B.Sc., professionnelle de recherche, IRDA
- Mélissa Paradis, M.Sc., professionnelle de recherche, IRDA
- Luc Belzile, M.Sc., Chercheur – économie de l'environnement, IRDA
- Marial Morin, producteur, Ferme Morinnal senc.
- Denis Giroux, agr., Réseau de Lutte intégrée Bellechasse
- Jonathan Roy, agr., conseiller en agriculture biologique MAPAQ-DRCA

ÉQUIPE DE RÉDACTION DU RAPPORT

- Christine Landry, IRDA
- Mylène Marchand-Roy, IRDA
- Julie Mainguy, IRDA
- Luc Belzile, IRDA
- Denise Godonou, IRDA

COLLABORATEURS

- Mélissa Gagnon, agr., conseillère en production maraîchère MAPAQ-DRMLL
- Marie-Pascale Beaudoin, agr., conseillère horticole MAPAQ-DRSL
- Sophie Guimont, agr., conseillère en production Club Bio-Action Montérégie
- Michèle Grenier, biostatisticienne, IRDA
- Réjean Côté, Antoine Bédard, Serge Leblanc, producteurs, membre du comité consultatif

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

Christine Landry, Chercheure

Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)

2700, rue Einstein, Québec (Québec) G1P 3W8

Téléphone : 418 643-2380, poste 640

Courriel : christine.landry@irda.qc.ca

REMERCIEMENTS

Ces travaux ont été réalisés grâce à une aide financière du Programme Innov'Action agroalimentaire, un programme issu de l'Accord Canada-Québec de mise en œuvre du Partenariat canadien pour l'agriculture conclu entre le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation et Agriculture et Agroalimentaire Canada. Les auteurs remercient également les nombreuses autres personnes qui ont contribué au succès du projet; technicien agricole, ouvriers des fermes expérimentales de l'IRDA à Saint-Lambert et Deschambault, personnel technique des différents laboratoires d'analyse de l'IRDA, ainsi que les étudiants d'été participants lors des saisons 2016, 2017 et 2018.

TABLE DES MATIÈRES

1	Introduction.....	1
1.1	Objectifs.....	3
1.1.2	Objectifs détaillés	3
2	Matériel et méthodes.....	4
2.1	Site et traitements.....	4
2.2	Dispositif et analyses statistiques.....	6
2.3	Collecte de données et Analyses chimiques de laboratoire.....	9
2.3.1	Engrais de ferme.....	9
2.3.2	Sols et plants.....	9
2.4	Suivi <i>in situ</i> en continu du N et P disponibles.....	13
2.4.1	Saturation et analyse des MEI	14
2.5	Résumé des opérations, mesures et échantillonnage	15
2.6	Analyse économique	16
3	Résultats et discussion	18
3.1	Croissance des engrais verts (2016)	18
3.2	Caractérisation des engrais verts et des engrais de ferme	24
3.3	Pomme de terre (2017)	27
3.3.1	Analyses ponctuelles du sol	27
3.3.2	Dynamique du nitrate du sol et rendements en pommes de terre	28
3.3.3	Nitrate résiduel post-récolte	37
3.4	Blé d'automne (2017-2018).....	39
3.5	Impacts de la rotation	42
3.5.1	Activité biologique du sol	42
3.5.2	Évolution des paramètres physico-chimiques.....	43
3.6	Analyse économique	47
4	Conclusion	50
	Références.....	52

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Taux de semis des engrais verts, saison 2016.	5
Tableau 2. Périodes de pose-retrait des membranes d'échange ionique lors de la saison de culture en pommes de terre, 2017.	14
Tableau 3. Résumé des opérations, mesures et échantillonnages de 2016 à 2018.	15
Tableau 4. Charge du sol en N et P disponible (N-NO ₃ et P _{eau}) en fonction des engrais verts au stade épiaison de l'avoine le 18 juillet 2016.....	23
Tableau 5. Caractérisation biochimique, biomasses et apports d'éléments fertilisants des engrais verts et des engrais de ferme.....	26
Tableau 6. Apports totaux en éléments N, P et K pour la pomme de terre en 2017 en fonction des différentes régions testées.....	27
Tableau 7. Charge du sol en N-NO ₃ (kg ha ⁻¹ b.s) au printemps 2017 (4 mai) des parcelles principales ayant reçu ou non du fumier de bovin incorporé à l'automne 2016.	28
Tableau 8. Contenus du sol en N disponibles (kg ha ⁻¹) pendant la croissance des pommes de terre en fonction des engrais de ferme (tous engrais verts confondus).	33
Tableau 9. Charge du sol en P _{eau} (mg L ⁻¹) pendant la croissance des pommes de terre en fonction des engrais de ferme (tous engrais verts confondus).	34
Tableau 10. Valeurs de P de l'impact des engrais verts (EV) et des engrais de ferme (EF) sur les indicateurs d'activité biologique du sol en 2017 (27 juillet) et 2018 (18 juillet).....	42
Tableau 11. Évolution des valeurs de masse volumique apparente (MVA), des agrégats stables à l'eau et de la macroporosité du sol en fonction des différentes régions pendant la rotation de 2016 à 2018.	45
Tableau 12. Prélèvements en N-P ₂ O ₅ -K ₂ O (kg ha ⁻¹) lors des saisons de culture de la pomme de terre et du blé et évolution des contenus en P et K totaux du sol en fonction des différentes régions pendant la rotation de 2016 à 2018.	46
Tableau 13. Marge sur coûts variables actualisée selon l'engrais vert	48
Tableau 14. Marge sur coûts variables actualisée selon l'engrais de ferme	49

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Incorporation des semences d'engrais verts avec le peigne le 20 mai 2016 (haut) et récolte des pommes de terre le 30 août 2017 (bas).....	7
Figure 2. Plan du dispositif de l'essai.....	8
Figure 3. Représentation visuelle de la vitesse d'établissement des cultures d'engrais verts en ordre décroissant de la culture la plus rapide à la moins rapide entre le 21 juin et le 29 août 2016.	19
Figure 4. Biomasse aérienne des différents engrais verts et des mauvaises herbes au stade tallage (27 juin) et juste avant l'épiaison (18 juillet) de l'avoine en 2016.....	20
Figure 5. Apparence du trèfle intercalaire dans l'avoine lors de la récolte de l'avoine le 6 septembre et avant son incorporation le 3 octobre 2016.	21
Figure 6. Rendements en paille et en grains d'avoine en fonction de la présence ou non de trèfle en intercalaire, le 6 septembre 2016.	22

Figure 7. Prélèvements totaux (grains et pailles) en N de l'avoine en fonction de la présence ou non de trèfle en intercalaire, le 6 septembre 2016.	22
Figure 8. Contenu du sol (strate 0-30 cm) en N-NO ₃ à la récolte de l'avoine le 6 septembre et juste avant l'enfouissement des engrais verts, le 4 octobre 2016.....	24
Figure 9. Flux de N-NO ₃ des membranes d'échange ionique sur la saison 2017, selon les engrais verts de l'automne 2016 (tous engrais de ferme confondus).....	30
Figure 10. Rendements vendables en tubercules (29 août 2017), en fonction des engrais verts de l'automne 2016 (tous engrais de ferme confondus).	30
Figure 11. Biomasse de mauvaises herbes encore présente dans les parcelles le 16 août 2017, en fonction des engrais verts de l'automne 2016 (tous engrais de ferme confondus).....	31
Figure 12. Flux de N-NO ₃ des membranes d'échange ionique sur la saison 2017, selon la fertilisation par les engrais de ferme (tous engrais verts confondus).....	32
Figure 13. Prélèvements en N _{total} (fanés + tubercules) des pommes de terre en fonction des engrais de ferme au pic de croissance, le 27 juillet 2017, (tous engrais verts confondus).....	33
Figure 14. Rendement en tubercules vendables en fonction des engrais de ferme, le 29 août 2017, tous engrais verts confondus.	34
Figure 15. Exportations totales en azote (N) par les tubercules en fonction des engrais de ferme au 29 août 2017, tous engrais verts confondus.	35
Figure 16. Exemple d'un tubercule affecté par un rhizome de chiendent.....	36
Figure 17. Exportations totales en potassium (K) par les tubercules en fonction des engrais de ferme le 29 août 2017, tous engrais verts confondus (gauche) ou des engrais verts, tous engrais de ferme confondus (droite).....	37
Figure 18. Charge résiduelle en N-NO ₃ après la récolte des pommes de terre le 1 ^{er} septembre 2017.....	38
Figure 19. Libération de N-NO ₃ après 10 jours d'incubation des sols en fonctions des engrais verts et des engrais ferme le 1 ^{er} septembre 2017.	38
Figure 20. Apparence contrastée des sous-parcelles après la reprise du blé d'automne le 30 mai 2018.....	40
Figure 21. Rendement en grains de blé, le 6 août 2018, tous engrais de ferme confondus..	40
Figure 22. Biomasse en paille de blé, le 6 août 2018, tous engrais verts confondus.....	41
Figure 23. Biomasse en paille de blé, le 6 août 2018, tous engrais de ferme confondus.	41
Figure 24. Taux respiratoire du sol, le 27 juillet 2017, tous engrais verts confondus.....	43
Figure 25. Marge sur coûts variables actualisée obtenue avec chaque engrais vert relativement à la MCVA obtenue avec l'avoine	47
Figure 26. Marge sur coûts variables actualisée obtenue avec chaque engrais de ferme relativement à la MCVA obtenue sans engrais de ferme.	48

1 INTRODUCTION

Au Québec, la production biologique (bio) de pommes de terre (Pdt) ne représente que 0,55 % des superficies en Pdt (MAPAQ 2018a). Pourtant, la demande en produits bio s'accroît de 10-15 % an⁻¹ et les fruits et légumes représentent 40 % des ventes (OTA, 2013). Les Producteurs de pommes de terre du Québec (PPTQ) s'intéressent d'ailleurs de plus en plus à cette production (PPTQ, communication personnelle, 2015), mais plusieurs contraintes découragent son adoption (Beaudoin, communication personnelle, 2015). Une consultation récente auprès de plusieurs producteurs et conseillers a entre autres fait ressortir qu'il n'y a pas de régie de fertilisation en azote (N) établie et performante. Ceci est un réel problème puisque le N est l'élément clé du rendement de la Pdt. Une étude allemande (Möller et Reents, 2007), ayant réalisé une méta-analyse des rendements de 220 champs en régie bio de Pdt a d'ailleurs conclu que la disponibilité en N du sol à la culture expliquait 48 % de la variabilité des rendements et qu'elle demeurerait ainsi le plus important facteur limitant de la production, même si le modèle incluait aussi, entre autres, les paramètres liés aux maladies. Ceci concorde avec les résultats de Finckh et coll. (2006) qui ont pour leur part étudié plus spécifiquement l'impact des maladies et concluaient qu'elles n'expliquaient que 30 % de la variation en rendement de la Pdt bio. Une méta-analyse suédoise sur 7 ans de 21 sites d'essai arrive à une conclusion similaire (Hagman et coll., 2009). En incluant les paramètres de sol, cultivar, année et position géographique, l'étude réaffirme qu'en production de Pdt bio, ce sont les paramètres de sol qui ont la plus forte influence, expliquant à eux seuls 53 % de la variation en rendement (effets cultivar 15 %, année 8 %, position 2 %).

La problématique de fertilisation a donc un impact majeur sur la rentabilité de la production. Et elle est d'autant plus difficile à régler dans le cas de la Pdt à cause de ses spécificités nutritionnelles et physiologiques. En effet, la Pdt est à la fois exigeante en N et inefficace à le prélever à cause d'un système racinaire peu développé. De grandes quantités de N doivent donc être apportées. Les producteurs ne pouvant se tourner vers les engrais minéraux, ceux-ci misent tout d'abord sur les engrais de ferme (EF), riches en N efficace. Deux difficultés majeures viennent donc s'ajouter. D'une part, celle liée au Règlement sur les exploitations agricoles (REA) qui limite les apports de phosphore (P) en sol riche en P (MDDELCC, 2014). Les EF étant riches en P, ceci présente donc une contrainte d'épandage importante dans les principales régions productrices de Pdt (50 % de la production; ISQ, 2015), soit Capitale-Nationale / Chaudière-Appalaches et Montréal – Laval - Lanaudière, où la majorité des sols y sont saturés en P (Beaudet et coll., 2004), rendant impossible l'apport de quantités suffisantes de N. D'autre part, celle liée à l'impossibilité d'appliquer des déjections animales non-compostées dans les cultures destinées à l'alimentation humaine sans respecter un délai de 90 ou 120 jours entre l'application et la récolte (Norme CAN/CGSB-32.310-2015). L'usage de fumiers frais est par ailleurs déconseillé en regard des risques accrus de maladies, telle la rhizoctonie (Agridea, 2007). Les fumiers compostés sont alors privilégiés, bien qu'ils soient une moins bonne source de N disponible. Aussi, le compostage concentre encore davantage le P contenu dans les fumiers puisque le P ne se perd pas au cours du processus, contrairement au N dont une partie se volatilise et lessive. Le ratio N/P des EF compostés est donc encore moins favorable que celui des EF frais.

Mieux vaut donc apporter le moins de N sous forme d'engrais de ferme que possible. Une solution mixte envisageable, présentant un bilan équilibré en P, serait de combler la majeure partie des besoins en N de la Pdt

avec un précédent d'engrais vert (EV) et de combler le restant des besoins en N avec des EF libérant une part additionnelle de N disponible pendant la période la plus exigeante. Une telle gestion optimisée permettrait d'accroître l'autonomie en intrants azotés de ce secteur et la rentabilité des entreprises, en plus d'améliorer la fertilité et la qualité des sols. Les effets bénéfiques des EV sur l'amélioration des propriétés chimiques, physiques et biologiques des sols sont en effet bien connus (structure, recyclage des reliquats de N, taux de matière organique, etc.) (Fageria et coll., 2005; Semican, 2015). Dans un tel contexte, le choix de l'EV et de l'EF utilisés devient toutefois critique. Ceux-ci doivent être les plus efficaces de leur catégorie et être adéquats pour assurer chacun des rôles bien distincts. L'EV devra emmagasiner rapidement une forte teneur en N tout en produisant une biomasse intéressante afin de fournir à moyen terme en cours de saison suivante une quantité suffisante de N, et cela sans encourager le développement des maladies ou des mauvaises herbes. De son côté, l'EF devra fournir rapidement une certaine quantité de N hautement disponible, mais au bon moment, pour répondre à la demande de pointe en N, en plus de stimuler la minéralisation de la biomasse d'EV enfouie. Outre le point de vue du N, il est également très avantageux que les EF utilisés contiennent beaucoup de carbone (C) labile afin de stimuler les microorganismes (MOG) du sol et de possiblement créer une synergie avec les EV. La synergie souhaitée s'explique du fait que le C labile est la source d'énergie accessible la plus efficace pour les MOG (McGill et coll., 1986) qui sont le moteur du cyclage du N organique. Le C labile vient donc stimuler la libération de NO_3 (Landry et coll., 2011).

Dans un autre ordre d'idées, considérant les importantes contributions mentionnées en N des EV et le fait qu'en Pdt bio des cultivars hâtifs sont le plus souvent cultivés, il est à se demander si l'implantation d'une culture subséquente présentant une valeur économique intéressante pourrait également suivre dans la rotation. À ce propos, le blé d'automne semble un choix pertinent. Les superficies au Québec ne s'élevaient toutefois qu'à 4 200 ha (Perreault, communication personnelle, 2016). Cela est dommage car le blé d'automne produit environ 25 % plus de rendement que le blé de printemps (Vanasse et Allard, 2015) et son marché de vente est bien développé. Il aurait aussi une survie à l'hiver dépassant les 90 % pour la région de Québec (Vanasse et Allard, 2015).

En conclusion, cette étude vise à valider une régie mixte combinant l'usage prédominant d'EV au fort potentiel de fourniture en N, accompagnés d'EF de faible indice de stabilité biologique (ISB) comme démarreur afin de stimuler la minéralisation des EV et de fournir rapidement une certaine quantité de N disponible à la Pdt et laissant assez de N pour produire rentablement une culture subséquente de blé d'automne qui récupérera le nitrate résiduel. Des gains d'efficacité en fertilisation aideront les producteurs de Pdt bio à améliorer leur compétitivité face au produit importé. Cela est fort important dans le contexte où l'offre de produits maraîchers bio du Québec ne suffit pas à la demande (EcoRessources Consultants, 2012). La plus-value associée à la Pdt bio est grande, alors que les prix sont généralement de 1,5 à 3 fois ceux de la Pdt conventionnelle (USDA, 2010; ERS, 2015). Cela constitue un incitatif fort à la transition à l'agriculture bio. Des gains au chapitre des coûts de production viendront sûrement ajouter un incitatif additionnel. En fait, une régie validée de fertilisation N aidera à la transition et l'expansion du secteur bio, ce qui est en accord avec la Politique bioalimentaire 2018-2025 du MAPAQ (MAPAQ 2018b).

1.1 OBJECTIFS

L'objectif global de cette étude vise à valider une régie mixte combinant l'usage prédominant d'EV au fort potentiel de fourniture en N, accompagnés d'EF de faible indice de stabilité biologique comme démarreur afin de stimuler la minéralisation des EV et de fournir rapidement une certaine quantité de N disponible à la Pdt tout en laissant assez de N pour produire rentablement une culture subséquente de blé d'automne qui récupérera le nitrate résiduel.

1.1.2 Objectifs détaillés

2. Évaluer l'impact des différentes régies testées sur les rendements et les prélèvements en nutriments de chacune des cultures de la rotation (pomme de terre et blé).
3. Caractériser en laboratoire les contenus en nutriments des engrais verts et des engrais de ferme afin d'estimer leur valeur fertilisante en éléments disponibles.
4. À chaque année de la rotation, comparer les effets des différentes régies sur les paramètres chimiques et biologiques des sols.
5. L'année la plus exigeante en N de la rotation (pomme de terre), suivre *in situ* en continu pendant toute la saison de croissance les flux des ions nitrate, ammonium et phosphate découlant de la minéralisation des engrais verts et des engrais de ferme.
6. Mesurer l'impact des différentes régies sur l'accumulation de nitrate résiduel en profondeur dans le sol (0 à 30 cm de profondeur).
7. Réaliser une analyse économique de la marge sur coûts variables de chacune des régies à l'essai.

2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 SITE ET TRAITEMENTS

L'étude s'est déroulée en contexte commercial de production biologique à la Ferme Morinval, située à St-Anselme dans la région de Bellechasse, en sol de texture loam sableux de la série Beurivage du printemps 2016 à l'automne 2018. Lors du montage du projet, une revue de littérature scientifique et plusieurs rencontres téléphoniques avec des producteurs, des conseillers de clubs agroenvironnementaux et des conseillers MAPAQ de plusieurs régions agricoles du Québec (Capitale-Nationale, Chaudière-Appalaches, Saguenay, Montérégie, Lanaudière) ont permis de cibler les engrais verts (EV) et les engrais de ferme (EF) les plus pertinents à tester, ainsi que de fixer le choix de la rotation de trois ans à réaliser. Un comité consultatif a aussi été créé avec certains des producteurs et conseillers consultés pour la durée du projet. Ce comité pouvait être consulté en cas de besoin lors des années de production et systématiquement lors de chaque rédaction de rapport pour avoir un point de vue terrain sur les résultats et la discussion. Le choix des EV et des rotations s'est aussi appuyé sur des travaux de l'IRDA (N'Dayegamiye et coll., 2011, N'Dayegamiye et coll., 2014a, 2014b; Belzile et Grondines, 2015), de l'Université Laval (Vanasse et Allard, 2015) et du Centre d'expertise et de transfert en agriculture biologique (CETAB+) (Duval et coll., 2015). La rotation du producteur (prairie légumineuses (2 ans) / Maïs / Céréales / Pdt) a aussi été considérée dans le choix des cultures testées soit : 1^{ière} année en EV (2016), 2^{ième} année en pommes de terre (Pdt) suivi d'un semis de blé d'automne (2017) et 3^{ième} année en récolte du blé (2018). La rotation testée a été insérée dans celle du producteur lors de l'année qui aurait été en céréales.

Les cultures d'EV de 1^{ière} année, sélectionnées pour fournir une partie du N à la Pdt l'année suivante furent 1) le ray-grass annuel non alternatif cv. Danergo 2) la vesce velue 3) un mélange de trèfle rouge 2 coupes et blanc huia (grasslands), 4) l'avoine cv. Dieter avec le même mélange de trèfle rouge et blanc semé en intercalaire et 5) l'avoine cv. Dieter seule (témoin). Tous les EV (sauf le trèfle intercalaire) ont été semés le 20 mai 2016. L'avoine a été semée avec un semoir CASE IH 5300 alors que les autres espèces (ray-grass, trèfles et vesce) ont été semées à la volée, manuellement (Voir tableau 1 pour les taux de semis). Immédiatement après les semis, un passage de peigne a été réalisé pour incorporer les semences. Dans les parcelles d'avoine avec trèfle en intercalaire, le mélange de trèfle a été semé 6 jours après l'avoine (26 mai 2016) et à nouveau un passage de peigne a été réalisé dans toutes les parcelles du dispositif pour d'une part incorporer les trèfles et aussi par souci d'uniformité dans le dispositif (Figure 1). La régie d'avoine seule a été choisie comme traitement **témoin « sans EV »** puisqu'elle a été cultivée comme une année céréale usuelle. Ainsi, les plants étaient très mûrs (lignifiés) avec un C/N très élevé équivalent à un apport de 0 N. De plus, les grains étaient récoltés comme revenu pour le producteur. Une part importante (60 %) du N contenu dans l'avoine a donc quitté le site. En comparaison, un apport de 50 Kg N ha⁻¹ était visé avec les traitements d'EV. L'avoine seule est également souvent présente dans les rotations des producteurs bio et représente un bon comparable. Le ray-grass est aussi une graminée. Toutefois, il est beaucoup plus lent à s'implanter. Il est ainsi beaucoup moins lignifié au moment de l'incorporation et apporte du N comme EV. De plus, aucune partie n'est récoltée. L'apport en N de chaque EV a été calculé selon la méthode décrite par Jobin et Douville (1996).

Tableau 1. Taux de semis des engrais verts, saison 2016.

Culture	Taux de semis (kg ha ⁻¹)
Avoine	174
Avoine (avec trèfle)	174
Mélange de trèfle dans avoine	8 = rouge 2 coupes (6) et blanc huia (2)
Mélange de trèfle seul	15 = rouge 2 coupes (11,3) et blanc huia (3,7)
Vesce velue	40
Ray-grass non alternatif	35

L'année suivante, la variété de Pdt Adora a été utilisée pour l'essai, car il s'agit d'un cultivar très prisé par les producteurs bio, incluant le propriétaire du site. Elle est hâtive et présente des besoins en N moins élevés que d'autres cultivars, au maximum de 150 kg N ha⁻¹. Ces caractéristiques permettaient aussi de minimiser les risques de maladies en cours de saison, d'abaisser la pression par les mauvaises herbes et les ravageurs et de semer le blé d'automne dans les dates requises. Les Pdt ont été plantées avec un planteur 2 rangs espacés de 1 m, à tous les 35 cm sur le rang pour une densité de 28 500 plantons ha⁻¹.

Les EF qui visaient à fournir un complément de N rapidement disponible pour la Pdt furent le fumier de bovin composté (FUM) (fumier jeune : < 1 an de compostage) et les fientes séchées de poules pondeuses en granules (FPG). Un traitement sans EF (**Témoin sans EF**) était aussi testé afin de distinguer, d'une part, l'effet unitaire de chacun des EV et, d'autre part, de dégager l'effet des FPG et du FUM. Pour le FUM, une dose de 100 kg N efficace (N_{eff}) ha⁻¹ a été apportée, soit 50 % de la dose appliquée en octobre de la 1^{ère} année (5 octobre 2016) et 50 % au printemps de l'année suivante (16 mai 2017), ce qui représentait une stratégie de fertilisation optimale comparable à la pratique du producteur. Les épandages ont été réalisés manuellement et le tout a été incorporé par un passage de vibro dans tout le dispositif. Pour les FPG, deux doses ont été testées soient comme le FUM, 100 kg N_{eff} ha⁻¹ (FPG 100N) et 50 kg N_{eff} ha⁻¹ (FPG 50N). La dose FPG 100N a été choisie selon une valeur conservatrice moyenne de fourniture en N par les EV de 50 kg N_{eff} ha⁻¹, pour un apport total en saison de 150N pour la Pdt. Enfin, la dose FPG 50N visait à apporter une dose inférieure à 100N sous forme d'EF afin de faire ressortir les effets bénéfiques potentiels des régies testées, autres que l'effet fertilisant, résultants des combinaisons d'EV et de FPG (ex : meilleure activité biologique du sol, décompaction des sols). Afin de s'assurer d'apporter moins de 150N, les contributions réelles en N des EV mesurées l'automne précédent ont été considérées dans le calcul de la dose de FPG à appliquer. Finalement, c'est ainsi qu'une réduction de 50 % a été choisie. L'apport en N de chaque EF a été calculé selon la méthode figurant dans le Guide de référence en fertilisation du CRAAQ (2010). Enfin, tant pour la dose pleine que celle réduite 50N, les apports de FPG ont été fractionnés en deux temps : 40 % de la dose au semis (18 mai 2017) et 60 % au renchaussage (5 juillet 2017). Les granules ont été répartis dans des sillons tracés le long de chacun des rangs (de chaque côté de la butte) à la plantation et en bandes au renchaussage incorporés par un passage de sarcler.

Suivant la récolte des Pdt (30 août 2017) (Figure 1), le sol a été travaillé avec une herse, puis le blé d'automne cv. Zorro a été semé le 15 septembre 2017 dans tout le dispositif avec un semoir Great Plain, au taux de 231 kg ha⁻¹.

Aucun apport d'engrais n'a été fait dans le blé afin de mesurer les arrière-effets des traitements de fertilisation de la Pdt (EF et/ou EV).

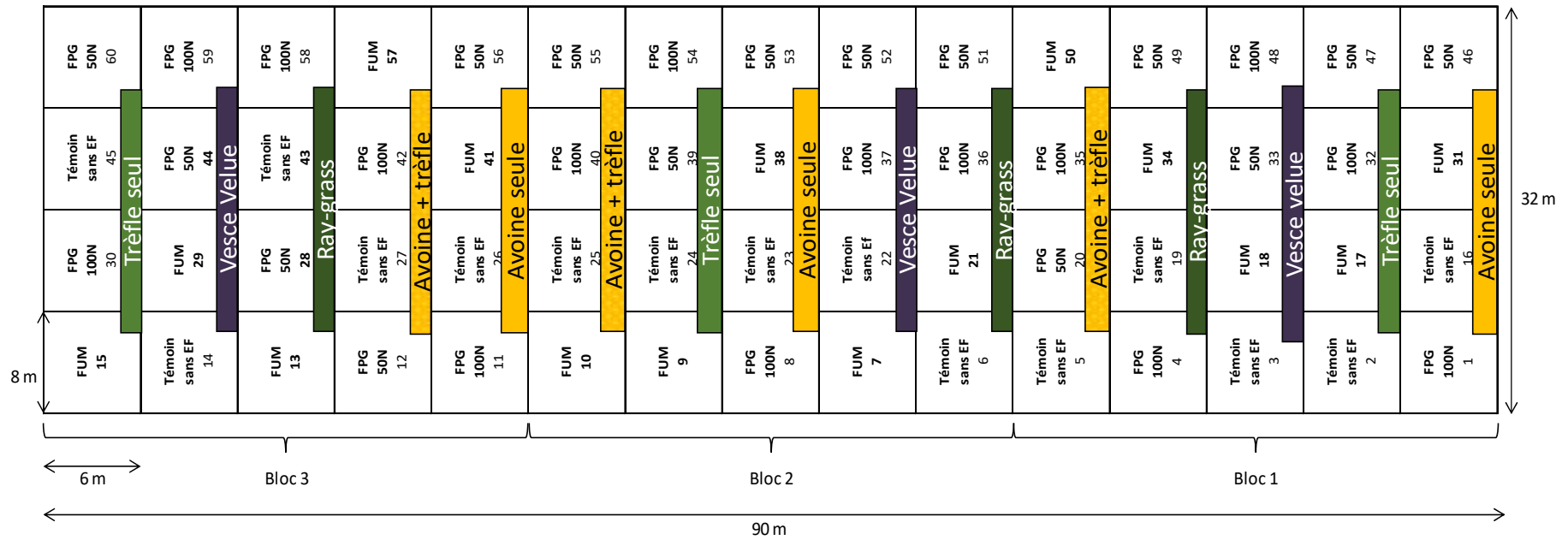
2.2 DISPOSITIF ET ANALYSES STATISTIQUES

Le dispositif (Figure 2) comprenait 3 répétitions (blocs 1, 2 et 3) de 5 parcelles principales (2017) subdivisées en 4 sous-parcelles (2017 et 2018) pour un total de 60 unités expérimentales. Les parcelles principales faisaient 6 m x 32 m et les sous-parcelles faisaient 6 m x 8 m. Un plan d'échantillonnage a été élaboré pour chacune des cultures, prédéterminant les zones de prélèvements de sol et de plants afin qu'aucune mesure ne soit effectuée dans les zones de mesure du rendement ou du suivi *in situ* des flux de N et P.

Toutes les analyses statistiques du projet ont été effectuées avec le logiciel SAS, version 9.4. Une analyse de la variance a été réalisée à chaque année pour chacune des variables afin d'étudier les effets des régies de fertilisation sur ces variables. Un modèle mixte normal a été ajusté avec la procédure PROC MIXED de SAS (Littell et coll., 2006). En 2016, les effets fixes étaient les EV alors qu'en 2017 et 2018, les effets fixes étaient les EV, les EF et l'interaction EV x EF. Les effets aléatoires étaient les blocs et l'interaction Bloc x EV. Pour certaines variables, les mesures étaient effectuées au cours de plusieurs dates, de sorte que les effets fixes des dates et des interactions Période x EV, Période x EF et Période x EV x EF, ont été ajoutés au modèle. Lorsque l'effet d'un facteur ou d'une interaction a été déclaré significatif par le test de F, les différences entre les moyennes ont été explorées au moyen de tests de t.



Figure 1. Incorporation des semences d'engrais verts avec le peigne le 20 mai 2016 (haut) et récolte des pommes de terre le 30 août 2017 (bas).



Traitements (Parcelles principales)

2016 -Engrais verts

- Avoine seule (témoin)
- Avoine + mélange de trèfle (rouge et blanc) en intercalaire
- Mélange de trèfle rouge et blanc
- Ray-grass annuel
- Vesce Velue

FPG : fientes de poule en granules

FUM : fumier de bovin composté

EF : engrais de ferme

Traitements (sous-parcelles)

2017- Pomme de terre

- Témoin sans engrais de ferme
- FPG 50N
- FPG 100N
- FUM (50N automne 2016 et 50N printemps 2017)

Figure 2. Plan du dispositif de l'essai.

2.3 COLLECTE DE DONNÉES ET ANALYSES CHIMIQUES DE LABORATOIRE

2.3.1 Engrais de ferme

Tous les EF ont été caractérisés avant leur utilisation pour calculer les doses à épandre. Afin de permettre la meilleure compréhension possible de leurs effets sur la fertilité du sol et la nutrition des cultures, des paramètres supplémentaires à ceux d'une caractérisation standard ont été effectués. Ils ont été caractérisés pour le pH_{eau} , le taux de matières sèches (MS) à 105 °C et le taux de matière organique (MO). Le carbone total (C_{total}) a été calculé avec la méthode des cendres selon la formule '100-cendres' pour obtenir la quantité de MO, elle-même ensuite divisée par le facteur 2,0 qui est plus juste dans le cas des amendements et engrais organiques que le facteur 1,724, utilisé pour les sols (Giroux et Audesse, 2004). L'azote total (N_{total}) a été extrait selon la méthode Kjeldahl (NTK) (exclu le nitrate) donc le C/N a été calculé en divisant le C obtenu par la méthode des cendres par le N_{total} (NTK + N-NO_3) base sèche (b.s.). Les contenus en P, K, Ca et Mg totaux ont été extraits par digestion à l'acide sulfurique (voie humide) (Isaac et Johnson 1976), suivie d'une détermination par spectrométrie d'émission au plasma. Le P minéral résistant a été extrait au HCl 2,5M (P_{HCl}) (Salomons et Gerriste, 1981), puis déterminé par colorimétrie automatisée Technicon. Les ions nitrates (N-NO_3) et ammonium (N-NH_4) ont été extraits au KCl 2M (Isaac et Johnson, 1976), puis déterminés avec auto analyseur Technicon. Le C soluble à l'eau (C_{eau}) a été extrait selon la méthode proposée par Garcia et coll. (1990), incluant également les mesures de N organique (No) labile et minéral (N-NH_4 et N-NO_3) de ce même extrait et dosés par colorimétrie au Technicon. Également le P soluble à l'eau (P_{eau}) a été dosé selon la méthode de Sissingh (1971). Enfin, l'indice de stabilité biologique (ISB), qui permet de rendre compte de la résistance d'une matière organique à la dégradation par les microorganismes du sol, a été mesuré selon la méthode décrite dans Landry et coll. (2011) adaptée de L.E. Parent de la méthode originale AFNOR (XP U44-162) utilisant un digesteur de fibre (ANKOM 200) de la compagnie ANKOM Technology.

2.3.2 Sols et plants

Toutes les analyses de sol ont été effectuées sur la strate 0-30 cm. Les échantillons étaient toujours des composites de 6 à 8 sous-échantillons, pour les sous-parcelles et les parcelles principales, respectivement. Une masse volumique apparente (MVA) a été faite à chaque date d'échantillonnage pour pouvoir rapporter les valeurs en charge (kg ha^{-1}). Dans tous les cas, les sols prélevés étaient placés dans une glacière et conservés à 4 °C jusqu'à leur analyse au laboratoire.

Année engrais verts

Au printemps 2016 (27 avril), le sol a été caractérisé par bloc. Le pH_{eau} a été mesuré dans un rapport sol/eau 1:1 (Conseil des productions végétales du Québec, 1988). La MO a été obtenue par perte au feu. Les contenus en C_{total} et N_{total} ont été mesurés par combustion au LECO. Le N-NO_3 et le N-NH_4 ont été extraits au KCl 2M (Isaac et Johnson, 1976) et déterminés par colorimétrie avec un auto analyseur Technicon. Le P_{total} , le K_{total} et les éléments

mineurs ont été extraits dans une solution Mehlich-3 (MIII) (Tran et coll., 1992) et dosés à l'ICP optique. Le P_{eau} a été évalué par la méthode Sissingh (1971). De plus, le C_{eau} a été extrait selon la méthode proposée par Garcia et coll. (1990). Au niveau physique, la granulométrie a été déterminée par la méthode de l'hydromètre en six points suivi d'un tamisage des sables (Gee et Bauder, 1986). Aussi la stabilité des agrégats (Method of soil analysis, 1986) et la macroporosité (Carter et Ball., 1993; Danielson et Sutherland, 1986) ont été mesurées. Par la suite, au stade tallage de l'avoine (27 juin 2016) et au moment de l'épiaison (18 juillet 2016), une mesure de la biomasse aérienne a été effectuée. Trois quadrats de 0,25 m² (50 X 50 cm) ont été disposés aléatoirement (excluant les zones de mesure de rendements finaux) et toute la biomasse aérienne se trouvant à l'intérieur a été prélevée et rapportée au Laboratoire de l'IRDA puis conservée à 4 °C. Les EV ont ensuite été triés des mauvaises herbes (MH) et, le cas échéant, le trèfle intercalaire a été séparé de l'avoine. Ensuite, chacun a été séché à 65 °C pour obtenir la biomasse sèche. Par la suite le C_{total} et N_{total} ont été dosé par combustion LECO sur les échantillons séchés des EV seulement afin de pouvoir calculer les prélèvements en N atteints par ceux-ci à ces stades. Le N_{total} des tissus, multiplié par la MS des plants a permis de calculer les prélèvements en N_{total} . Au moment de l'épiaison également, les contenus du sol en N et P disponible ont été évalués en dosant les ions $N\text{-NO}_3$ et $N\text{-NH}_4$ et le P_{eau} . Également, à l'épiaison, une analyse du statut nutritionnel mesuré par le prélèvement de la feuille étandard de l'avoine a été effectuée sur 30 feuilles étandard par parcelle principale. Les feuilles ont été séchées à 65 °C et les contenus en éléments ont été dosés à l'acide nitrique. Cela devait permettre de vérifier si l'avoine présentait un moins bon statut nutritionnel en présence d'une compétition avec le trèfle.

Le 6 septembre 2016, l'avoine seulement a été récoltée. Les rendements en paille et en grains ont été établis sur une largeur de mini-batteuse (1,5 m) et 15 m de longueur au centre de chacune des parcelles principales, avant que le reste du champ d'avoine soit récolté. La hauteur de coupe était la même dans toutes les parcelles et au-dessus du trèfle intercalaire. Des sous-échantillons de grains et de paille ont été séchés à 65 °C pour obtenir la biomasse sèche et les contenus en éléments totaux (C_{total} et N_{total} (Leco) et P, K, Ca, Mg (acide nitrique)) ont été dosés pour mesurer les prélèvements totaux (grains + paille). La paille ayant été laissée sur place, son prélèvement ne constitue donc pas une exportation comme les grains, mais il est intéressant de savoir à ce moment ce que la culture dans son ensemble a pu prélever. Le sol des parcelles d'avoine a également été caractérisé à la récolte (pH_{eau} , C_{total} et N_{total} , éléments MIII, $N\text{-NO}_3$, $N\text{-NH}_4$ et P_{eau}). Aucun travail de sol n'a eu lieu après la récolte de l'avoine.

Le trèfle intercalaire et les autres EV (trèfle seul, ray-grass et vesce) ont été laissés à pousser jusqu'au 4 octobre. À ce moment, la biomasse aérienne du ray-grass et de la vesce a été établie avec une mini-fourragère sur une largeur de 0,93 m et une longueur de 15 m. Pour les parcelles de trèfle seul et de trèfle intercalaire, comme la biomasse produite était faible et/ou qu'il y avait une importante population de MH, la biomasse a été établie dans trois quadrats de 1 m² pour le trèfle intercalaire et dans trois quadrats de 0,25 m² pour le trèfle seul, disposés aléatoirement au centre de chaque parcelle. Les trèfles ont été séparés des MH puis tous les EV ont été séchés à 65 °C avant de doser les contenus en éléments comme pour l'avoine. Le sol a également été caractérisé à ce moment-là (sauf parcelles d'avoine) pour les mêmes paramètres que lors de la récolte de l'avoine. Enfin, le sol a été travaillé pour incorporer les EV et le fumier de bovin épandu dans les sous-parcelles correspondantes (voir section 2.2) avec une charrue (peu profond) le 6 octobre 2016.

Année pomme de terre

Au printemps 2017, le sol a été caractérisé par parcelles principales (15 parcelles) en excluant les sous-parcelles ayant déjà reçu le fumier de bovin (traitement FUM : 15 sous-parcelles) qui ont aussi fait l'objet d'une caractérisation indépendante pour un total de 30 échantillons. La caractérisation incluait le pH_{eau} , les éléments majeurs MIII, les teneurs initiales en $N\text{-NO}_3 / N\text{-NH}_4$, et le C et N totaux.

En saison, afin de suivre l'évolution des teneurs en N et P disponibles ($N\text{-NO}_3 / N\text{-NH}_4$ et P_{eau}) à des stades cibles du développement de la culture de la Pdt, les sols ont à nouveau été échantillonnés dans toutes les 60 sous-parcelles, soit juste avant le fractionnement, le 4 juillet 2017 (47 jours après la plantation (JAP)) et après le prélèvement maximal de N par les plants, le 27 juillet 2017 (70 JAP). À 70 JAP, des paramètres d'activité biologique du sol ont également été analysés sur les sols. Le dégagement de CO_2 libéré par l'activité biologique a été déterminé avec une solution de NaOH 1M. La solution de NaOH capte le CO_2 dégagé par la respiration microbienne sous la forme de Na_2CO_3 . La consommation de NaOH peut donc ensuite être déterminée par titration acidimétrique à l'aide d'une solution de HCl 1M (AFNOR, 2018). L'activité de l'enzyme uréase a aussi été déterminée par incubation à 37 °C pendant deux heures. Le $N\text{-NH}_3$ libéré étant ensuite extrait avec une solution de KCl 1M et de HCl 0,01M, le tout dosé par colorimétrie au Technicon. Enfin le C_{eau} a été extrait selon la méthode proposée par Garcia et coll. (1990). Enfin, le 17 août, toute la biomasse des MH présentes dans 3 quadrats de 50 cm X 35 cm (largeur d'une butte) a été prélevée aléatoirement dans chaque sous-parcelle et séchée pour connaître la biomasse sèche de MH présente.

À la récolte (30 août 2019), les sols ont été prélevés en triplicata dans chaque sous-parcelle par un échantillonneur hydraulique (Giddings). À cette date, le sol prélevé a également été mis en incubation afin de mesurer le pouvoir de minéralisation (mesure de l'azote organique minéralisé lors d'une incubation de sol à température pièce) nous renseignant sur le risque potentiel de pollution diffuse lorsque trop de N peut encore être minéralisé en fin de saison. L'incubation des sols a été conduite à température ambiante pendant 10 jours (Fox et Piekielek, 1978; Juma et Paul, 1984). Les contenus en N_{min} ($N\text{-NO}_3$ et $N\text{-NH}_4$) au temps zéro et à la fin de l'incubation ont été extraits au KCl 2M (Isaac et Johnson, 1976) et dosés par colorimétrie au Technicon.

Le statut nutritionnel azoté de la culture a été évalué une fois en saison suivant un prélèvement foliaire de seize feuilles par sous-parcelle au stade floraison. L'analyse du N_{total} dans la plus jeune feuille mature entièrement déployée est en effet reconnue comme un indicateur nutritionnel fiable dans la culture de la Pdt. Les échantillons ont été conservés dans une glacière à 4 °C jusqu'à leur réception au laboratoire. Les feuilles ont alors été séchées à 65 °C et broyées à 100 mesh. Le N_{total} a été dosé par combustion LECO.

À trois reprises durant la saison (47 JAP, 70 JAP et 84 JAP), les fanes (parties aériennes) de trois plants consécutifs sains et représentatifs (hors de la zone de rendement) par sous-parcelle ont été prélevées pour suivre l'évolution de la MS et des prélèvements en N de la biomasse aérienne. Pour se faire, la teneur en N_{total} (%) des fanes a été déterminée à chaque date d'échantillonnage suivant un séchage des plants et un dosage par combustion LECO. Les prélèvements en N ont ensuite été calculés

De plus, au stade 70 JAP, la récolte des tubercules a en plus été effectuée. Le but n'était pas de déterminer un rendement à l'hectare mais de mieux caractériser le développement des tubercules selon les diverses régies testées. Ainsi, lors de cette récolte périodique, le poids total en tubercules des trois plants a été mesuré et les tubercules dénombrés. Un échantillon composite de tubercules sains, non-pelés et nettoyés a ensuite été prélevé, découpé en bâtons, mis à sécher à 65 °C et broyé. Le N_{total} a été extrait et dosé tel que décrit pour les plants. Ces récoltes ont permis d'avoir un portrait plus global des prélèvements en N à ces stades de production en additionnant les prélèvements en N des fanes à ceux des tubercules.

En fin de saison, les tubercules ont été récoltés sur une plus grande superficie, soit 8 m² (4 m linéaire sur deux rangs) afin d'établir les rendements totaux et vendables à l'hectare. Après avoir été grossièrement lavés, les tubercules ont été classés par calibre par criblage mécanique selon des grosseurs s'apparentant à celles des normes de l'Agence canadienne d'inspection des aliments (ACIA) pour les pommes de terre de tous types. Les grosseurs étaient les suivantes : Grelot (rejet) : diamètre $\leq 1 \frac{7}{8}$ po; Canada #1 : diamètre $> 1 \frac{7}{8}$ po et ≤ 3 po; Canada #1 grosses : diamètre > 3 po et $\leq 4 \frac{1}{2}$ po; Jumbo : diamètre $> 4 \frac{1}{2}$ po. (ACIA, 2015). Par la suite, 25 tubercules ont été prélevés de façon aléatoire dans chacun des lots récoltés. Les tubercules ont été évalués individuellement pour déterminer un indice pour la rhizoctonie (*Rhizoctonia solani*) et pour la gale commune (*Streptomyces scabies*), tenant compte à la fois de la sévérité des symptômes et du pourcentage de recouvrement de ceux-ci sur les tubercules. D'autre part, le poids spécifique a été mesuré à partir d'un sous-échantillon de 3 kg de tubercules par sous-parcelle. Pour ce faire, le sous-échantillon a d'abord été pesé (poids dans l'air). Les tubercules ont ensuite été plongés dans l'eau et le poids noté à nouveau (poids dans l'eau). Le poids spécifique est le résultat de la division du poids dans l'air par la différence entre le poids dans l'air et celui dans l'eau. Par ailleurs, un échantillon composite de cinq tubercules sains, non-pelés et nettoyés, a été prélevé dans chacun des lots, puis préparé et analysé pour la teneur en N_{total} tel que décrit pour les récoltes périodiques. Cette information a servi au calcul des exportations totales en N de la culture. Elle a aussi permis d'établir le prélèvement total en N pour la saison, en additionnant les exportations par les tubercules à celles des plants dosés juste avant leur défanage (84 JAP):

EXP N_{total} = Rendement total en tubercules (b.s.) * concentration en N_{total} des tubercules à la récolte

PLV N_{total} en fin de saison = N_{total} exporté par les tubercules + N_{total} des plants avant défanage

Année blé d'automne

Environ 1 mois après les semis du blé, soit le 12 octobre 2017, les plants ont été dénombrés dans toutes les sous-parcelles sur une section de rang de 1 m linéaire, à 2 emplacements dans la sous-parcelle, pour évaluer la levée. Les mesures de la 3^{ème} année visaient principalement à voir les arrières-effets éventuels des EV et EF puisqu'aucune matière fertilisante n'a été apportée. En 2018, tel que par les années antérieures, le sol a été caractérisé au printemps le 1^{er} mai 2018 dans chaque sous-parcelle. La caractérisation incluait le pH_{eau}, les éléments majeurs M III, les teneurs initiales en N-NO₃ / N-NH₄ et le C et N totaux. Après la reprise (7 mai 2018) un dénombrement a été réalisé à nouveau. Le 13 juin 2018, au stade juste avant épiaison, la biomasse aérienne

(séchée à 65 °C) des plants a été mesurée dans toutes les sous-parcelles (hors de la zone de rendement) sur 0,84 m le long d'un rang, à 2 endroits dans la sous-parcelle. Elle a ensuite été séchée à 65 °C puis analysée pour son contenu en N_{total} afin de calculer le prélèvement en N des plants. À ce stade également, le $N\text{-NO}_3 / N\text{-NH}_4$, et le P_{eau} du sol, ainsi que son taux d'activité biologique (respiration microbienne (dégagement de CO_2), activité uréase) et son contenu en C_{eau} ont été analysés. Enfin, à la récolte, le 6 août 2018, les biomasses et prélèvements finaux en N, P, K Ca et Mg du blé (plants et grains) ont été déterminés. La paille est restée au champ, mais les grains ont tous été récoltés. Les rendements ont été établis sur une largeur de mini-batteuse de 1,5 m (8 rangs) et sur une longueur de 4,5 m au centre de chaque sous-parcelle. Au niveau du sol, des échantillons ont été prélevés dans chaque sous-parcelle avec l'échantillonneur hydraulique Giddings, après la récolte, le 9 août 2018. Le $N\text{-NO}_3$ et P_{eau} résiduels, ainsi que les éléments MIII ont été dosés. De plus, des mesures de qualité physique du sol prises en tout début d'étude (2016) ont aussi été reprises, considérant que les changements physiques sont observables à long terme, soit la stabilité des agrégats (0-8 mm), la masse volumique apparente (MVA) et la macroporosité (50 cm mba de tension). Ces analyses ont été réalisées pour 33 sous-parcelles uniquement, soit les sous-parcelles du traitement FUM et FPG 100N (30 sous-parcelles) ainsi que les sous-parcelles Témoin ON de la parcelle principale d'Avoine seule.

2.4 SUIVI *IN SITU* EN CONTINU DU N ET P DISPONIBLES

En 2017 (année Pdt), un suivi *in situ* à l'aide de membranes d'échange ionique (MEI) a été réalisé afin de capter en continu le N et P disponibles en solution du sol selon chacune des combinaisons de traitement. Les MEI (anionique AR204-SZRA et cationique CR67-HMR, Ionics Inc., Watertown, MA) se comportent à l'image des racines et captent de façon cumulative toutes les molécules de NO_3 , NH_4 et PO_4 se rendant jusqu'à elles. Trois paires de MEI anionique ($N\text{-NO}_3$ et PO_4) et cationique ($N\text{-NH}_4$) ont été insérées par sous-parcelle de façon à couvrir verticalement le milieu de la strate 0-20 cm de sol. Les MEI ont été laissées au champ pour une période de deux semaines sauf pour les quatre premières périodes après la plantation des Pdt où les MEI sont restées dans le sol pendant des périodes plus courtes (Tableau 2) et par la suite échangées pour de nouvelles et ce, pour 10 périodes consécutives, soit de la plantation à récolte de Pdt. Étant donné le suivi continu, il a donc été possible de déterminer la dynamique (temps et intensité) des ions NO_3 , NH_4 et PO_4 du sol sur la saison pour chacune des combinaisons de traitements. Les analyses ponctuelles de sol au moyen de la tarière demeuraient toutefois nécessaires car les MEI mesurent des intensités ($\mu\text{g cm}^{-2} \text{période}^{-1}$) et ne permettent pas d'établir des quantités par hectare (kg ha^{-1}).

Tableau 2. Périodes de pose-retrait des membranes d'échange ionique lors de la saison de culture en pommes de terre, 2017.

Pomme de terre 2017		
Pose MEI	Retrait MEI	Durée de la période (jours)
19/05	20/05	1
20/05	22/05	2
22/05	25/05	4
25/05	01/06	7
01/06	15/06	14
22/06	05/07	13
05/07	20/07	15
20/07	03/08	14
03/08	17/08	14
17/08	24/08	7

2.4.1 Saturation et analyse des MEI

Avant leur emploi au champ, les MEI anioniques et cationiques ont été nettoyées par agitation dans une solution de HCl 0,5M en séquence de 30 minutes. Elles ont ensuite été rincées trois fois à l'eau déminéralisée pour enlever toute trace d'acide. Elles ont ensuite été saturées par agitation dans une solution de NaHCO₃ 0,5M, changée aux heures pour une période de 5 heures. Les MEI ont été à nouveau rincées à l'eau déminéralisée trois fois, puis conservées dans l'eau à 4 °C jusqu'à leur utilisation. Lors de leur récupération au champ, les trois paires de MEI déterrées ont été nettoyées à l'eau déminéralisée et placées ensemble dans un tube d'extraction contenant une solution de KCl 2M. De retour au laboratoire, les tubes ont été agités deux heures, puis la solution extractive a été filtrée. Par la suite, le N-NH₄, le N-NO₃ et le PO₄ de cette solution ont été dosés au Technicon.

2.5 RÉSUMÉ DES OPÉRATIONS, MESURES ET ÉCHANTILLONNAGE

Le tableau 3 résume pour chaque année les principales opérations culturales et scientifiques.

Tableau 3. Résumé des opérations, mesures et échantillonnages de 2016 à 2018.

Opérations 2016	Dates	Jours après semis/ plantation
Échantillonnage de sol	27 avril	-23
Application du fumier de bovin (FUM)(printemps) (18 m ³ ha ⁻¹ (30 N))	27 avril	-23
Semis des engrais verts (EV) + Avoine et passage du peigne	20 mai	0
Semis du trèfle intercalaire et passage du peigne	26 mai	6
Échantillonnage plants et MH (stade tallage de l'avoine)	27 juin	38
Échantillonnage sol, plants et mauvaises herbes (MH) (stade avant épiaison)	18 juillet	59
Récolte des parcelles d'avoine et Avoine + trèfle et échantillonnage de sol	6 sept.	109
Fauche des EV et échantillonnage de sol	4 oct.	137
Application du FUM (50 N)	5 oct.	138
Incorporation (FUM + EV)	6 oct.	139
2017		
Échantillonnage de sol printemps	4 mai	-14
Application FUM (50 N), Application des fientes de poules en granule (FPG) en bande et Plantation des Pdt (cv. Adora)	16-18 mai	0
1 ^{er} sarclage	12 juin	25
2 ^{ème} sarclage	18 juin	31
Échantillonnage de sols et plant, Fractionnement des FPG en bande et 3 ^{ème} sarclage/renchaussage	4 juillet	47
Échantillonnage de feuilles (stade floraison)	14 juillet	57
Échantillonnage de sols, plants et tubercules	27 juillet	70
Échantillonnage de plants (pré-défanage)	10 août	84
Évaluation du recouvrement en MH par quadrat	17 août	91
Récolte des Pdt et échantillonnage de sol	30 août	104
Semis du blé d'automne (cv. Zorro – 231 kg/ha)	15 sept.	120
2018		
Échantillonnage de sol printemps	1 mai	0
Échantillonnage de plants, feuilles étendards et sol (stade avant épiaison)	13 juin	43
Récolte	6 août	97
Caractérisation du sol post-récolte	9 août	100

2.6 ANALYSE ÉCONOMIQUE

Pour comparer le potentiel de rentabilité des différentes régies, ceux-ci ont été évalués sur la base de la marge sur coûts variables (MCV). La MCV est le résultat de la différence entre les revenus de production et les coûts variables. Le revenu a été calculé pour chacune des deux cultures principales (la Pdt et le blé d'automne). En plus, le revenu de la vente des grains d'avoine a été calculé pour les traitements qui avaient l'avoine ou le mélange avoine + trèfle comme EV l'année précédant la Pdt. De plus, nous considérons que la paille est laissée au sol.

Le revenu est le produit du rendement et du prix unitaire de vente. Le prix de vente unitaire de la Pdt provient du budget à l'hectare de la Pdt biologique des *Références économiques* du CRAAQ (2016). Celui du blé d'automne et de l'avoine proviennent respectivement du budget à l'hectare du blé panifiable biologique et de l'avoine biologique des *Références économiques* du CRAAQ (2019a, 2019b).

Les coûts variables quant à eux sont regroupés en :

- Coûts d'implantation des EV: approvisionnement en semences, opérations culturales liés aux EV;
- Coûts de mise en marché de l'avoine
- Coûts de la fertilisation organique : valeur des EF; épandage et incorporation.
- Coûts variables associés à chaque culture¹ : approvisionnement en semences, opérations culturales et mise en marché².

Sur la base de tous ces éléments, le calcul de la marge sur coûts variables a été fait pour chacune des trois années de production. On a :

$$MCV_{2016} = \text{Revenu}_{EV \text{ (avoine)}} - \text{coûts d'implantation}_{EV} - \text{coûts fertilisation}_{1EF} - \text{coûts mise en marché}_{avoine}$$

Le coût de la fertilisation en 2016 concerne la valeur de remplacement, l'épandage et l'incorporation de la moitié du FUM qui a été fait en octobre 2016.

$$MCV_{2017} = \text{Revenu}_{Pdt} - (\text{coûts fertilisation}_{2EF} + \text{coûts}_{Pdt} + \text{coûts}_{1blé-automne})$$

Les coûts du blé associés à l'année 2017 concernent l'approvisionnement, le passage de la herse et le semis du blé.

$$MCV_{2018} = \text{Revenu}_{blé-automne} - \text{coûts}_{2blé-automne}$$

¹ Nous ne tenons pas compte de certains coûts variables tels que l'ASREC (Assurance-récolte individuelle), la main d'œuvre salariée, l'intérêt à court terme, le coût de la certification biologique. Par conséquent les résultats obtenus ne sont pas comparables à la MCV des *Références économiques*.

² Les coûts de mise en marché que nous avons pris en compte varient en fonction du volume produit, donc en fonction du rendement. Pour la pomme de terre, les coûts de la mise en marché prennent en compte la livraison des palettes et les frais de courtage. Pour le blé d'automne, il s'agit de l'entreposage, séchage, criblage, plan conjoint, analyse qualité et le transport hors ferme. Pour l'avoine biologique il s'agit de l'entreposage, du séchage, du plan conjoint et du transport hors ferme.

Les coûts du blé associés à l'année 2018 concernent la récolte et les frais de mise en marché.

La valeur unitaire au printemps et à l'automne du FUM sont obtenues des références économiques sur la Valeur de remplacement engrais de ferme (CRAAQ, 2017). Dans le contexte de la production de Pdt biologique, on peut faire l'hypothèse que les producteurs ne disposent pas de fumier à la ferme. Ils doivent donc importer ces engrais des élevages de la région. Étant donné que le marché des EF est très hétérogène et qu'il varie grandement d'une région à l'autre (réf. : région en surplus d'EFvs région en équilibre ou en déficit), les valeurs de remplacement sont utilisées pour ne pas négliger le fait que ce fertilisant a tout de même une valeur. Pour ce qui est du prix des FPG, celui-ci provient du fournisseur (Thibault, communication personnelle, 2018).

Pour le coût unitaire des semences des EV, les références économiques du CRAAQ sur le prix des grains de semences ont été exploitées (CRAAQ, 2018a). Pour les opérations culturales, nous avons utilisé les références économiques du CRAAQ sur les coûts d'utilisation de la machinerie (CRAAQ, 2018b).

Étant donné que tous ces flux de coûts et de revenus sont étalés sur plusieurs années, ils ont tous été actualisés par rapport à l'année 1, soit 2016. L'actualisation consiste donc à rapporter à l'année initiale de la période les coûts et les revenus des années subséquentes de cette même période. Il en résulte les marges sur coûts variables actualisées de 2017 $MCVA_{2017}$ et de 2018 $MCVA_{2018}$.

Ainsi : $MCVA_{2017} = MCV_{2017} \times 1/(1 + t)$

$$MCVA_{2018} = MCV_{2018} \times 1/(1 + t)^2$$

Où t est le taux d'actualisation. Celui-ci est le taux d'intérêt moyen de 2016 pour les certificats de placement garantis trois ans, soit 1,13%. Ce taux est choisi comme le coût du capital investi, ou coût d'opportunité, dans la nouvelle pratique.

La marge sur coûts variables pour le cycle de production est calculée comme suit pour chaque essai :

$$MCVA_{totale} = MCV_{2016} + MCVA_{2017} + MCVA_{2018}$$

Les MCV en chiffres absolus n'offrent pas un bon repère du fait que certains coûts ne sont pas inclus dans l'analyse et alors, les MCV calculées dans la présente analyse ne peuvent pas être comparées à certaines références. Aussi, le but étant plutôt de comparer les différentes stratégies de fertilisation, les résultats de MCVA sont tous ramenés en pourcentage par rapport à la MCVA moyenne des essais témoins qui sont:

- Les parcelles d'avoine seule dans le cas des EV;
- Les parcelles sans EF.

3 RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 CROISSANCE DES ENGRAIS VERTS (2016)

Le contrôle des adventices est un défi majeur en agriculture biologique (bio) alors que les herbicides sont proscrits. La capacité de l'engrais vert (EV) à faire compétition efficacement aux mauvaises herbes (MH) contribue à diminuer leur présence et à permettre une meilleure production de biomasse aérienne d'EV pendant la saison et donc une meilleure fourniture en éléments fertilisants l'année suivante. Dans cet essai, les EV ont montré différentes capacités de compétition avec les MH (Figure 3). Tel qu'attendu, la céréale s'est implantée plus rapidement que les autres EV, avec un meilleur recouvrement (photo du 21 juin, 33 jours après les semis) (Figure 3). Cet avantage est également bien illustré par les mesures de biomasses du 27 juin (stade tallage de l'avoine) qui révélaient que celles d'avoine (seule et avec trèfle) étaient 11 et 4,5 fois plus élevées que celles de la vesce velue et du trèfle, respectivement, et 2 fois supérieure à celle produite par le ray-grass, l'autre graminée de l'essai (Figure 4). L'occurrence des MH a donc été la plus grande dans les parcelles de trèfle et de vesce, où la compétition était moins forte, avec une valeur intermédiaire dans celles de ray-grass (Figure 4). Au 18 juillet (stade épiaison de l'avoine), la situation s'était accentuée. La pression de MH était très forte dans les parcelles de trèfle et de vesce, présentant les plus faibles biomasses d'EV (Figure 4). Toutefois, par la suite, il est très important de mentionner que la situation s'est rétablie pour la vesce velue dont la croissance s'est accélérée en cours de saison pour devenir très compétitrice, voire étouffante sur les MH. Ainsi, au 29 août 2016, la majorité des MH présentes en juin et juillet avaient été étouffées par la vesce velue, devenue dominante dans les parcelles (Figure 3). Enfin, dans le cas du trèfle semé en intercalaire de la céréale, malgré la présence d'un couvert important d'avoine pendant la saison, le trèfle a tout de même bien comblé les entres-rangs au 6 septembre lors de la récolte de l'avoine et il avait produit un tapis relativement uniforme au 3 octobre, juste avant son incorporation (Figures 3, 4 et 5).

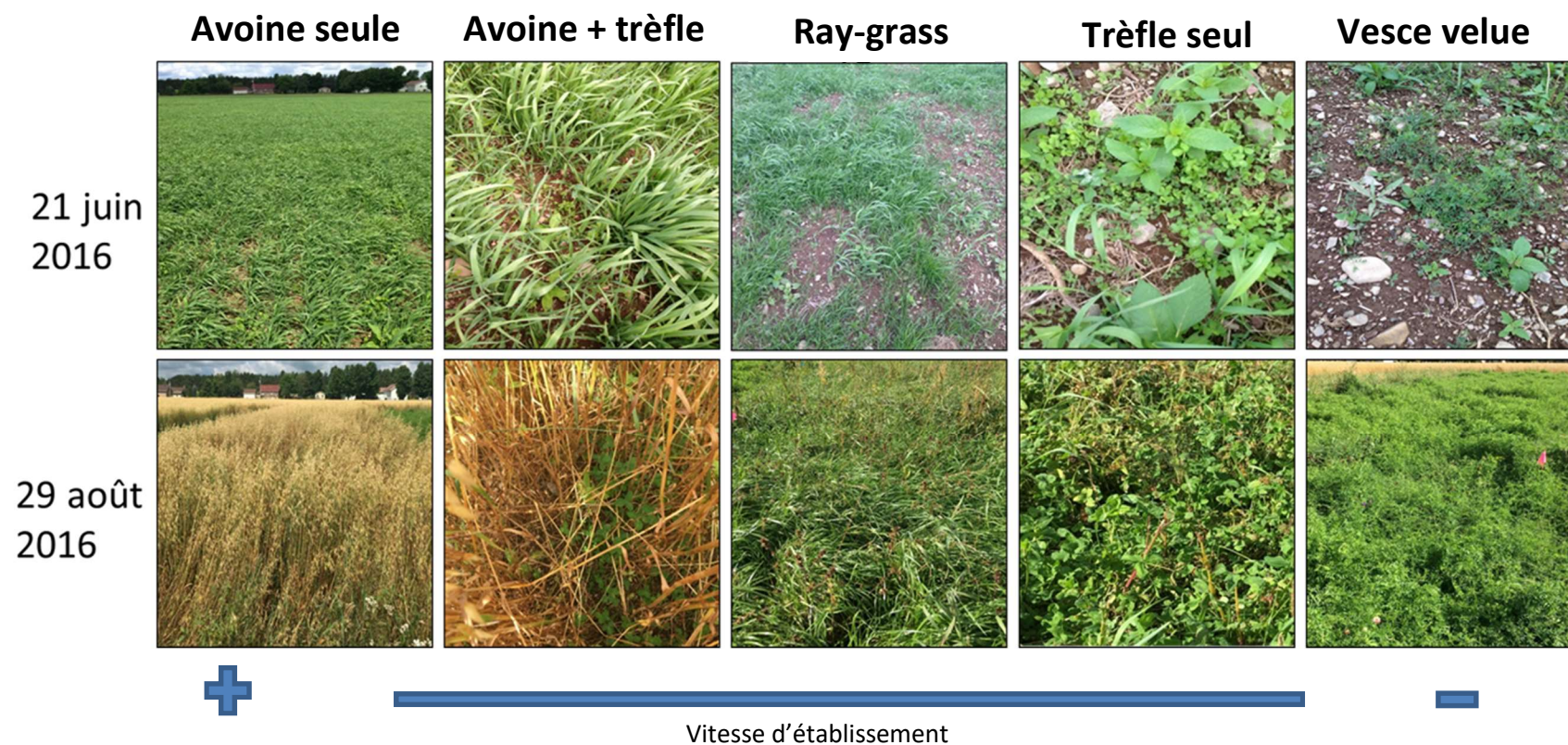


Figure 3. Représentation visuelle de la vitesse d'établissement des cultures d'engrais verts en ordre décroissant de la culture la plus rapide à la moins rapide entre le 21 juin et le 29 août 2016.

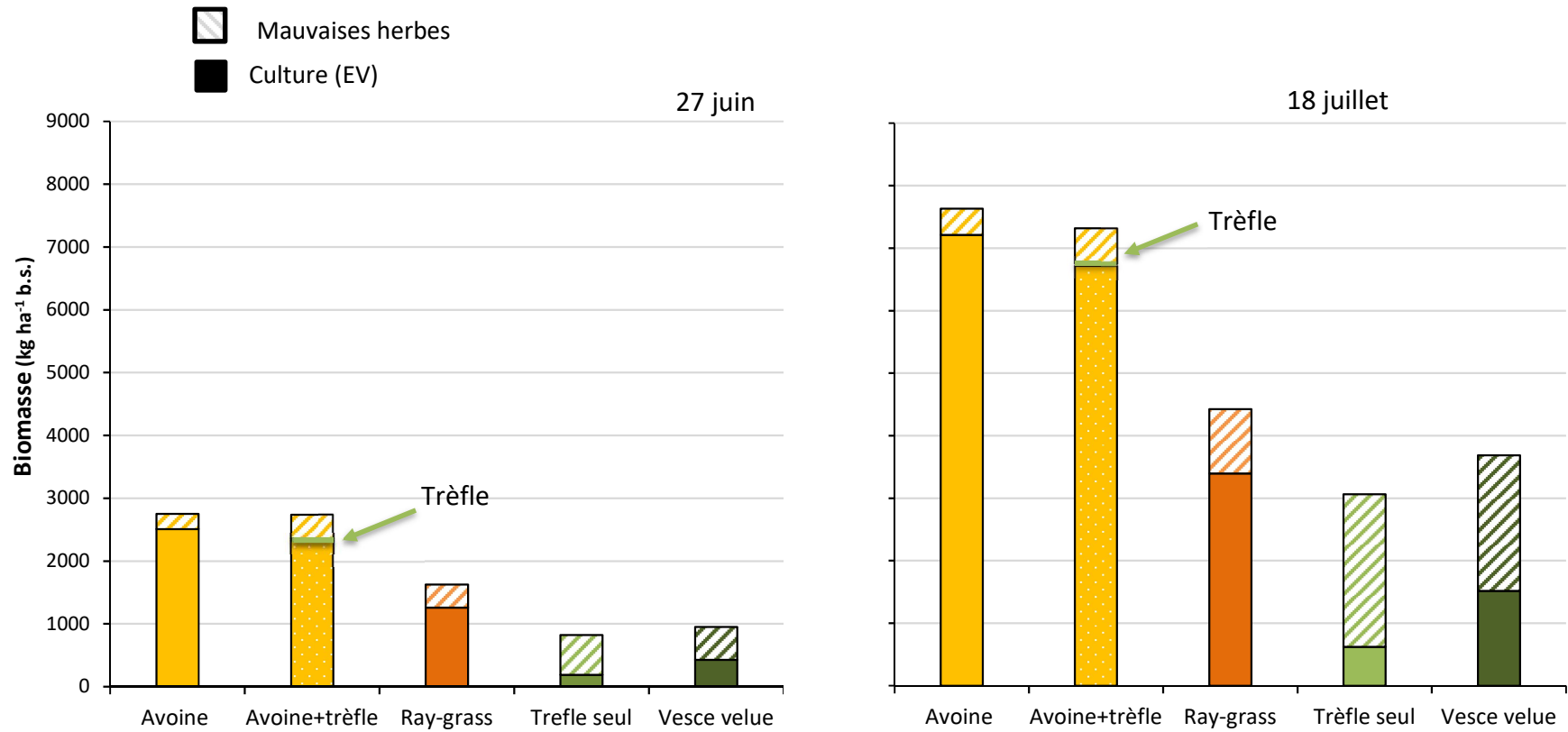


Figure 4. Biomasse aérienne des différents engrais verts et des mauvaises herbes au stade tallage (27 juin) et juste avant l'épiaison (18 juillet) de l'avoine en 2016.

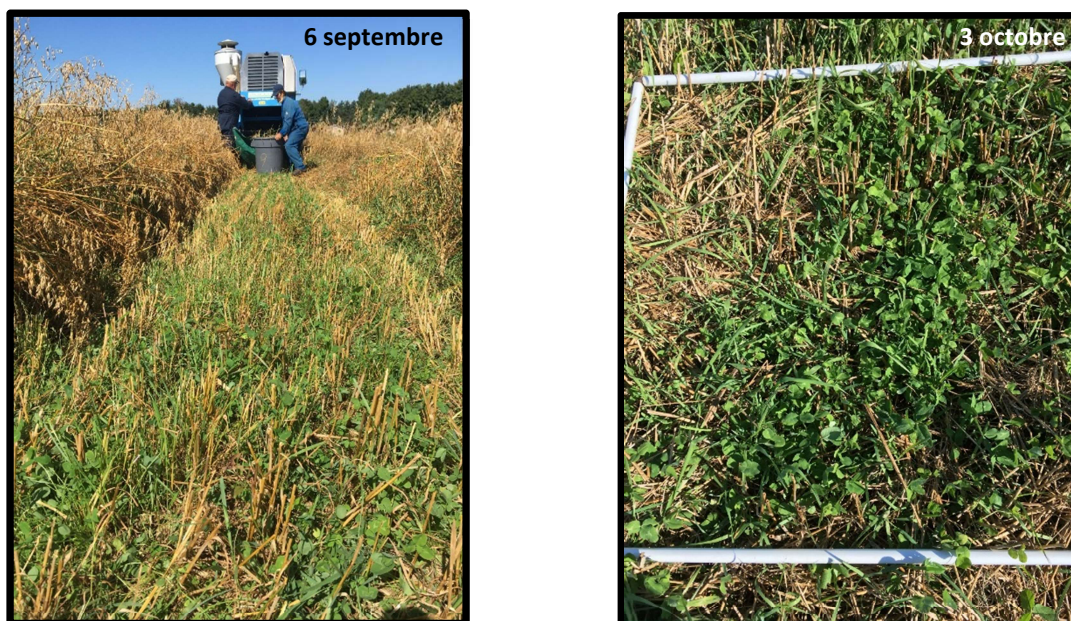


Figure 5. Apparence du trèfle intercalaire dans l’avoine lors de la récolte de l’avoine le 6 septembre et avant son incorporation le 3 octobre 2016.

L’avoine seule et l’avoine avec le trèfle avaient comme avantage supplémentaire de procurer un revenu aux producteurs comparativement aux autres EV par la vente des grains. Les rendements dans les parcelles d’avoine au 6 septembre 2016 ont été très intéressants pour la production bio (Figure 6). Ils se situaient dans la moyenne supérieure des rendements moyens obtenus en Chaudière-Appalaches en 2016 (ISQ, 2016). Il est pertinent de mentionner que la présence du trèfle dans les entre-rangs d’avoine n’a pas eu d’effet négatif sur les rendements en grains puisqu’ils ont été comparables et même légèrement supérieurs ($5,0 \text{ T ha}^{-1} 14 \% \text{ hum.}$) à ceux de l’avoine seule ($4,8 \text{ T ha}^{-1} 14 \% \text{ hum.}$). L’azote des grains est toutefois exporté du champ pour la vente, ainsi les traitements avec l’avoine au contraire des autres EV impliquent une sortie d’azote du champ. Cette exportation est relativement importante puisque malgré une biomasse produite moins élevée en grains d’avoine contrairement à la paille (Figure 6), le grain a prélevé en moyenne 62 kg N ha^{-1} contre 43 kg N ha^{-1} pour la paille (Figure 7).

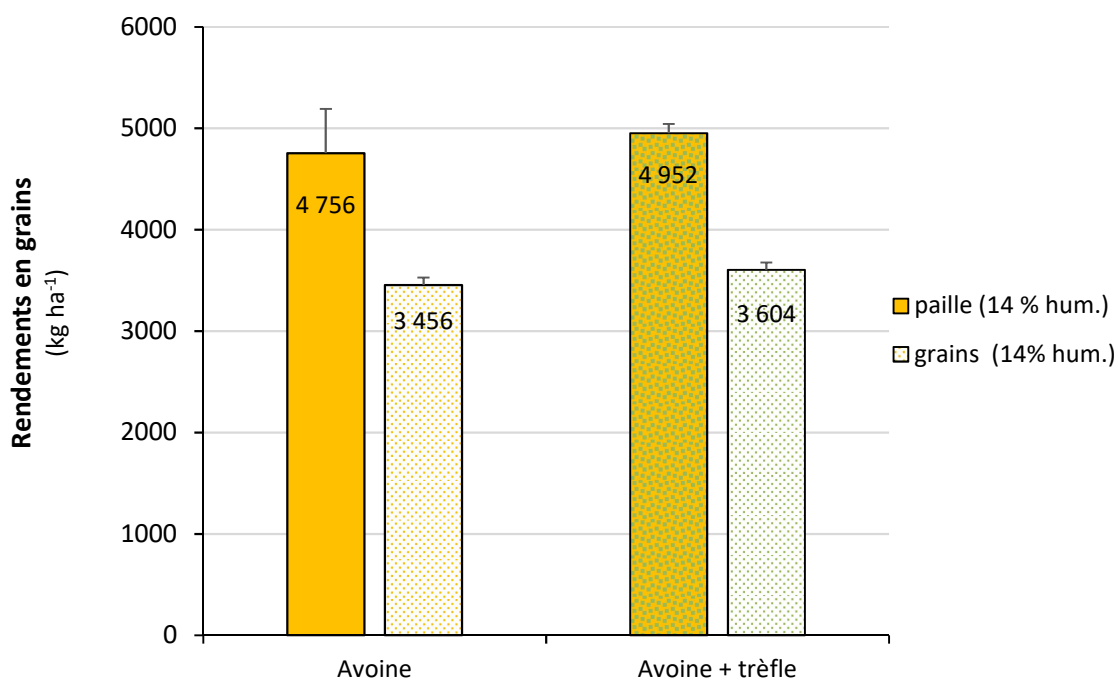


Figure 6. Rendements en paille et en grains d'avoine en fonction de la présence ou non de trèfle en intercalaire, le 6 septembre 2016.

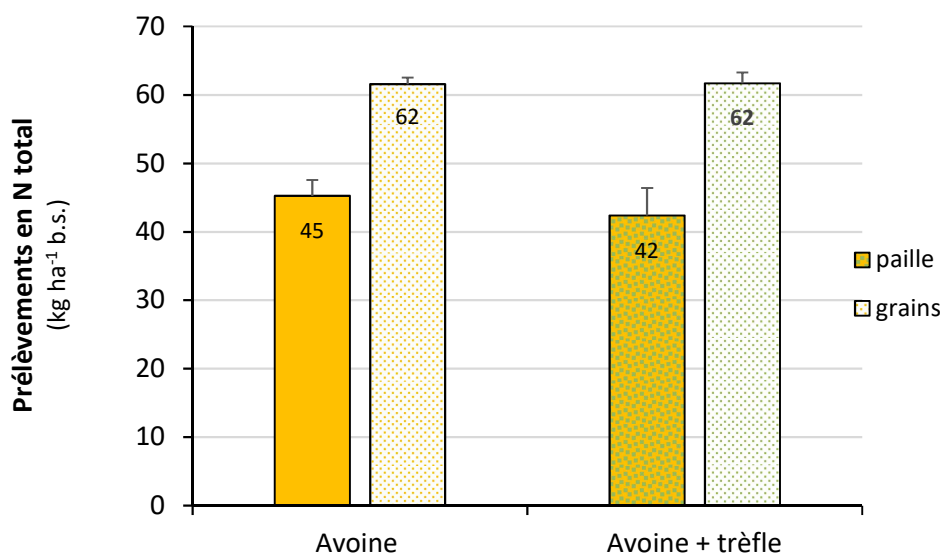


Figure 7. Prélèvements totaux (grains et pailles) en N de l'avoine en fonction de la présence ou non de trèfle en intercalaire, le 6 septembre 2016.

Enfin, pendant leur croissance, les EV ont également influencé différemment les contenus du sol en éléments disponibles. En pleine saison de croissance (18 juillet, stade juste avant l'épiaison de l'avoine), moins de charges de nitrate (N-NO₃) ont été retrouvées dans le sol des parcelles d'avoine, avec ou sans trèfle (Tableau 4). Cette situation pourrait s'expliquer du fait que cette culture avait une croissance beaucoup plus rapide et abondante que les autres EV (légumineuses ou ray-grass) et que ses besoins en N sont aussi les plus élevés. Des différences ont aussi été trouvées pour le P_{eau}. Ainsi, les sols des parcelles de vesce velue tendaient à contenir moins de P_{eau} (P = 0,11) que les parcelles des cultures non légumineuses (avoine et ray-grass). Même si les différences semblent minces (5,7 mg P_{eau} L⁻¹ vs. 7,8 mg L⁻¹), elles sont importantes. Le P_{eau} est étroitement lié au risque environnemental de perte de P. En effet, la concentration de P dissous dans la solution du sol, qui se retrouve potentiellement dans les eaux de ruissellement, est hautement corrélée au P extractible à l'eau (Khiari et coll. 2000). C'est pourquoi le P_{eau} permet d'évaluer le risque de perte de P dans les eaux de ruissellement. Cette méthode n'est pas sensible à la texture du sol et sa valeur critique dans les sols minéraux du Québec correspond à un P_{eau} de 9,7 mg L⁻¹ (Pellerin et coll. 2006). Ces écarts pourraient s'expliquer par le fait que des acides organiques différents sont produits selon les espèces d'EV. Certains acides organiques peuvent se substituer au P et se lier aux sites de fixation du sol, ce qui favorise le maintien en solution du P inorganique (Swenson et coll. 1949).

Tableau 4. Charge du sol en N et P disponible (N-NO₃ et P_{eau}) en fonction des engrais verts au stade épiaison de l'avoine le 18 juillet 2016.

Engrais verts	N-NO ₃ (kg ha ⁻¹ b.s)	P _{eau} (mg L ⁻¹ b.s)
Avoine	19 a	7,8 c
Avoine avec trèfle	18 a	7,0 bc
Ray-grass	23 b	6,7 bc
Mélange de trèfle	29 b	6,3 ab
Vesce velue	26 b	5,7 a
Valeurs de P	0,002	0,11

Les valeurs avec des lettres distinctes sont significativement différentes au seuil P ≤ 0,1.

Lors de la récolte, des différences ont aussi été mesurées pour le nitrate. Au 6 septembre, au moment de la récolte de l'avoine, les charges en N-NO₃ résiduel étaient de 31 et 37 kg N-NO₃ ha⁻¹ pour l'avoine + trèfle et l'avoine seule, respectivement (Figure 8) (moyennes présentées avec barres d'erreur sans ANOVA car sols des autres EV non testés à cette date). Ce résultat est contraire à ce qui était attendu, soit que le trèfle permettrait d'enrichir le sol en N disponible puisqu'il fixe le N de l'air. Selon les résultats du Tableau 5, davantage de N (17 kg ha⁻¹ de plus) se retrouvait dans les biomasses aériennes des parcelles avoine + trèfle (49 + 10 kg N-NO₃ ha⁻¹) en comparaison des parcelles d'avoine seule (42 kg N-NO₃ ha⁻¹). Le prélèvement accru de N dans les parcelles avoine + trèfle explique donc peut-être cet écart. Cela dit, il était plutôt envisagé que le trèfle, fixant le N de l'air, permettrait une meilleure accumulation de N sans avoir à puiser davantage dans le nitrate fourni par le sol. Plus tard en automne, juste

avant l'enfouissement des EV, les charges en N-NO₃ étaient beaucoup moins élevées dans les parcelles de ray-grass (11 kg N-NO₃ ha⁻¹) et du mélange de trèfle (21 kg N-NO₃ ha⁻¹), en comparaison des parcelles de vesce qui présentaient des charges de 49 kg N-NO₃ ha⁻¹ (Figure 8). Les sols des EV de trèfle et de ray-grass ne sont donc pas plus pourvus en automne de N-NO₃ dans la couche supérieure de sol (0-30 cm), en comparaison des mesures de mi-saison (18 juillet). À l'inverse, la vesce a enrichi le sol, peut-être par ses exsudats racinaires, et ce malgré le fait qu'elle a permis de fixer dans sa biomasse près de 3x plus de N_{total} (Tableau 5) que les pailles d'avoine seule.

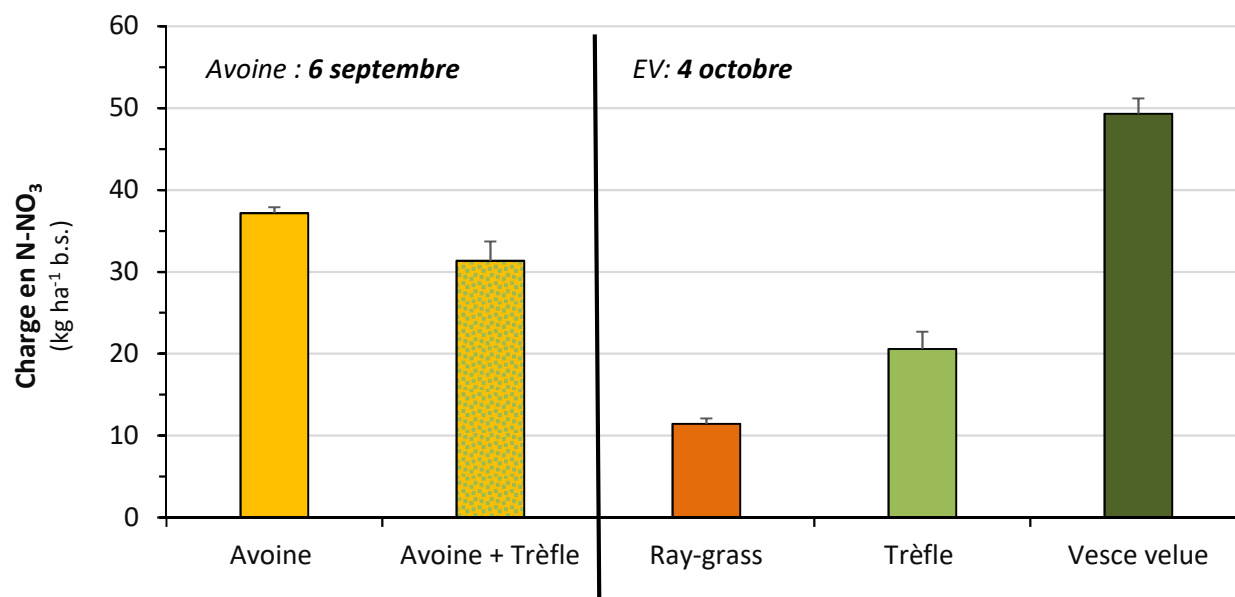


Figure 8. Contenu du sol (strate 0-30 cm) en N-NO₃ à la récolte de l'avoine le 6 septembre et juste avant l'enfouissement des engrais verts, le 4 octobre 2016.

3.2 CARACTÉRISATION DES ENGRAIS VERTS ET DES ENGRAIS DE FERME

Le Tableau 5 présente la caractérisation des différents EV et EF testés. En 2016, le ray-grass a produit le plus de biomasse aérienne (22,6 T ha⁻¹ b.h.), mais sa plus faible teneur en N (1,7 %) a abaissé son potentiel de fourniture en N_{eff} qui s'est avéré le plus bas des EV (35 kg N_{eff} ha⁻¹) non intercalaire. À l'inverse, la vesce velue, présentant moins de biomasse que le ray-grass mais une teneur plus élevée en N (2,8 %) a présenté le meilleur potentiel en N_{eff} de tous les EV. À 67 kg N_{eff} ha⁻¹ (120 kg N_{total} ha⁻¹), il s'agit d'une fourniture très élevée, dépassant la cible visée de 50 kg N_{eff} ha⁻¹. Le trèfle seul (pleine surface) a eu le rendement en biomasse le plus faible des EV pleine saison (9,6 T ha⁻¹). Toutefois, son contenu en N (2,5 %) plus élevé lui a conféré une capacité de fourniture légèrement plus grande que celle du ray-grass, soit 39 kg N_{eff} ha⁻¹. La biomasse du trèfle en intercalaire de l'avoine a été encore plus faible, mais sa teneur en N était la plus haute à 4 %. Le trèfle des bandes intercalaires a donc quand même produit 8 kg N_{eff} ha⁻¹. Il se peut que dans ces conditions de croissance, le trèfle ait atteint une maturité (lignification) moins importante due à la compétition avec l'avoine. L'avoine seul a présenté une paille de ratio C/N de 45 ou plus. Au-delà d'un ratio C/N de 20, cette biomasse enfouie devient à risque de mener à l'immobilisation du N une fois incorporée (Verville, 2014). De plus, lorsque la teneur en N de la biomasse est

inférieure à 1,5 % N, les apports en N_{eff} sont considérés nuls (Jobin et Douville (1996) dans Duval et coll. (2014)). À cela s'ajoute que les grains renfermaient la plus grande part de N et qu'ils ont été exportés du site à la récolte (Figure 7; $> 60 \text{ kg ha}^{-1}$). Pour toutes ces raisons, l'avoine seule est considérée comme le traitement témoin « sans EV » dans cet essai, avec une estimation de fourniture en N_{eff} l'année suivante par la paille jugée nulle (0N) (Tableau 5). Les apports visés par les EF étaient de $100 \text{ kg } N_{\text{eff}} \text{ ha}^{-1}$ pour le FUM et les FPG (FPG 100N), plus une dose réduite de $50 \text{ kg } N_{\text{eff}} \text{ ha}^{-1}$ pour les FPG 50N. Cela afin de pouvoir évaluer l'impact de leur composition chimique autre que le N, des modes et du temps d'application. Ainsi, l'apport global en éléments totaux NPK a été très variable selon les régions. Conséquemment, pour une même unité apportée de N_{eff} , certains produits apportent beaucoup plus de P ou de K que d'autres. Le FUM présente le pire ratio pour le P avec 1,3x, tandis que les légumineuses ont des ratios se situant autour de 0,10 à 0,60. Pour le K, le FUM et le ray-grass ont tous les deux un ratio élevé de 4x et plus.

L'étude du ratio C/N et de l'ISB indique que les FPG sont instables et se minéraliseront rapidement. Le FUM, qui présente un ISB et un C/N plus élevés sera plus résistant et lent à être minéralisé. La part de C dans la fraction soluble des FPG et du FUM est encore plus parlante. Les FPG ont près du double de C_{eau} , en comparaison du FUM. Les FPG apportent donc beaucoup plus de C labile et énergisant pour les microorganismes du sol. Elles devraient fournir beaucoup plus intensément et rapidement du N_{eff} que le FUM. Ceci concorde avec les coefficients d'efficacité du N beaucoup plus hauts pour les FPG que pour le FUM et explique pourquoi des quantités de $325 \text{ kg } N_{\text{total}} \text{ ha}^{-1}$ ont dû être apportées avec le FUM vs. $142 \text{ kg } N_{\text{total}} \text{ ha}^{-1}$ avec les FPG, pour une dose équivalente de $100 \text{ kg } N_{\text{eff}} \text{ ha}^{-1}$ apportée à la Pdt (Tableau 5). Lors d'un essai terrain en production de Pdt bio (Lynch et coll. 2008a), il a d'ailleurs été observé que la partie la plus disponible des FPG (N sous forme de NH_4) est relâchée dans les 10 premiers jours suivant leur application et que la majorité du N organique (No) est minéralisé dans les 31 jours suivant son application, ce qui est très rapide. Landry et Coll (2019), dans un projet établissant le coefficient d'efficacité et le délai de libération du N des FPG en comparaison d'un engrais minéral conventionnel (27-0-0), rapportent également que les FPG minéralisent très rapidement et intensément, dès leur application au sol.

Le tableau 6 résume les apports en N_{eff} , P_2O_5 et K_2O fournis à la Pdt pendant la saison 2017 sur la base de la caractérisation des EV et des EF, selon les différentes régions. Les besoins de la culture au site étaient évalués à $150 \text{ N} - 150 \text{ P}_2\text{O}_5$ et $160 \text{ K}_2\text{O}$ (CRAAQ 2010). Selon cette recommandation, seules les régions « vesce velue + FUM » et « vesce velue + FPG 100N » comblaient ou apportaient plus que les besoins ciblés pour les trois éléments fertilisants majeurs (N, P_2O_5 et K_2O). Pour atteindre le niveau visé de N_{eff} , de forts excès de P_2O_5 et K_2O sont toutefois produits avec la région « vesce velue + FUM ». Par contre, la région « vesce velue + FPG 100N » apporte presque la formulation exacte à celle recherchée. Les régions « trèfle + FPG 100N » et « ray-grass + FPG 100N » sont aussi intéressantes car elles fournissent presque toutes les quantités recherchées de N_{eff} et P_2O_5 , tout en comblant les besoins en K_2O . Toutes les régions avec le FUM dépassent largement les apports nécessaires de P_2O_5 et K_2O . La problématique est renforcée lorsque le FUM est jumelé au ray-grass qui est l'EV apportant le plus de P_2O_5 et K_2O . En fait, les graminées ont une forte teneur des tissus en K. Ceci avait été observé dans un essai sur la carotte bio en terre noire mené à la PIAB de l'IRDA (Landry, 2016). Dans cette étude sur la fertilisation de la carotte, les besoins élevés en K de cette culture n'avaient été atteints qu'avec l'EV de graminée (avoine) et non avec ceux de légumineuses, ce qui s'était traduit par de meilleurs rendements avec l'EV d'avoine. La Pdt est aussi une culture exigeante en K.

Tableau 5. Caractérisation biochimique, biomasses et apports d'éléments fertilisants des engrais verts et des engrais de ferme.

Engrais	Biomasse (T ha ⁻¹) (b.h.)	N _{total}	N _{eff} ^{1 2} (kg ha ⁻¹)	P _{total}	K _{total}	P _{total} /N _{eff}	K _{total} /N _{eff}	C/N	Carbone (%)		ISB %	
									Soluble	Résistant ³		
Saison 2016												
Avoine (paille)	5,5	42	0	12	87	.	.	52	.	.	.	
Avoine + trèfle	Avoine (paille)	5,8	49	0	13	90	.	.	45	.	.	
	Trèfle	1,1	10	8	0,8	7	0,10	0,9	11	.	.	
Ray-grass	22,6	99	35	20	164	0,57	4,7	25	.	.	.	
Mélange trèfle rouge et blanc	9,5	78	39	9	63	0,23	1,6	18	.	.	.	
Vesce velue	16,7	121	67	17	78	0,25	1,2	15	.	.	.	
Saison 2017												
Fumier de bovin composté (FUM)	60	325	100	132	396	1,3	4,0	14	44	37	23	
Fientes de poules en granules (FPG) 50 N	1,3	71	50	22	34	0,45	0,7	6	76	8	14	
Fientes de poules en granules (FPG) 100 N	2,6	142	100	45	68	0,45	0,7	6	76	8	14	

¹ Engrais verts: Jobin et Douville (1996) dans Duval et coll. (2014)

² Engrais de ferme: CRAAQ (2010)

³ Fractions selon la méthode ISB. Résistant = Lignine + cellulose brute.

Tableau 6. Apports en éléments nutritifs pour la pomme de terre en fonction des différentes régies testées

Engrais verts	Engrais de ferme Doses cibles en éléments efficaces	Apports (kg ha ⁻¹)		
		N _{eff}	P ₂ O ₅ total ¹	K ₂ O total
		150	150	160
Avoine	Témoin sans EF	0 ²	27	104
	FUM	100	330	580
	FPG 50 N	50	78	145
	FPG 100 N	100	131	186
Avoine + trèfle	Témoin sans EF	8	32	116
	FUM	108	334	592
	FPG 50 N	58	82	157
	FPG 100 N	108	135	198
Ray-grass	Témoin sans EF	35	46	197
	FUM	135	348	672
	FPG 50 N	85	96	238
	FPG 100 N	135	149	278
Trèfle	Témoin sans EF	39	21	76
	FUM	139	323	551
	FPG 50 N	89	71	116
	FPG 100 N	139	124	157
Vesce velue	Témoin sans EF	67	39	94
	FUM	167	341	569
	FPG 50 N	117	89	134
	FPG 100 N	167	142	175

¹ Quantités totales de P et K appliquées, exprimées sous forme de P₂O₅ et K₂O. Il ne s'agit pas des contenus efficaces car il existe trop d'incertitudes sur les coefficients d'efficacité, principalement du P et K des EV.

² La quantité de N_{eff} apportée est considérée nulle (0N) à cause du haut C/N des pailles d'avoine, de leur faible teneur en N (%) et de l'exportation du N des grains hors du site.

3.3 POMME DE TERRE (2017)

3.3.1 Analyses ponctuelles du sol

Au printemps 2017, avant la plantation des Pdt et les apports d'EF prévus en 2017 (FUM 2^e partie de la dose et FPG), le sol des parcelles n'ayant pas reçu de FUM en automne 2016 contenait en moyenne 23 % moins de nitrate que les sols en ayant reçu (Tableau 7), tous EV confondus. Il ne peut être clairement établi si en présence d'EV, la différence de contenu en nitrate est moindre avec ou sans FUM. Cependant, il est bien mesuré que l'apport de la dose d'automne (50 %) de FUM a bel et bien un effet qui perdure jusqu'au printemps suivant. De plus, dans un contexte sans FUM, l'incorporation d'EV en automne a permis de hausser le nitrate disponible du sol au printemps (+ 15 %), en comparaison des sols des traitements d'avoine (seule ou avec trèfle intercalaire). Le fait que l'avoine n'apportait pas de N_{eff} et que l'enfouissement des pailles a peut-être causé une certaine immobilisation, expliquent probablement cet effet des EV de ray-grass, vesce et trèfle. Par ailleurs, tel qu'observé lors de projets

antérieurs de l'équipe de la chercheuse C. Landry, les résultats révèlent une synergie entre les EV et les EF de nature plus résistante à la minéralisation. En effet, la différence de charge de nitrate entre le traitement « avoine seule sans FUM » et le traitement « vesce + FUM » ($43 - 27 = 16 \text{ kg N-NO}_3 \text{ ha}^{-1}$) est plus grande que les différences entre les EV « avoine seule sans FUM » et « vesce seule sans FUM » ($32 - 27 = 5 \text{ kg N-NO}_3 \text{ ha}^{-1}$) ou même « avoine seul + FUM » ($34 - 27 = 7 \text{ kg N-NO}_3 \text{ ha}^{-1}$). Cette synergie a déjà été observée lors d'essais de régies mixtes d'EV et d'EF dans le maïs-grain. Des incubations de sol avaient démontré que lorsqu'un EF est incorporé dans un sol ayant eu des EV, sa capacité de fourniture en N est augmentée, et cela d'autant plus que l'EF est de nature résistante à la dégradation (ISB plus élevé) (Landry et coll. 2018). Ainsi, les sols recevant du fumier de « broiler » au printemps produisaient 5 fois plus de nitrate au stade soie du maïs si un EV de pois avait été incorporé l'automne précédent (Landry et coll. 2018). La synergie observée s'expliquerait du fait que la fraction de C labile des EV sert de source d'énergie accessible efficace pour les microorganismes du sol (McGill et coll. 1986) qui sont le moteur du cyclage du N organique, ce qui vient simultanément stimuler la dégradation de l'EF et ainsi la libération de NO_3 (Landry et coll. 2011). Le choix de la régie d'automne a donc une forte influence sur le nitrate disponible au printemps suivant pour la Pdt, au-delà de l'apport de N par l'EV lui-même.

Tableau 7. Charge du sol en N-NO_3 (kg ha^{-1} b.s) au printemps 2017 (4 mai) des parcelles principales ayant reçu ou non du fumier de bovin incorporé à l'automne 2016.

	Avoine	Avoine avec trèfle	Ray-grass	Mélange de trèfle	Vesce velue
Sous-parcelle sans fumier de bovin apporté à l'automne 2016	27 ¹	27	31	33	32
Sous-parcelle avec fumier de bovin apporté à l'automne 2016 ²	34	32	36	34	43
Différence 0 FUM vs. FUM	21 %	16 %	14 %	3 %	24 %

¹ Aucune analyse statistique.

² Avant l'apport de la dose complémentaire de FUM du printemps.

3.3.2 Dynamique du nitrate du sol et rendements en pommes de terre

Le suivi *in situ* de l'intensité du N-NO_3 du sol à l'aide de membranes d'échange ionique (MEI) a permis de mesurer à quels moments pendant la saison les plants ont eu accès à davantage de N disponible (Figures 9 et 12). Un pic est atteint au 4 juillet. Les flux s'abaissent ensuite fortement jusqu'au début août. Cette période de baisse peut être attribuée à une phase de prélèvement très actif de N par la Pdt puisqu'elle concorde avec le début de la croissance très active de la culture (de 60 à 80 JAP : 17 juillet-6 août), ce qui crée une forte demande pour le N. La fertilisation semble donc bien synchronisée avec les besoins de la culture. Les mesures d'intensité en PO_4 ont également été suivies mais les résultats ne sont pas présentés car il n'y a aucune différence entre les traitements.

En ce qui a trait aux divers engrais, le premier constat notable est que les EV ($P = 0,005$) et les EF ($P < 0,001$) ont un impact significatif sur les flux de nitrate et cela, sans interaction (EV x EF : $P = \text{ns}$) (Figures 9 et 12). Ensuite, les

engrais n'ont pas tous le même effet. Les flux de N-NO₃ de la figure 9 permettent de visualiser qu'avec ou sans EF (tous traitements d'EF confondus), les EV de légumineuses produisent des flux supérieurs aux graminées, que ce soit l'avoine seule ou le ray-grass. Les plus grandes différences se situent le 4 juillet au pic des flux, juste avant l'apport de la 2^e partie des FPG par fractionnement. À cette date, les sols ayant eu des EV de légumineuses (vesce, trèfle seul et avoine + trèfle) enfouies l'automne précédent présentent une intensité de nitrate en moyenne 30 % plus élevée. Sur la saison, la somme des flux des périodes montrent que ceux-ci atteignent (tous traitements d'EF confondus) un cumul autour de 260 µg N-NO₃ cm⁻² saison⁻¹ dans les sols d'EV de trèfle et de vesce, et entre 203-231 µg N-NO₃ cm⁻² saison⁻¹ dans les sols avec graminées. Cependant, cette meilleure disponibilité en N ne s'est pas traduite par des rendements vendables plus élevés (Figure 10; EV : $P = 0,19$). Tous EF confondus, le rendement vendable moyen obtenu a été de 30,2 t ha⁻¹. Puisqu'il s'agit de très bons rendements pour la Pdt bio, il se peut que mêmes les régies présentant des flux de nitrate moins élevés fournissent quand même la quantité requise pour atteindre le plein potentiel de rendement. Cela dit, c'est la vesce velue et l'avoine + trèfle qui tendaient à donner les rendements les plus élevés et il s'agit des EV qui ont donné les intensités en N-NO₃ dans le sol les plus élevées, à égalité avec le trèfle, à un moment charnière des besoins de la culture, le 4 juillet (Figure 9). Quant aux parcelles de trèfle seul, elles tendaient à donner les rendements vendables les plus faibles, soit environ 3 t ha⁻¹ de moins que les autres EV. Cette tendance pourrait s'expliquer par une présence plus importante de MH tout au long de la saison dans les parcelles de cet EV. En effet, l'évaluation de la biomasse de MH présente dans les parcelles du dispositif, même après les passages de sarcler le 17 août 2017, montre qu'il y avait encore 3 T ha⁻¹ (base sèche) de MH dans les parcelles de trèfle (Figure 11; effet EV : $P = 0,01$), alors que pour tous les autres EV les biomasses de MH étaient inférieures à 2 T ha⁻¹. La piètre compétition du trèfle avec les MH l'année précédente a probablement permis de maintenir une banque de semences de MH plus importante qui ont ensuite fait compétition avec les Pdt.

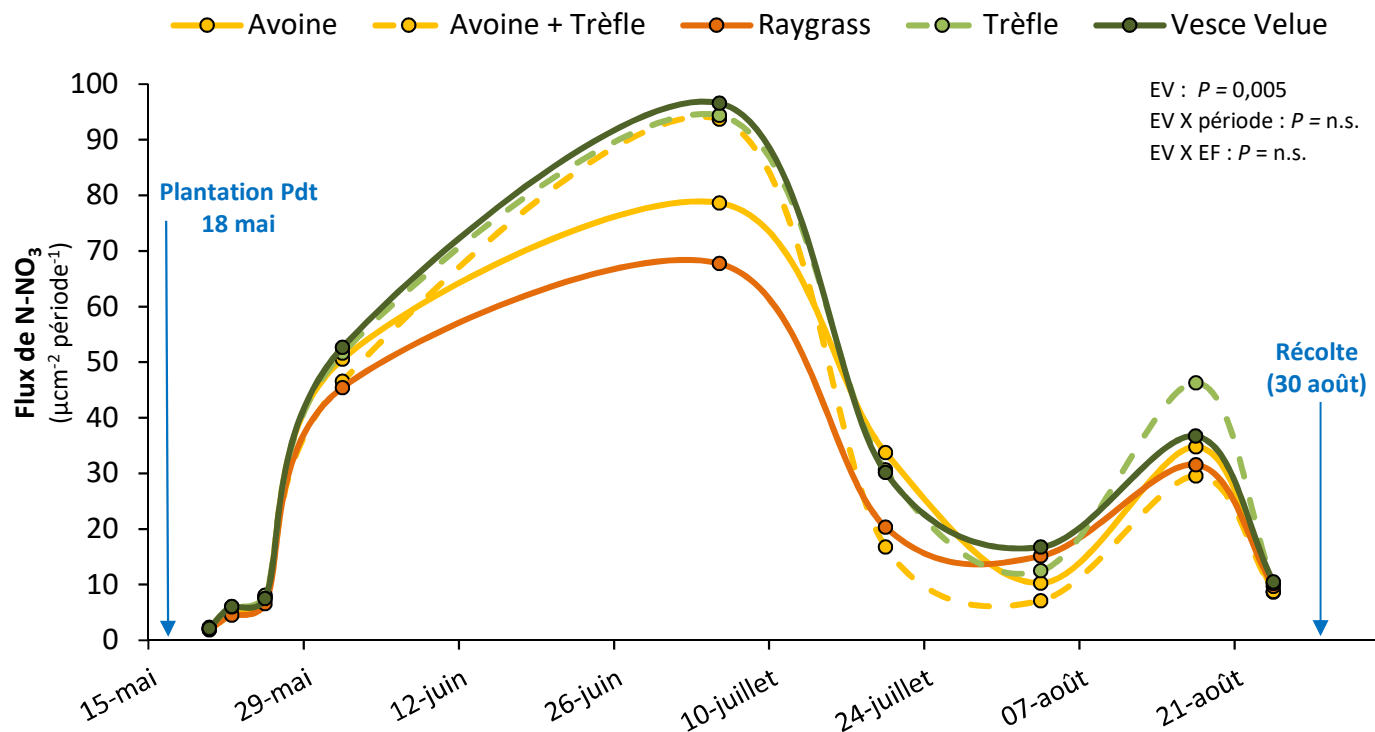


Figure 9. Flux de N-NO₃ des membranes d'échange ionique sur la saison 2017, selon les engrais verts de l'automne 2016 (tous engrais de ferme confondus).

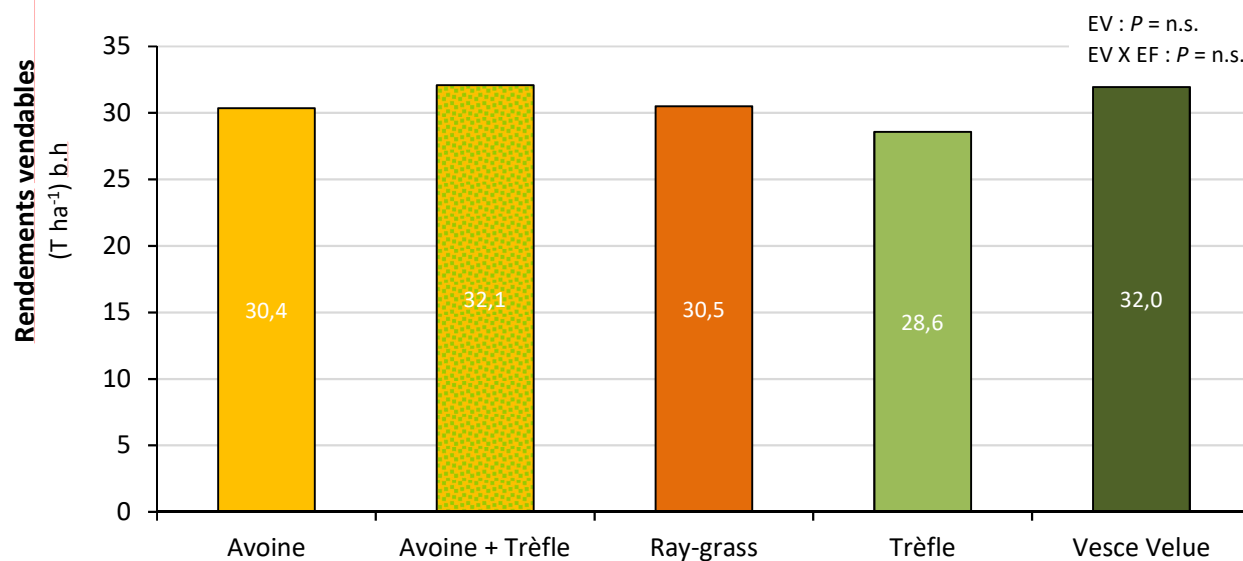


Figure 10. Rendements vendables en tubercules (29 août 2017), en fonction des engrais verts de l'automne 2016 (tous engrais de ferme confondus).

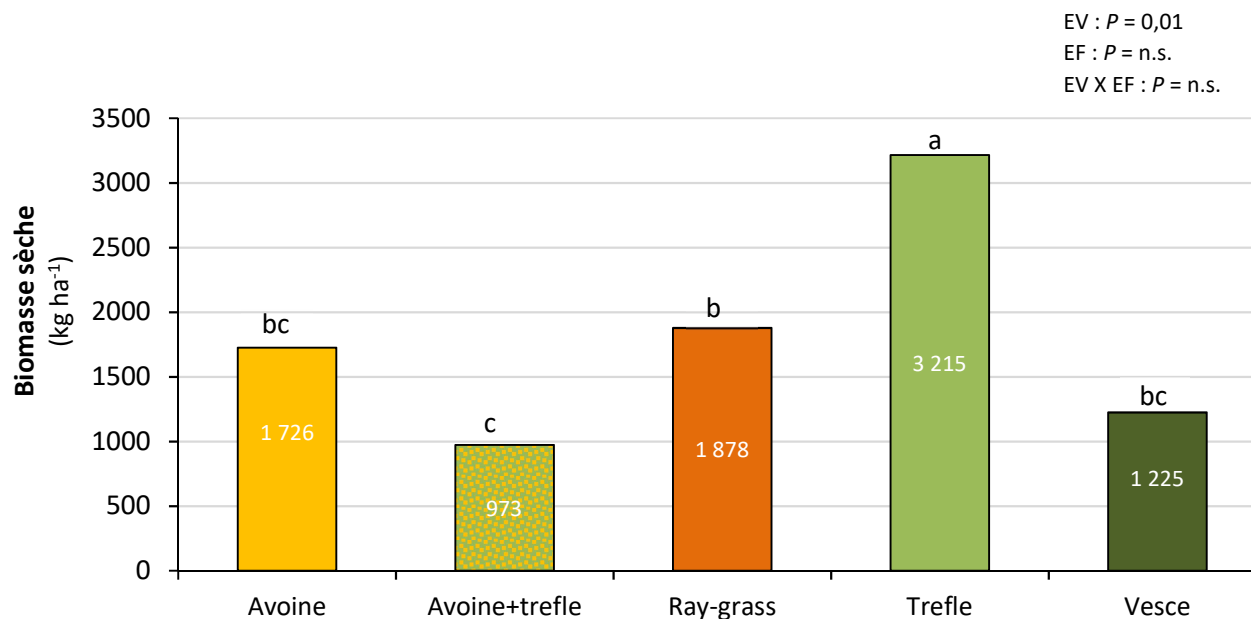


Figure 11. Biomasse de mauvaises herbes encore présente dans les parcelles le 16 août 2017, en fonction des engrais verts de l'automne 2016 (tous engrais de ferme confondus). Les valeurs avec des lettres distinctes sont significativement différentes au seuil $P < 0,1$.

En ce qui concerne les EF (Figure 12), ce sont les FPG qui ont de loin le plus accru les flux de $N-NO_3$ sur pratiquement toute la saison. Inversement, les sols des sous-parcelles avec FUM présentent des flux similaires à ceux des sols témoins sans EF sur presque toute la période de croissance de la culture. Tout comme avec les EV, les différences les plus marquées ont été observées juste avant le fractionnement des FPG (4 juillet). Ainsi, avant même l'apport de la dose complémentaire de FPG, les sols FPG 100N avaient des flux du double de ceux des sols avec FUM ou du témoin sans EF, et de 1,5 fois ceux des sols FPG 50N. La fertilisation au FUM n'a donc pas permis de hausser les flux davantage que le sol sans EF. Dans les périodes subséquentes, contrairement à ce qui a pu être observé avec les EV, les FPG ont maintenu une intensité de libération de $N-NO_3$ plus importante que le témoin sans EF ou le traitement FUM. La pratique du fractionnement apparaît donc avantageuse et efficace. La décision d'apporter 60 % de la dose à ce moment ressort aussi comme justifiée, comme le montre le prélèvement intense qui suit pour soutenir la croissance active de la culture. À l'opposée, l'apport de la 2^{ème} dose de FUM avant la plantation n'apparaît pas judicieux. L'apport de la 1^{ère} partie en automne est aussi questionnable considérant que la hausse générée est faible ($7 \text{ kg } N-NO_3 \text{ ha}^{-1}$), au mauvais moment (Tableau 7) et que cela ne semble pas aider la 2^e dose à monter les flux de nitrate sur la saison de croissance. Au final, sur la saison, les sols fertilisés au FPG 100N ont cumulé $321 \mu\text{g } N-NO_3 \text{ cm}^{-2} \text{ saison}^{-1}$, en comparaison de 195 et $166 \mu\text{g } N-NO_3 \text{ cm}^{-2} \text{ saison}^{-1}$ pour les sols fertilisés au FUM ou les sols témoin sans EF, respectivement.

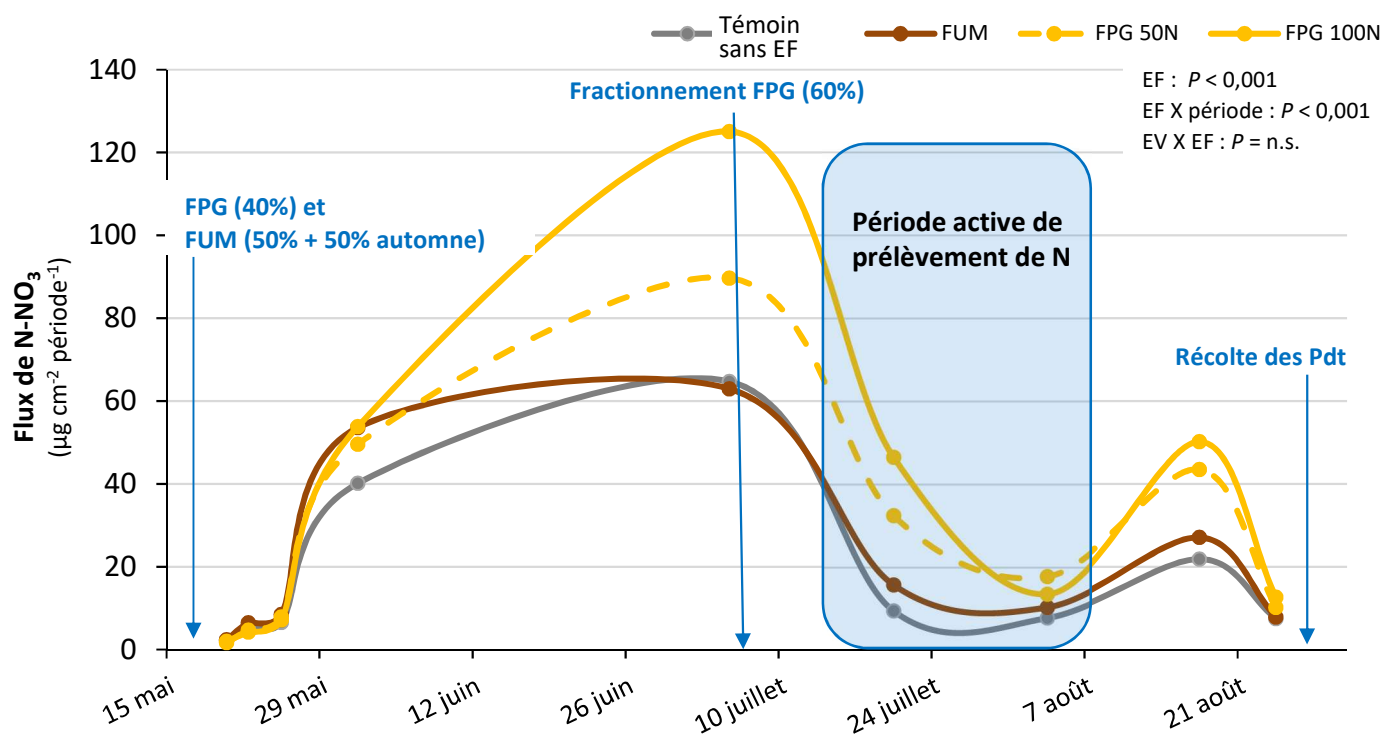


Figure 12. Flux de N-NO₃ des membranes d'échange ionique sur la saison 2017, selon la fertilisation par les engrais de ferme (tous engrais verts confondus).

Les charges de nitrate découlant d'analyses standards de sol (Tableau 8) effectuées au pic des flux de N-NO₃ (4 juillet) corroborent les courbes de N-NO₃ des MEI (Figure 12). Elles indiquent elles aussi qu'il n'y a pas d'interaction EV x EF. De plus, elles montrent que les sols fertilisés avec les FPG contenaient ($P < 0,001$) près de 40 % plus de nitrate (+36 kg N-NO₃ ha⁻¹) que les sols fertilisés avec le FUM et ceux du témoin sans EF, dont les charges étaient équivalentes. Au 27 juillet, les charges disponibles de N dans le sol étaient au global deux fois moins importantes, à l'image des flux mesurés à cette période (Figure 12) et seul les charges de N-NO₃ dans les sols ayant reçu la dose de FPG 100N étaient toujours supérieures à celles des autres traitements d'EF (Tableau 8; effet EF : $P = 0,002$), soit près de 2x plus élevées (+25 kg N-NO₃ ha⁻¹). Il est à noter que seul le FUM a augmenté les contenus du sol en P_{eau} en saison (Tableau 9; effet EF : $P = 0,021$ et $0,004$). Les teneurs en P_{eau} des sols avec FUM étaient de 18 et 27 % plus élevées que celles des sols des autres EF, le 4 et 27 juillet, respectivement. En ce qui a trait aux EV, ces analyses ponctuelles n'ont pas révélé de différence significative au niveau des charges en N-NO₃ et P_{eau}, malgré des intensités en N-NO₃ de MEI différentes entre les EV à ces mêmes dates. Il est toutefois reconnu que les MEI sont davantage sensibles aux différences de disponibilité puisqu'elles captent les ions dans les conditions réelles de champs, ce qui n'est pas le cas pour les extractions en laboratoire. Cela dit, les différences en N disponible mesurées sur les MEI pour les EV ne se sont pas reflétées significativement sur les prélèvements en N, contrairement aux différences produites par les EF. Ainsi, au 27 juillet, soit un mois avant la récolte, les plants ayant reçu 100N sous forme de FPG avaient prélevé au total (fanes + tubercules) 32 kg N ha⁻¹ de plus qu'avec les autres EF, dont les prélèvements étaient non différents entre eux (Figure 13 : $P = 0,001$).

Tableau 8. Contenus du sol en N disponibles (kg ha^{-1}) pendant la croissance des pommes de terre en fonction des engrais de ferme (tous engrais verts confondus).

	4 juillet (pré-fract.)	27 juillet (prélèvement max.)
Témoin sans EF	57 b	23 b
FUM	69 b	27 b
FPG 50N	96 a	35 b
FPG 100N	102 a	53 a
Valeurs de P effet EF	< 0,001	0,002

À chacune des périodes: EV : $P = n.s.$ et EF X EV : $P = n.s.$ Les valeurs avec des lettres distinctes sont significativement différentes au seuil $P < 0,1$.

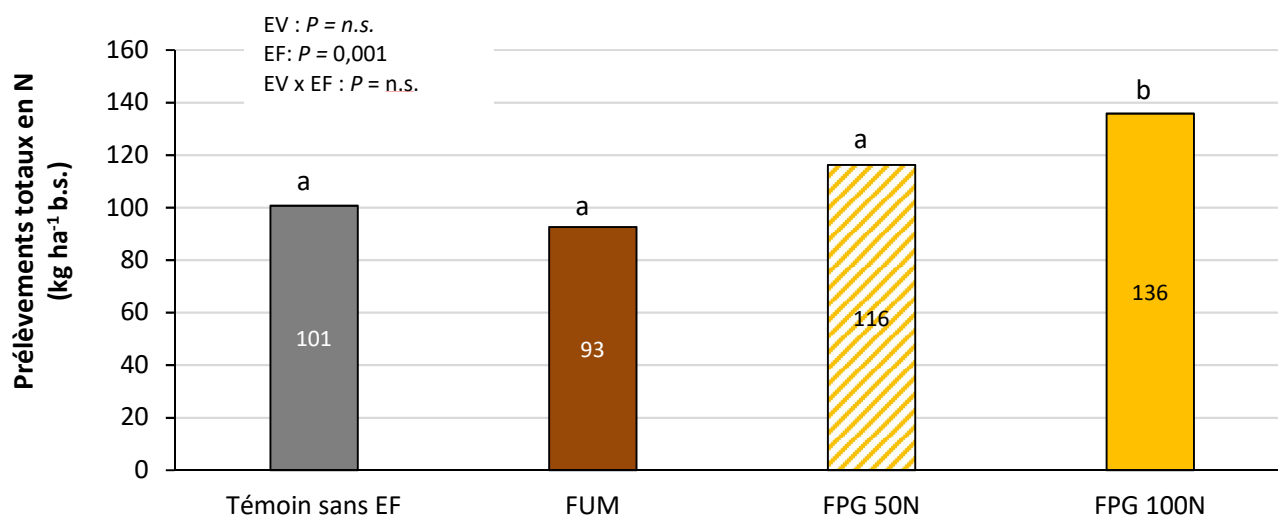


Figure 13. Prélèvements en N_{total} (fanés + tubercules) des pommes de terre en fonction des engrais de ferme au pic de croissance, le 27 juillet 2017, (tous engrais verts confondus).

Tableau 9. Charge du sol en P_{eau} (mg L^{-1}) pendant la croissance des pommes de terre en fonction des engrais de ferme (tous engrais verts confondus).

	4 juillet	27 juillet
Témoin sans EF	7,6 b	7,4 b
FUM	8,6 a	9,3 a
FPG 50N	7,1 b	7,2 b
FPG 100N	7,1 b	7,4 b
Valeurs de P effet EF	0,021	0,004

À chacune des périodes: EV : $P = \text{ns}$ et EF X EV : $P = \text{ns}$

Les valeurs avec des lettres distinctes sont significativement différentes au seuil $P < 0,1$.

Au final, tous EV confondus, les FPG 100N et dans une moindre mesure les FPG 50N ont donné à $P = 0,13$ davantage de rendements que le FUM, avec 33 et 32 T ha^{-1} respectivement, contre 30 T ha^{-1} pour le FUM (Figure 14). Le fait que le sol à l'étude s'est avéré productif même en absence d'engrais fait en sorte qu'il est probablement plus difficile de voir des différences que dans un sol plus dépendant des engrais. Cela indique aussi que les FPG sont très performantes pour engendrer des différences mesurables sous ces conditions. Il faut aussi considérer que la meilleure performance des FPG s'appuie sur un apport de N total de 142 $\text{kg N}_{\text{total}} \text{ha}^{-1}$, ce qui est 2,3x moins que l'apport de 325 $\text{kg N}_{\text{total}} \text{ha}^{-1}$ du FUM. Cela démontre aussi l'importance de bien synchroniser les apports d'EF avec les besoins de la culture tout en prenant en compte leur nature. En effet, le fait de fractionner les FPG, un EF rapidement minéralisé, juste avant une période active de prélèvements en N par la culture, a certainement contribué à la meilleure performance des FPG.

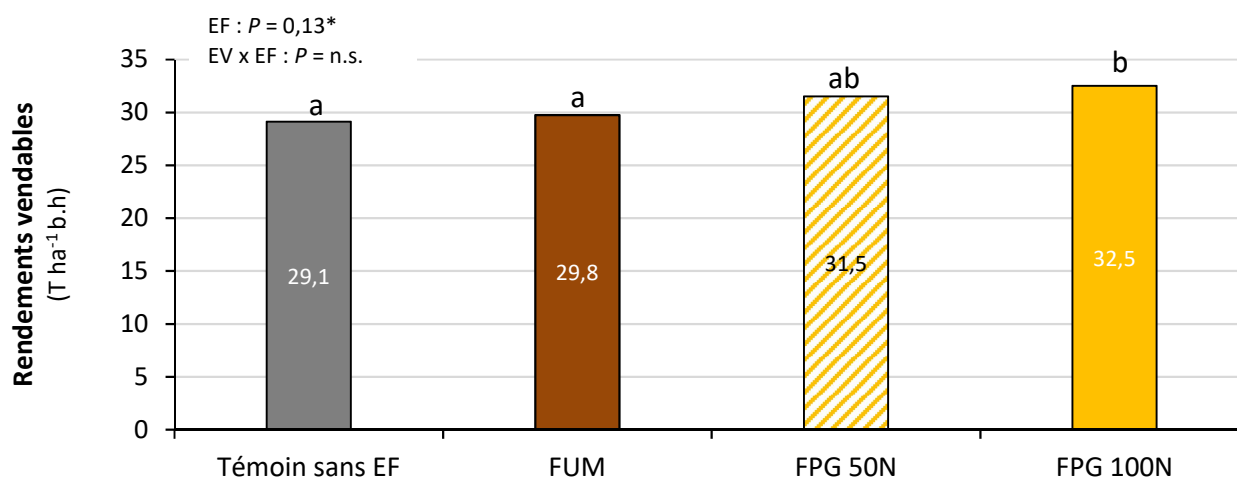


Figure 14. Rendement en tubercules vendables en fonction des engrais de ferme, le 29 août 2017, tous engrais verts confondus. Les valeurs avec des lettres distinctes sont significativement différentes au seuil $P < 0,1$.

Les exportations en N par les tubercules, calculées sur le rendement total, viennent appuyer les différences observées entre les rendements vendables. Les sols ayant reçu la fertilisation avec FPG, à la pleine dose ou à dose réduite, ont soutenu des exportations en N significativement plus importantes que ceux fertilisés avec le FUM ou ceux du témoin sans EF (Figure 15; $P < 0,001$). Ceci était vrai même si les doses de FPG 100N et 50N apportaient respectivement 2,3 et 3,6 fois moins de N_{total} que l'apport de FUM (Tableau 5). Avec son apport de $142 \text{ kg } N_{\text{total}} \text{ ha}^{-1}$, la fertilisation FPG 100N apporte une quantité de N au total qui se rapproche des exportations, toutes proportions gardées, comparativement au FUM. La dose FPG 50N est cependant inférieure aux exportations. L'effet à long terme de l'usage répété de cette dose serait à évaluer afin d'éviter une baisse de la capacité de fourniture en N du sol. Bien complétement par un EV apportant dans les $50 \text{ kg } N_{\text{total}} \text{ ha}^{-1}$, cette pratique pourrait toutefois peut-être être adéquate à long terme. Quant aux EV, ceux-ci n'ont pas eu d'effet significatif sur les exportations en N par les tubercules.

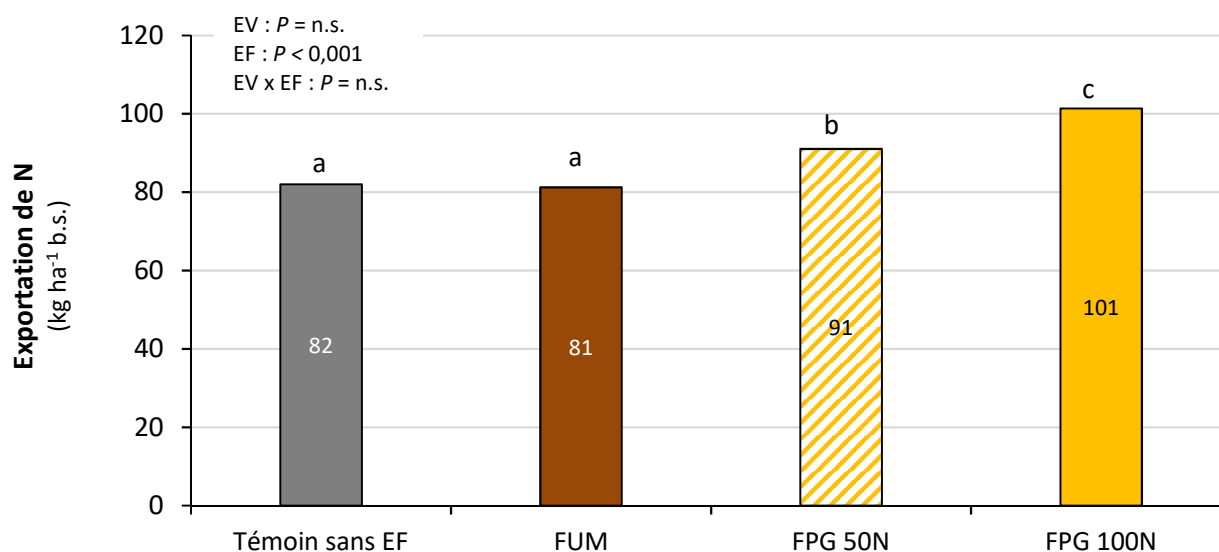


Figure 15. Exportations totales en azote (N) par les tubercules en fonction des engrais de ferme au 29 août 2017, tous engrais verts confondus. Les valeurs avec des lettres distinctes sont significativement différentes au seuil $P < 0,1$.

Dans le cas de la Pdt, il est véhiculé que certains EV de légumineuses favoriseraient des maladies, telle la gale commune dans le cas du trèfle ou la verticilliose avec la vesce velue (Grubinger 2005). Dans le guide « Organic Production Guide for Potatoes » de l'Université Cornell (NY) » (Seamen 2015), il est mentionné que les EV de légumineuses sont le meilleur choix pour les cultures exigeantes en N, mais que dans le cas de la Pdt, il faut porter une attention spéciale à évaluer la présence de maladies racinaires causées par les champignons pathogènes (rhizoctonie, *Pythium*) ou les nématodes dans ces champs puisque les EV de légumineuses sont des plantes hôtes de ces maladies et peuvent donc les augmenter. Cependant, dans cette étude, aucun effet significatif des différentes régies sur les maladies telles que la gale et la rhizoctonie n'a été mesuré. Les Pdt présentaient toutefois, toutes régies confondues, plusieurs dommages de types nécroses infligés par les rhizomes de chiendent

encore présents dans les sous-parcelles (Figure 16). Le contrôle de cette MH dans ce cas particulier serait donc primordial pour s'assurer d'une production avec un haut niveau de qualité des tubercules. Les Pdt déclassées majoritairement pour cette raison représentait quand même 5 T ha⁻¹ de tous les tubercules produits.



Figure 16. Exemple d'un tubercule affecté par un rhizome de chiendent.

Au niveau des exportations de K, même si cela n'a pas influencé les rendements vendables, les EV et EF les plus riches en cet élément ont significativement augmenté les exportations par les tubercules (Figure 17 ; effet EV : $P = 0,0063$ et effet EF : $P < 0,0001$). En effet, l'avoine et le FUM ont produit en moyenne des exportations en K de 10 et 11 % plus élevées, respectivement, que les autres traitements. Seul fait surprenant, le ray-grass, l'EV qui apportait le plus de K à l'hectare avec 164 kg ha⁻¹, contre en moyenne 89 kg ha⁻¹ pour les avoines, n'a pas favorisé des exportations en K supérieures aux légumineuses qui apportaient 63 et 78 kg K ha⁻¹ pour le trèfle et la vesce, respectivement. Sur la base de ces résultats, il est probable que l'efficacité fertilisante du K du ray-grass soit beaucoup plus basse que celle du K de l'avoine, bien que davantage de données seront nécessaire pour expliquer et confirmer ce résultat.

Au global, les résultats de cette étude vont dans le même sens que les conclusions d'une méta-analyse portant sur les rendements de 220 champs en production bio de Pdt en Allemagne et qui a permis de dégager trois catégories de potentiel de rendement qui concordent avec les meilleurs flux de nitrate trouvés pour les EV de légumineuses et la dose de FPG 100N : 1) bas (EV de céréales + EF au taux maximal de 40 kg N ha⁻¹), 2) moyen (EV de céréales/pois + EF au taux entre 40 et 100 kg N ha⁻¹) et 3) élevé (EV de céréales/trèfle + EF au taux de plus de 100 kg N ha⁻¹). Pour les catégories bas et élevé, les potentiels de rendements étaient respectivement de 20-25 T ha⁻¹ et 30-40 T ha⁻¹, démontrant l'intérêt des EV de légumineuses et du mélange céréale/trèfle (Lynch et coll., 2008b, Möller et Reents, 2007).

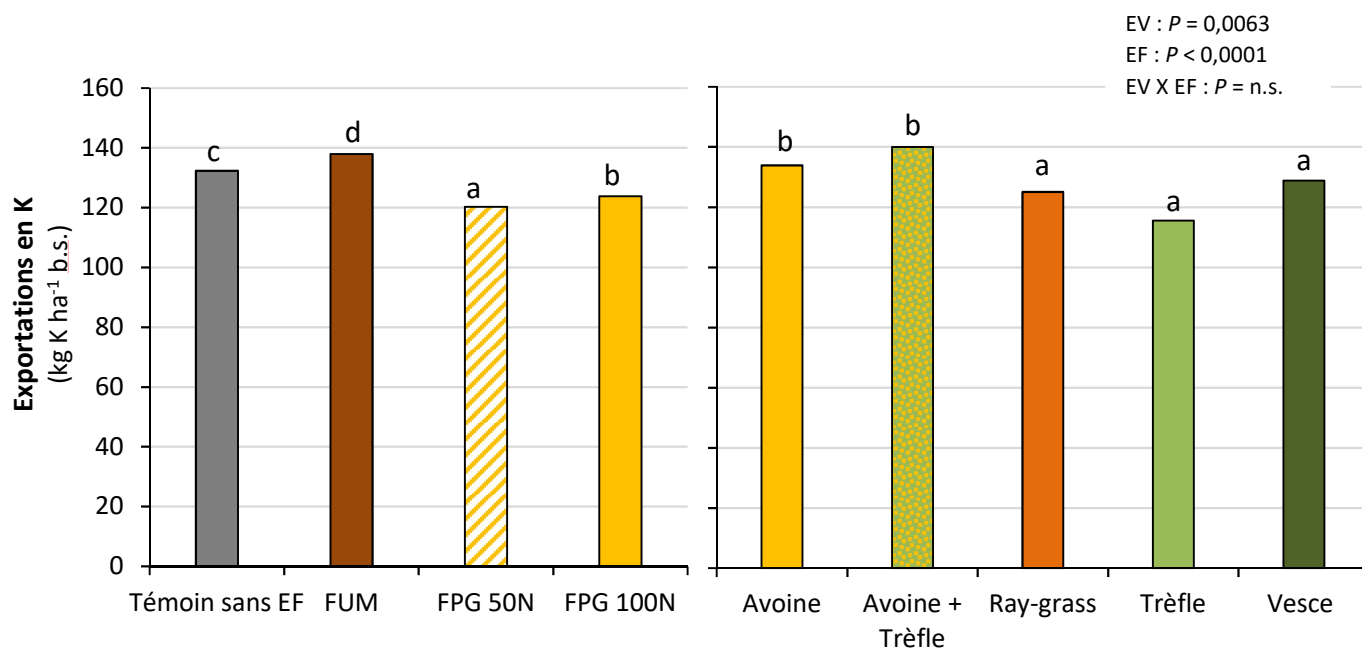


Figure 17. Exportations totales en potassium (K) par les tubercules en fonction des engrais de ferme le 29 août 2017, tous engrais verts confondus (gauche) ou des engrais verts, tous engrais de ferme confondus (droite). Les valeurs avec des lettres distinctes sont significativement différentes au seuil $P < 0,1$.

3.3.3 Nitrate résiduel post-récolte

Après la récolte de la Pdt, avant les semis de blé d'automne, seul le traitement d'EF avec les FPG à la plus forte dose (100N) présentait encore des charges résiduelles de $N-NO_3$ supérieures aux autres EF (Figure 18). Toutefois, bien que statistiquement significative, cette différence n'est pas majeure avec en moyenne $5 \text{ kg } N-NO_3 \text{ ha}^{-1}$ de plus. Puisque que dans la rotation étudiée, du blé d'automne a été semé après cette date, cette charge résiduelle n'est pas négative environnementalement. En fait, de ce point de vu, une quantité de $24 \text{ kg } N-NO_3 \text{ ha}^{-1}$ est intéressante puisque le blé a des besoins élevés en N, comparativement à d'autres céréales (CRAAQ 2010), surtout considérant que les incubations réalisées avec les sols post-récolte sur 10 jours indiquent que le sol était encore en mesure de fournir seulement $16 \text{ kg } N-NO_3 \text{ ha}^{-1}$ au maximum (Figure 19: aucun effet EV ou EF). Par ailleurs, les incubations ont aussi une nouvelle fois démontré la synergie se produisant dans les sols lorsqu'un EV est combiné à des EF plus résistants à la minéralisation, tel le FUM (Landry et coll. 2018). En effet, les sols fertilisés au FUM tendaient à montrer de plus grandes fournitures en N sauf dans les sous-parcelles avec avoine où le sol avec FUM avait au contraire la capacité la moins importante de libération de $N-NO_3$ (Figure 19 ; effet EV X EF : $P = 0,022$). Cette performance du FUM en fin de saison, en comparaison des FPG, appuie aussi les résultats précédents suggérant que la fourniture en N du FUM tarde à se produire et que celui-ci présente un potentiel intéressant une fois les besoins de la culture de pleine saison passés. Il pourrait cependant être un choix justifié pour soutenir une culture d'automne, appliqué à des taux ajustés en conséquence. Ce n'est toutefois pas ce qui a été mesuré dans cet essai (voir section 3.4).

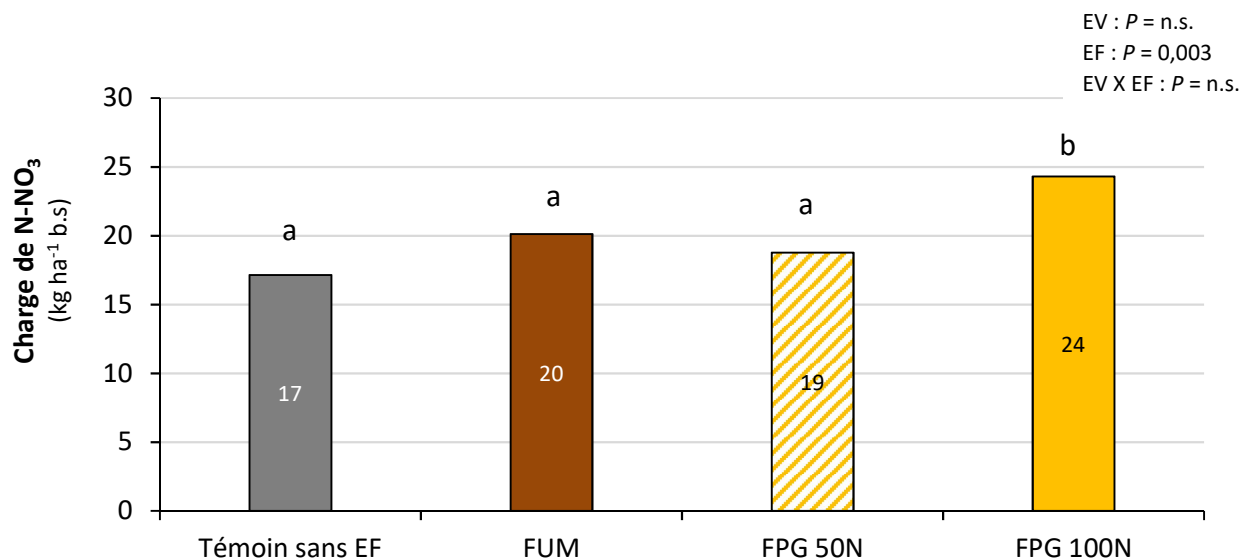


Figure 18. Charge résiduelle en N-NO₃ après la récolte des pommes de terre le 1^{er} septembre 2017. Les valeurs avec des lettres distinctes sont significativement différentes au seuil P < 0,1.

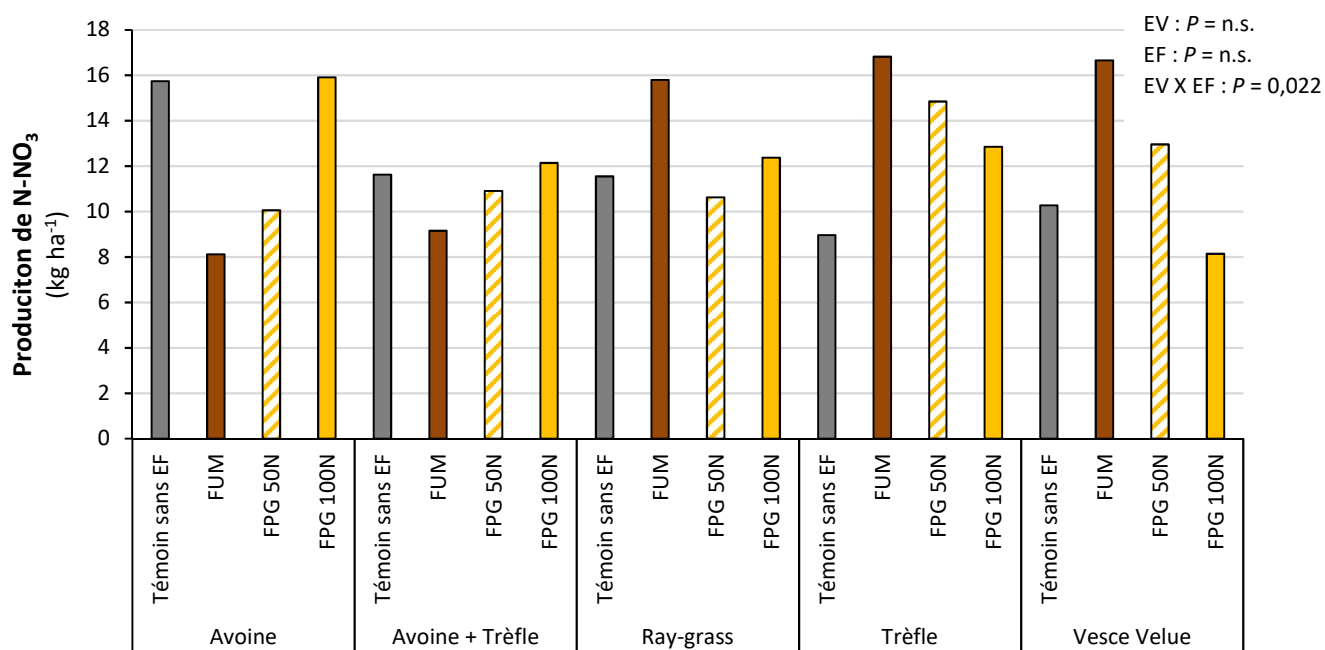


Figure 19. Libération de N-NO₃ après 10 jours d'incubation des sols en fonctions des engrais verts et des engrais ferme le 1^{er} septembre 2017.

3.4 BLÉ D'AUTOMNE (2017-2018)

En 2018, aucun apport d'engrais additionnel à ceux de 2016 et 2017 n'a été réalisé, de sorte qu'il est possible d'évaluer les arrières-effets des différentes régies d'EV et d'EF sur la croissance et les rendements du blé d'automne. Globalement, les rendements ont été très bons, en moyenne $3,1 \text{ T ha}^{-1}$, soit supérieurs à ceux obtenus ailleurs en Chaudière-Appalaches en 2018 (bio et conventionnel confondus), qui étaient de $2,87 \text{ T ha}^{-1}$ selon l'ISQ (2018). Cette bonne performance repose toutefois en partie sur le fait que, pour les besoins de l'étude, des sous-parcelles du dispositif ont été abandonnées à cause d'une trop forte mortalité hivernale (Figure 20), une situation fréquente chez d'autres producteurs à cause d'un printemps frais et pluvieux (Giroux, comm. personnelle).

Les analyses statistiques indiquent que seul les EV ont eu un arrière-effet sur les rendements de blé 2018 ($P = 0,07$) (Figure 21). Ainsi, malgré une différence attendue pour le FUM et le FPG 100N sur la base du nitrate résiduel et de l'incubation de sol de 2017, ces engrais n'ont pas produit de bénéfice significatif sur les rendements en grains du blé la saison suivante. De plus, parmi les EV, seule la vesce a eu un impact. Ainsi, dans les parcelles avec vesce, les plants de blé ont produit 12 % plus de rendement en grains que ceux fertilisés avec les autres engrais. Cet effet de la vesce se manifeste deux ans après avoir été incorporée. Ceci pourrait paraître inattendu. Toutefois, un résultat similaire a été mesuré par Landry et coll. (2018) dans un tout autre contexte. En effet, dans un essai de régie de fertilisation bio d'une rotation blé / maïs-grain / soya (2015-2017) en Montérégie, un EV de pois fourrager semé à la dérobé du blé a démontré deux ans après son incorporation (automne 2015) un arrière-effet positif significatif sur la croissance du soya (2017), alors que les EF appliqués en automne 2015 ou l'année précédente au (au printemps ou en saison 2016) et apportant beaucoup plus de N total n'avaient eu aucun bénéfice. L'impact des EV à moyen long terme semble donc beaucoup plus significatif et bénéfique que présumé. Davantage de données permettront d'expliquer cet avantage.

En ce qui a trait à la production de biomasse de pailles, tant les EV ($P = 0,0017$) que les EF ($P = 0,0421$) ont présenté un arrière-effet sur la biomasse produite à la récolte, sans interaction. En appuie avec les résultats précédents, c'est la vesce qui a produit le plus de pailles (+ 17 %), en comparaison des autres EV, tous EF confondus (Figure 22). La vesce permet donc des revenus doublement bonifiés si la paille est vendue, en plus du grain. Pour les EF, tous EV confondus, les fertilisations FUM et FPG 100N ont produits les mêmes biomasses, 13 % plus élevées que celles du témoin ON (Figure 23). Autrement, les charges résiduelles de N disponible étaient similaires dans toutes les sous-parcelles après la récolte du blé (Effet EV et EF : $P = \text{n.s.}$) et de l'ordre de $19 \text{ kg N-NO}_3 \text{ ha}^{-1}$ (données non montrées). De la même façon, à la suite d'une incubation des sols de 10 jours, toutes les sous-parcelles présentaient la même capacité de fourniture en N, ce qui démontre qu'il n'y avait plus de différence entre les régies sur la fertilité azotée du sol, les prélèvements du blé ayant probablement contribué à homogénéiser les sols en termes de reliquats de N disponible. De la même façon, les EV, tout comme les EF, n'ont pas influencé de façon significative les contenus en P_{eau} à la fin de l'essai, ceux-ci étant tous similaires et de l'ordre de 4 mg L^{-1} . Bien qu'il ait été remarqué que le traitement FUM avaient augmenté significativement les contenus en P_{eau} en mi-saison lors de l'année pomme de terre (2017), ceci ne s'est pas prolongé au-delà des deux années de la rotation (section 3.3.2).



Figure 20. Apparence contrastée des sous-parcelles après la reprise du blé d'automne le 30 mai 2018.

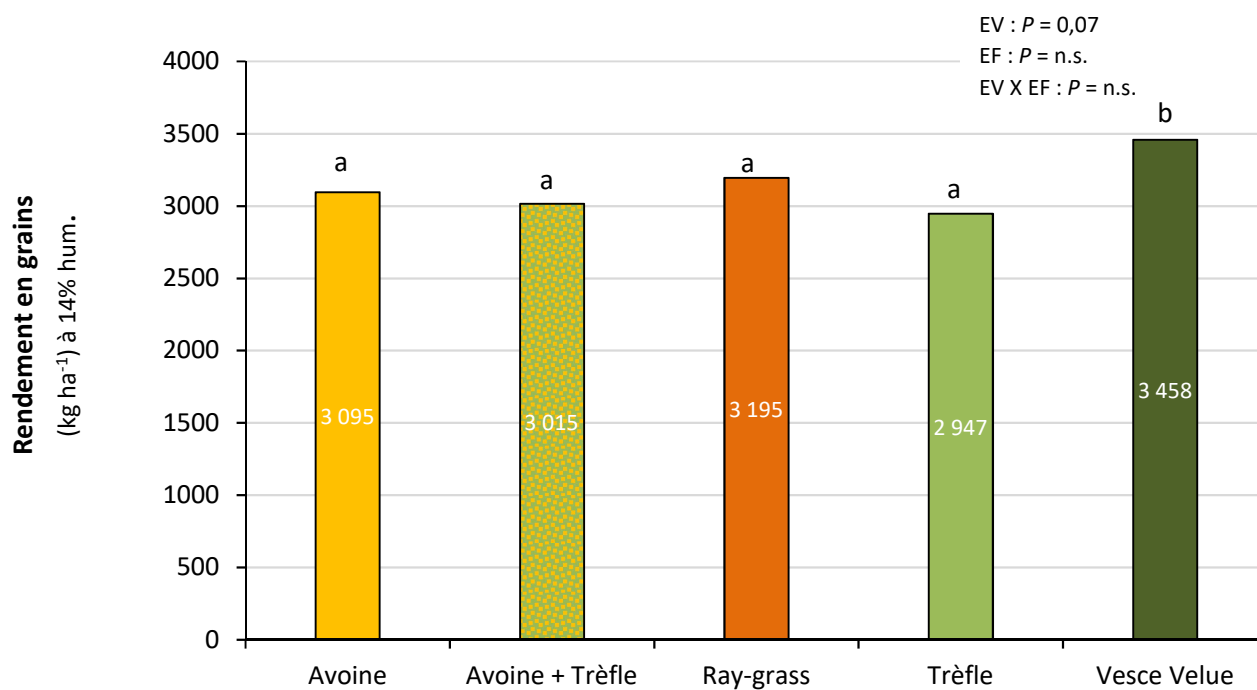


Figure 21. Rendement en grains de blé, le 6 août 2018, tous engrais de ferme confondus. Les valeurs avec des lettres distinctes sont significativement différentes au seuil $P < 0,1$.

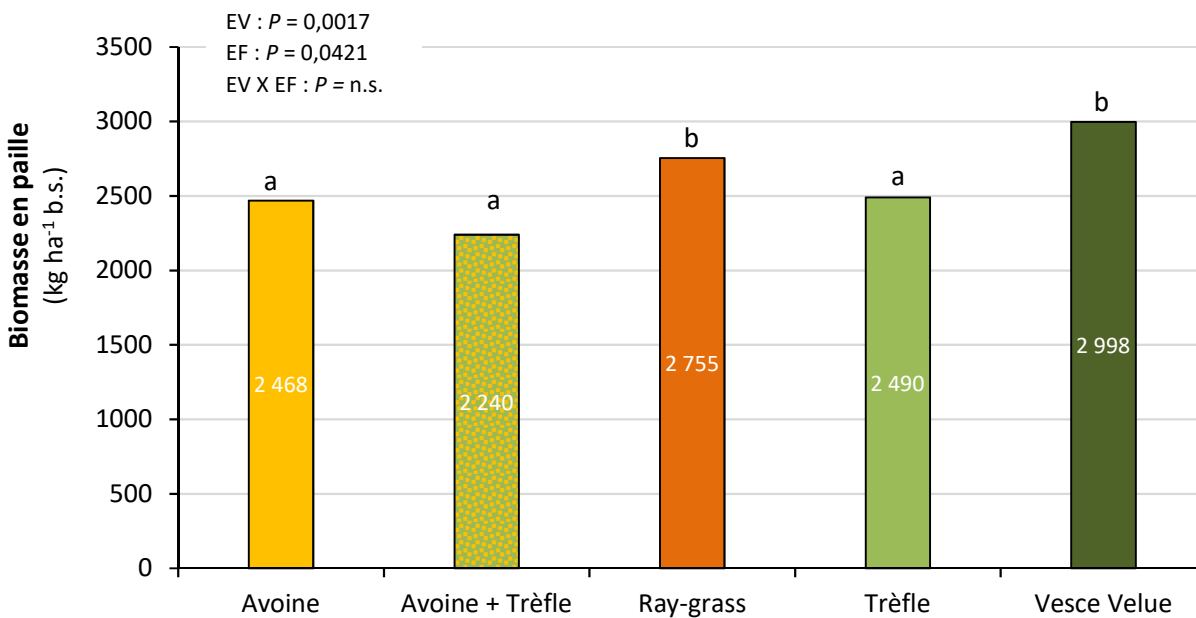


Figure 22. Biomasse en paille de blé, le 6 août 2018, tous engrais verts confondus. Les valeurs avec des lettres distinctes sont significativement différentes au seuil $P < 0,1$.

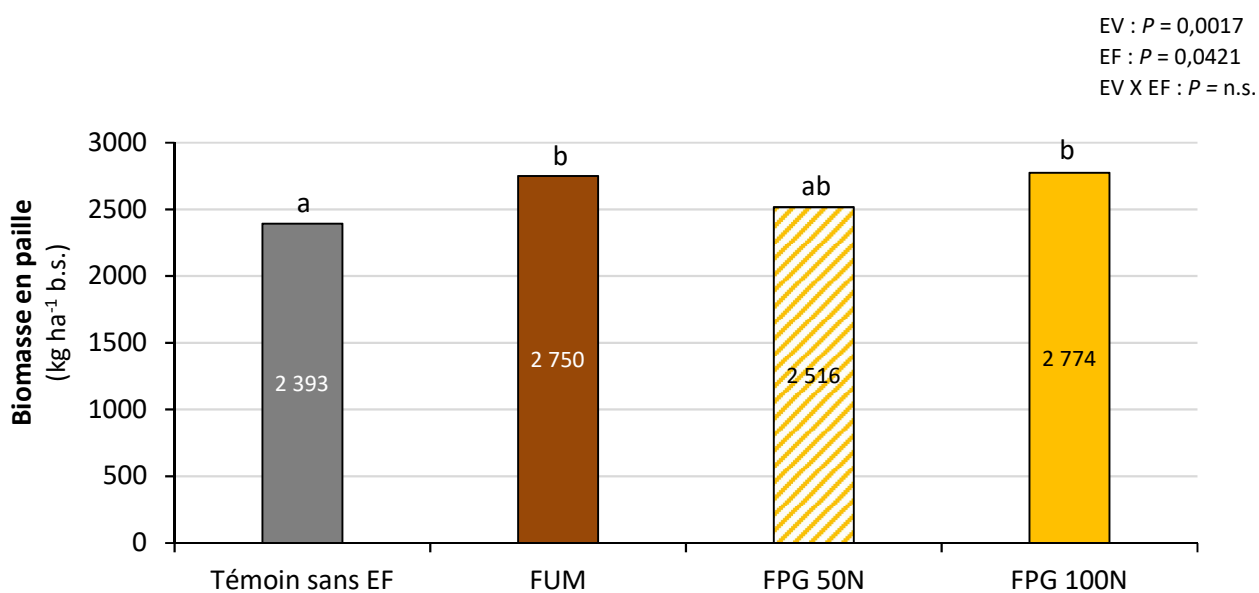


Figure 23. Biomasse en paille de blé, le 6 août 2018, tous engrais de ferme confondus. Les valeurs avec des lettres distinctes sont significativement différentes au seuil $P < 0,1$.

3.5 IMPACTS DE LA ROTATION

3.5.1 Activité biologique du sol

L'impact de la fertilisation sur les indicateurs d'activité biologique des sols a été faible pour les deux années de suivi (stade pic de croissance de la Pdt 2017 et stade épiaison du blé 2018) (Tableau 10). Cela était attendu pour l'année de blé, mais un plus grand impact était anticipé en 2017, à tout le moins pour les EF, dont c'était l'année d'application. Par exemple, l'apport de la 2^e dose de FPG par fractionnement le 5 juillet venait d'avoir lieu juste avant la prise des sols du 27 juillet. Ainsi, pour le taux respiratoire, seule une légère tendance a été mesurée lors de l'incubation de sol de 10 jours en 2017. Les sols ayant reçu le FUM dégageaient plus de CO₂ que le sol témoin sans EF ($P = 0,1127$), tous EV confondus, les sols avec FPG présentant des valeurs intermédiaires. En 2018, tous les sols présentaient une valeur moyenne similaire de 0,38 mg CO₂ g sol⁻¹ (données non montrées). Pour ce qui est du C_{eau} (carbone labile), aucune différence n'a été mesurée en 2017 avec une valeur moyenne de 179 mg C g sol⁻¹ et en 2018, moyenne de 163 C g sol⁻¹ (données non montrées). Enfin, au niveau de l'activité de l'uréase, impliquée dans la minéralisation du N organique en nitrate, aucun impact ni des EV, ni des EF n'a été mesuré en 2017. Les sols ont présenté des valeurs moyenne d'activité uréase en 2017 de 103,4 µg N-NH₄ g⁻¹ (b.s.). Toutefois, en 2018, les apports de EF ont influencé l'activité de l'uréase ($P = 0,0287$) et il y avait aussi interaction entre les EV et les EF ($P = 0,0489$) (Tableau 10). Ainsi, le type d'EF avait un impact sur l'activité de l'uréase dans les parcelles avec EV de graminées (avoine seule, avoine + trèfle, ray-grass), mais beaucoup moins dans celles d'EV de légumineuses (données non montrées).

Tableau 10. Valeurs de P de l'impact des engrais verts (EV) et des engrais de ferme (EF) sur les indicateurs d'activité biologique du sol en 2017 (27 juillet) et 2018 (18 juillet).

Années	2017			2018		
	EV	EF	EV X EF	EV	EF	EV X EF
Paramètres (b.s.)						
C _{eau} (mg C g ⁻¹)	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Respiration CO ₂ (mg CO ₂ g ⁻¹)	n.s.	0,1127	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Uréase (µg N-NH ₄ g ⁻¹) ⁸	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0,0287	0,0489

* Enzyme impliquée dans la minéralisation du N organique en N minéral disponible.

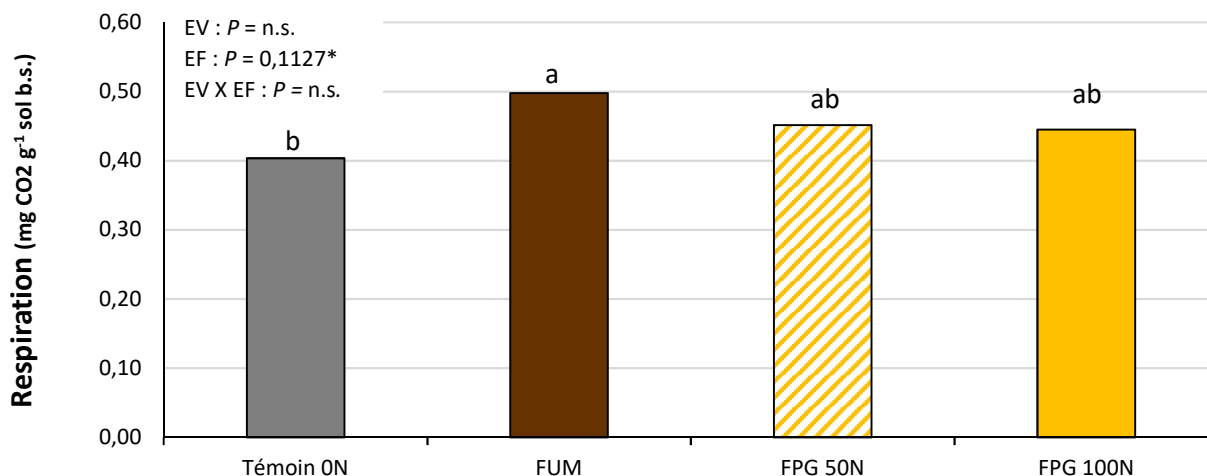


Figure 24. Taux respiratoire du sol, le 27 juillet 2017, tous engrais verts confondus. Les valeurs avec des lettres distinctes sont significativement différentes au seuil $P < 0,1$. Effet EF tendance à $P = 0,1127$.

3.5.2 Évolution des paramètres physico-chimiques

Les paramètres physiques du sol ont été peu affectés par les différentes régies de fertilisation à l'étude pendant les 3 ans de l'essai (Tableau 11). La masse volumique apparente (MVA) a varié d'une année à l'autre sans égard aux traitements probablement en lien avec les différents travaux de préparation de sol. Le diamètre moyen pondéré (DMP) mesuré par la méthode des agrégats stables à l'eau a semblé diminué entre le printemps 2016 et l'automne 2018. À la suite de la culture de la Pdt, alors que le sol est excessivement remanié pour former les buttes et pendant la récolte, il est probable que cela ait influencé la stabilité des agrégats l'année suivante en 2018. Le traitement FUM toutefois semble avoir favorisé le maintien d'un DMP supérieur. Ceci concorde avec sa plus forte proportion de C résistant et sa stabilité plus grande qui lui permet de perdurer plus longtemps dans les sols. Au contraire, les FPG sont souvent décrites comme étant « dures » pour les sols. Elles se dégradent rapidement et activent la déperdition de la MO du sol. Il est à noter cependant que cette différence n'est pas présente dans les sols ayant reçu de la vesce. Il semble donc possible de mitiger les effets des FPG avec une régie valorisant une bonne biomasse d'EV. Cette voie sera à explorer pour mieux cerner quel EV et la biomasse requise. En ce qui a trait à la macroporosité, une légère augmentation semble s'être installée entre 2016 et 2018 (Tableau 11).

Au niveau des paramètres chimiques du sol, le pH est demeuré stable et près de la neutralité pendant tout l'essai, tout comme le C_{total} et N_{total} (Tableau 12). Quant au P Mehlich-3 (MIII), des augmentations ponctuelles, surtout à partir des apports d'EF avec de plus fortes doses, FUM ou FPG 100N, peuvent être observées de 2017 à 2018, mais à la fin de l'essai (automne 2018) les contenus sont redevenus similaires avec toutes les régies. Le P_{eau} ne montrait aussi aucune différence en fin d'étude (données non montrées). Pour les contenus en K MIII, des différences significatives sont obtenues en 2018 et sont liées avec l'arrière-effet des apports de EF de 2017 (printemps 2018; effet EF : $P < 0,0001$ et automne 2018; effet EF : $P < 0,0033$). Au printemps 2018, c'est le FUM qui a haussé le plus les concentrations du sol en K MIII, suivi par le FPG 100N, avec des augmentations respectives de 42 % et de 20 %,

comparativement au témoin ON ou au FPG 50N. Un effet EV X EF à $P = 0,0214$ est également ressorti au printemps 2018 parce que le FUM a haussé les contenus en K MIII pour tous les EV, sauf dans la régie avec la vesce et que les FPG 100N ont aussi haussé les contenus en K MIII avec tous les EV, sauf dans les régies avec le ray-grass et le trèfle. Cependant, à la fin de l'essai en 2018, l'apport de FUM, qui remontait à l'automne 2016 (1^{ère} demi-dose) et le printemps 2017 (2^e demi-dose) haussaient encore très significativement les concentrations en K MIII du sol, alors que tous les autres EF et les EV ne créaient plus aucune hausse comparativement aux sols témoins (Tableau 12). Ainsi, les sols sans FUM avaient des teneurs en K qui n'étaient que de 59 % à 89 % de celles des sols avec FUM. Globalement, il pourrait donc être résumé que les EF appliqués à la pleine dose font augmenter le P MIII du sol. Dans cet essai, leur impact n'était plus significatif en automne 2018. Toutefois dans un contexte normal de production, des EF sont souvent appliqués à chaque année. Une hausse est donc à prévoir avec le temps. Pour le K MIII, ce constat est encore plus marqué. Le FUM a en effet un impact encore plus grand sur le K MIII que sur le P MIII. Ce fort effet du FUM sur le K MIII a déjà été mesuré dans un projet de fertilisation de la carotte bio en terres noires. Les fientes de volaille avait alors permis une hausse de 15 % des rendements totaux mais c'était le compost qui avait le plus grand impact avec une hausse de 33 % grâce à une meilleure disponibilité en K (Landry et coll., 2016). Étant donné l'importance des différences entre les teneurs en K MIII dans les sols avec FUM, non seulement avec le sol témoin ON, mais aussi avec les sols ayant reçu les autres EF, cet effet est à considérer sérieusement sur le long terme si des apports importants de FUM sont prévus régulièrement dans la régie de fertilisation.

ici

Tableau 11. Évolution des valeurs de masse volumique apparente (MVA), des agrégats stables à l'eau et de la macroporosité du sol en fonction des différentes régions pendant la rotation de 2016 à 2018.

Engrais verts	Engrais de ferme	MVA (g/cm ³)				Agrégat D.M.P. mm				Macroporosité 50 cm (g/cc)			
		Printemps 2016	Printemps 2017	Printemps 2018	Automne 2018	Printemps 2016	Printemps 2017	Printemps 2018	Automne 2018	Printemps 2016	Printemps 2017	Printemps 2018	Automne 2018
Avoine	Témoin sans EF	1,00	1,14	1,15	1,07	2,466	.	.	1,910	0,210	.	.	0,254
	FUM	1,00	1,14	1,15	1,07	2,466	.	.	2,050	0,210	.	.	0,240
	FPG 50N	1,00	1,14	1,15	1,07	.	.	.	.	.	.	.	.
	FPG 100N	1,00	1,14	1,15	1,07	2,466	.	.	1,893	0,210	.	.	0,240
Avoine + Trèfle	Témoin sans EF	1,00	1,14	1,15	1,07	.	.	.	.	.	.	.	.
	FUM	1,00	1,14	1,15	1,07	2,466	.	.	2,125	0,210	.	.	0,237
	FPG 50N	1,00	1,14	1,15	1,07	.	.	.	.	.	.	.	.
	FPG 100N	1,00	1,14	1,15	1,07	2,466	.	.	2,050	0,210	.	.	0,250
Ray-grass	Témoin sans EF	1,00	1,14	1,15	1,07	.	.	.	.	.	.	.	.
	FUM	1,00	1,14	1,15	1,07	2,466	.	.	2,190	0,210	.	.	0,236
	FPG 50N	1,00	1,14	1,15	1,07	.	.	.	.	.	.	.	.
	FPG 100N	1,00	1,14	1,15	1,07	2,466	.	.	1,990	0,210	.	.	0,258
Trèfle	Témoin sans EF	1,00	1,14	1,15	1,07	.	.	.	.	.	.	.	.
	FUM	1,00	1,14	1,15	1,07	2,466	.	.	2,153	0,210	.	.	0,223
	FPG 50N	1,00	1,14	1,15	1,07	.	.	.	.	.	.	.	.
	FPG 100N	1,00	1,14	1,15	1,07	2,466	.	.	1,860	0,210	.	.	0,213
Vesce Velue	Témoin sans EF	1,00	1,14	1,15	1,07	.	.	.	.	.	.	.	.
	FUM	1,00	1,14	1,15	1,07	2,466	.	.	1,950	0,210	.	.	0,267
	FPG 50N	1,00	1,14	1,15	1,07	.	.	.	.	.	.	.	.
	FPG 100N	1,00	1,14	1,15	1,07	2,466	.	.	2,177	0,210	.	.	0,233

Tableau 12. Prélèvements en N-P₂O₅-K₂O (kg ha⁻¹) lors des saisons de culture de la pomme de terre et du blé et évolution des contenus en P et K totaux du sol en fonction des différentes régies pendant la rotation de 2016 à 2018.

Engrais Verts	Engrais de ferme	Prélèvements totaux Pdt (kg ha ⁻¹)			Prélèvements totaux blé (kg ha ⁻¹)			P M III (mg kg ⁻¹)				K M III (mg kg ⁻¹)			
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Print. 2016	Print. 2017	Print. 2018	Aut. 2018	Print. 2016	Print. 2017	Print. 2018	Aut. 2018
Avoine	Témoin sans EF	116	52	279	51	32	30	96,5	91,7	92,1	88,5	92,7	98,2	71,8	109,4
	FUM	115	47	280	62	38	42	96,5	120,3	90,5	82,9	92,7	182,0	109,5	120,3
	FPG 50N	142	48	216	64	41	42	96,5	91,7	98,8	80,9	92,7	98,2	73,7	53,9
	FPG 100N	154	45	304	64	41	41	96,5	91,7	101,0	80,0	92,7	98,2	120,3	129,0
Avoine + Trèfle	Témoin sans EF	120	48	290	54	38	39	96,5	92,8	93,5	74,40	92,7	103,9	88,5	111,4
	FUM	116	52	280	64	42	36	96,5	82,0	90,4	82,6	92,7	117,4	117,8	116,6
	FPG 50N	132	49	242	55	37	35	96,5	92,8	94,5	93,9	92,7	104,0	74,4	96,2
	FPG 100N	139	48	262	61	38	41	96,5	92,8	92,0	73,1	92,7	104,0	107,3	132,2
Ray-grass	Témoin sans EF	125	52	250	61	39	35	96,5	88,6	83,2	73,7	92,7	84,8	77,4	91,9
	FUM	118	51	277	69	44	42	96,5	87,3	94,3	88,0	92,7	130,3	120,1	116,7
	FPG 50N	.	.	.	65	37	34	96,5	80,4	91,9	96,3	92,7	85,7	63,1	54,3
	FPG 100N	155	49	240	67	41	39	96,5	92,7	84,2	77,6	92,7	84,4	73,1	72,5
Trèfle	Témoin sans EF	109	43	223	54	34	34	96,5	85,2	91,5	84,6	92,7	78,6	81,4	91,9
	FUM	119	42	290	60	39	35	96,5	89,0	93,1	80,7	92,7	128,0	123,3	141,6
	FPG 50N	142	48	235	63	39	35	96,5	85,2	99,2	70,7	92,7	78,6	102,4	61,2
	FPG 100N	172	49	264	64	40	40	96,5	85,2	85,6	79,4	92,7	78,6	66,4	68,3
Vesce Velue	Témoin sans EF	135	49	251	68	44	41	96,5	89,9	86,1	68,1	92,7	79,4	79,9	86,5
	FUM	139	50	318	73	45	41	96,5	86,9	85,8	65,2	92,7	155,2	88,5	98,0
	FPG 50N	153	49	217	68	41	39	96,5	89,9	85,7	83,0	92,7	79,4	64,5	86,7
	FPG 100N	155	46	209	67	41	36	96,5	89,9	110,3	84,7	92,7	79,4	114,5	46,3

Recommandation Pdt : 150 N – 150 P₂O₅ – 160 K₂O

Recommandation blé : 90-120 N – 45 P₂O₅ – 60-75 K₂O

3.6 ANALYSE ÉCONOMIQUE

Les parcelles utilisant l'EV d'avoine + trèfle en intercalaire procurent en moyenne la meilleure performance économique (Figure 25) en termes de marge sur coût variable actualisée (MCVA) (vente des grains d'avoine et blé considérée mais pas de la paille) sur tout le cycle de production grâce à la vente du grain d'avoine. En effet, ce mélange d'EV offre en moyenne une marge sur coûts variables qui est supérieure de 5 % à la marge des essais témoins (avoine seule). La moyenne de la MCVA du témoin est établie à 31 648 \$ ha⁻¹ pour le cycle de production. La 2^{ème} meilleure performance économique revient aux essais de vesce velue (Figure 25), leur MCVA est supérieure de 2 % à la MCVA des essais témoins. En particulier, lorsque cet EV est utilisé en combinaison d'une fertilisation de 50N en provenance du FPG (FPG 50N), sa performance est à son meilleur (tableau 13). Cela dit, l'EV le moins performant est le trèfle seul; sa marge ne représente que 88 % de la marge moyenne obtenue avec le témoin (figure 25) et sa performance est à son plus faible lorsqu'il est en combinaison avec le FPG 100N (Tableau 13).

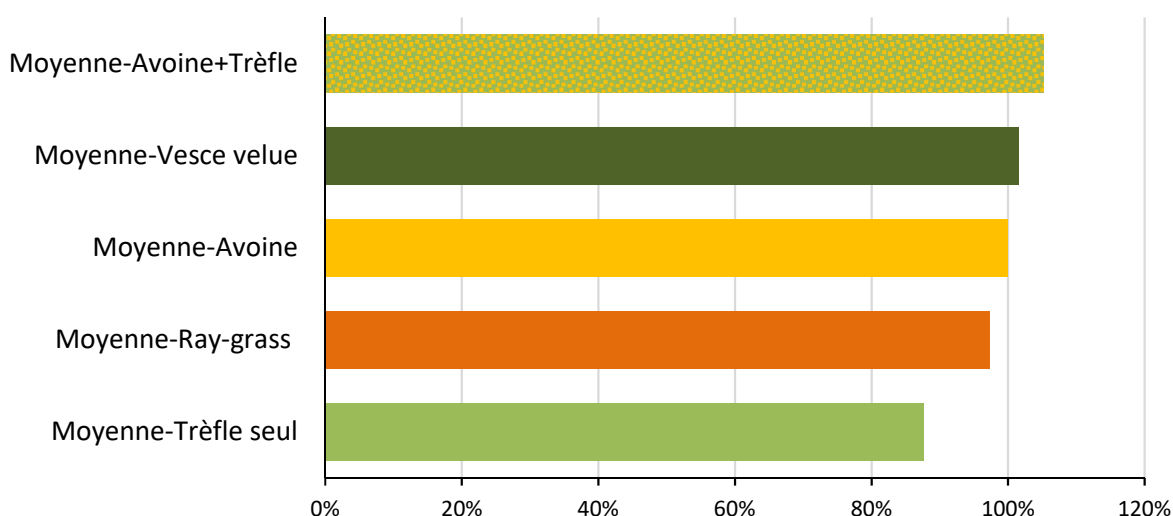


Figure 25. Marge sur coûts variables actualisée obtenue avec chaque engrais vert relativement à la MCVA obtenue avec l'avoine

En ce qui concerne les EF, les sous-parcelles fertilisées avec les FPG 100N offre en moyenne une marge sur coûts variables (MCV) supérieure de 9 % à la marge moyenne des essais sans EF (Figure 26). La MCVA moyenne des essais témoins est de 30 112 \$ ha⁻¹. L'option la moins rentable serait de fertiliser avec le FUM. Cette option s'avère moins rentable économiquement mais également environnementalement puisque les contenus du sol en P_{eau} l'année de la Pdt et ceux de K MIII à la fin de la rotation ont été significativement affectés à la hausse par les apports de FUM, sans gains sur les rendements. La marge sur coûts variables moyenne associée à ce mode de fertilisation est très similaire à celle des essais sans engrais de ferme (Tableau 14). Toutefois, il faut préciser que ce résultat moyen relatif au FUM est en grande partie « tiré vers le bas » par le résultat associé à sa combinaison avec l'EV de trèfle. Ceci s'explique par le fait que les essais en combinaison trèfle-FPG 100N ont généré le revenu le plus faible en pommes de terre (un revenu inférieur de près de 2 000 \$ ha⁻¹ par rapport au revenu des essais en trèfle sans EF alors que la fertilisation avec le FUM est la 2^{ème} plus coûteuse; ce qui implique qu'elle génère la

MCVA la plus faible pour 2017. Or sa MCVA de 2016 et celle de 2018 ne sont pas assez bonnes pour compenser ce gap.

Tableau 13. Marge sur coûts variables actualisée selon l'engrais vert

Engrais verts à l'essai	Traitements	MCVA relative au témoin (%)
Avoine	Moyenne-Avoine	100
	Témoin sans EF	103
	FUM	90
	FPG 50N	101
	FPG 100N	107
Avoine + trèfle	Moyenne-Avoine + Trèfle	105
	Témoin sans EF	93
	FUM	106
	FPG 50N	110
	FPG 100N	112
Ray-grass	Moyenne-raygrass	97
	Témoin sans EF	93
	FUM	98
	FPG 50N	91
	FPG 100N	108
Trèfle	Moyenne-Trèfle	88
	Témoin sans EF	86
	FUM	79
	FPG 50N	91
	FPG 100N	96
Vesce	Moyenne-Vesce	102
	Témoin sans EF	101
	FUM	100
	FPG 50N	106
	FPG 100N	99
Moyenne générale		98

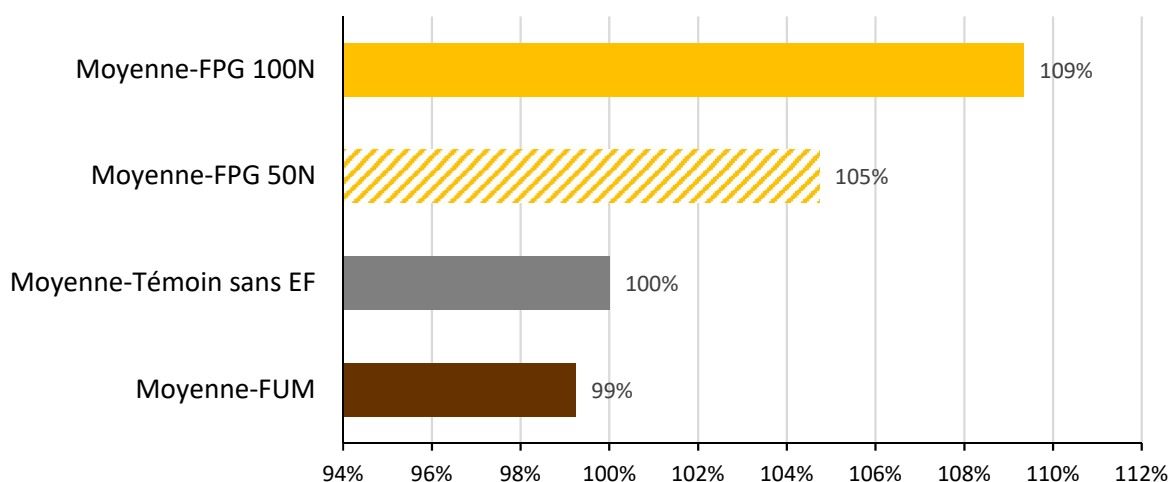


Figure 26. Marge sur coûts variables actualisée obtenue avec chaque engrais de ferme relativement à la MCVA obtenue sans engrais de ferme.

Tableau 14. Marge sur coûts variables actualisée selon l'engrais de ferme

Engrais de ferme à l'essai	Traitements	MCVA relative au témoin (%)
Témoin sans EF	Moyenne - Témoin sans EF	100
	Avoine	108
	Avoine + Trèfle	97
	Ray-grass	98
	Trèfle	90
	Vesce	107
FUM	Moyenne - FUM	99
	Avoine	94
	Avoine + Trèfle	112
	Ray-grass	103
	Trèfle	83
	Vesce	105
FPG 50N	Moyenne - FPG 50N	105
	Avoine	106
	Avoine + trèfle	116
	Ray-grass	95
	Trèfle	95
	Vesce	111
FPG 100N	Moyenne - FPG 100N	109
	Avoine	112
	Avoine + trèfle	117
	Ray-grass	113
	Trèfle	100
	Vesce	104
Moyenne générale		103

Concernant le choix des EV, les résultats économiques des différents essais relatifs aux essais du témoin (avoine) ne se démarquent pas substantiellement. En effet, les valeurs sont très proches. La MCV moyenne des essais de vesce velue est très similaire à celle des essais d'avoine + trèfle pour 2017 et 2018. Les essais d'avoine + trèfle donne la meilleure MCV pour le cycle de production car l'année des EV (2016), les essais de vesce velue ont eu une marge négative (coûts d'implantation de la vesce velue et aucun revenu de vente) alors que les essais d'avoine + trèfle avait une marge de 853\$ ha⁻¹ (due à la vente des grains d'avoine). On comprend donc que la performance économique de cet EV est attribuable à la vente des grains d'avoine. Pour les EF, les essais FPG 100N affiche en moyenne la meilleure rentabilité économique malgré le fait qu'ils génèrent les coûts de fertilisation organique les plus élevés. En effet, les essais de FPG 100N ont généré les meilleurs revenus pour la production de Pdt. Ces gains de revenus compensent aisément leur coût de fertilisation élevé et leur a permis d'avoir la meilleure MCV pour l'année de la pomme de terre. Enfin, pour le cycle de production il semble plus rentable d'avoir le mélange avoine et trèfle (blanc et rouge) comme EV, (sachant que les grains d'avoine se commercialisent et que le bénéfice serait encore plus grand si la paille est vendue aussi), puis de fertiliser avec les FPG 100N. Toutefois, si les grains d'avoine ne se commercialisaient pas, la meilleure option économique aurait été d'avoir la vesce velue comme EV.

4 CONCLUSION

Ce projet testant diverses régies de fertilisation azotée (N) d'engrais vert (EV) (ray-grass, trèfle, vesce) et de ferme (EF) (fientes de poules en granules (FPG), fumier de bovin composté (FUM)) dans la pomme de terre (Pdt) biologique (bio) met en lumière des différences importantes en termes de lutte contre les mauvaises herbes (MH), fourniture en N disponible (N_{eff}), rendements des cultures et impacts environnementaux. Lors de la 1^{ère} année (2016), la croissance des EV a été modulée par leur capacité à compétitionner les MH. En début de saison, les graminées se sont établies plus rapidement et ont produit plus de biomasse que les légumineuses. En mi-saison, la vesce velue a cependant réussi à prendre le dessus. Le mélange de trèfle a été le moins performant. Au final, le ray-grass (22,6 T ha⁻¹) et la vesce (16,7 T ha⁻¹) ont produit les plus fortes biomasses, suivi du mélange de trèfle (9,5 T ha⁻¹). C'est toutefois la vesce qui a fourni le plus de N_{eff} (67 kg N_{eff} ha⁻¹), suivi du ray-grass et du mélange de trèfle, à égalité (moy. 37 kg N_{eff} ha⁻¹). Par ailleurs, le trèfle en intercalaire, apportant 8 kg N_{eff} ha⁻¹, n'a pas nuit ni haussé la croissance de l'avoine avec des rendements égaux à l'avoine seule (5 T ha⁻¹ de grains (14 % hum.)). Puisque les EF étaient appliqués pour fournir 100 kg N_{eff} ha⁻¹ (ou 50 pour le FPG 50N), les diverses régies ont apporté des quantités totales très différentes de NPK. La seule régie comblant les besoins cibles en N_{eff} de la Pdt (150 kg N_{eff} ha⁻¹), dont ≥ 50 kg N_{eff} ha⁻¹ par les EV, tout en apportant des quantités très proches des doses ciblées de P₂O₅ et K₂O est celle de « vesce + FPG 100N ». Toutes les régies utilisant le FUM, avec ou sans EV, ont entraîné des apports excessifs de P₂O₅ ($\geq 2x$) et de K₂O ($\geq 5x$), surtout combiné à un des EV de graminées puisque l'avoine apportait 104 kg K₂O ha⁻¹ et le ray-grass 197 kg K₂O ha⁻¹. Ce résultat ouvre la voie à plus de travaux pour mieux comprendre l'efficacité fertilisante du K des EV. Lors de la 2^e année (année Pdt), un rendement vendable moyen de 30,7 t ha⁻¹ a été produit. Les régies ont cependant fait une différence tant sur les flux de nitrate que les rendements, sans interaction. En ce qui a trait aux EV, ceux de légumineuses ont produit les plus hauts pics, 30 % plus élevés que ceux de graminées, mais cela ne s'est pas traduit par de meilleurs rendements vendables en Pdt. Seule une tendance à 4 T ha⁻¹ de plus avec les régies de vesce velue ou d'avoine-trèfle vs. le mélange de trèfle a été notée. Cette tendance est toutefois supportée par la présence hautement significative de 3x plus de MH dans les parcelles de trèfle que celles de vesce ou d'avoine-trèfle. Du côté des EF, ce sont les FPG qui ont le plus accru les flux de N-NO₃ sur toute la saison, à l'inverse du FUM produisant des flux similaires à ceux des sols témoins sans EF. Avant même l'apport fractionné, les sols des FPG 100N et 50 N avaient des flux 2x et 1,4x plus élevés, respectivement, que ceux des sols avec FUM ou témoin sans EF. Dans les périodes subséquentes, contrairement à ce qui a pu être observé avec les EV, les FPG ont maintenu une intensité de libération de N-NO₃ plus importante que le témoin sans EF ou le FUM. La pratique du fractionnement apparaît donc avantageuse et efficace. La décision d'apporter 60 % de la dose à ce moment ressort aussi comme justifié. À l'opposée, l'apport de la 2^e dose de FUM avant plantation ne semble pas bénéfique. L'apport de la 1^{ère} partie en automne précédent est aussi questionnable considérant que la hausse générée est faible (7 kg N-NO₃ ha⁻¹), au mauvais moment et qu'elle n'aide pas la 2^e dose à monter les flux de nitrate pendant la saison de croissance. À la récolte, les FPG 100N ont produit les plus hauts rendements, 1,5x plus élevés que ceux du FUM, les FPG 50N donnant un résultat intermédiaire. Lors de l'année blé (2018), seule la vesce a permis de hausser, deux ans après son incorporation, les rendements en grains. Les apports de FUM et FPG 100N ont toutefois favorisé par arrière-effet la production de pailles, tout comme le ray-grass et la vesce. Finalement, d'un point de vue économique, grâce à la vente des grains, l'EV avoine+trèfle procure la meilleure performance économique en termes de marge sur coût variable actualisée (MCVA) (vente des grains

d'avoine et blé considérée mais pas de la paille), suivi de la vesce qui bénéficie de la vente des grains de blé. Ces deux EV ont les meilleurs MCVA lorsqu'utilisés avec les FPG 50N, la dose de 100N étant plus coûteuse. La grande efficacité des FPG appliquées en bandes et fractionnées permettrait probablement d'ailleurs de baisser la dose d'apport lorsque combinées avec un EV performant, d'autant plus si la portion la plus grande est apportée dans le temps en fonction du pic de prélèvement. L'EV le moins performant est le mélange de trèfle avec une MCVA qui ne représente que 88 % de celle du témoin. L'option d'EF la moins rentable économiquement, mais également environnementalement, est le FUM puisque les contenus du sol en P_{eau} l'année de la Pdt et ceux de K MIII à la fin de la rotation ont été significativement affectés à la hausse par les apports de FUM, sans gains sur les rendements. Néanmoins, le FUM semble avoir favorisé le maintien d'un diamètre moyen pondéré supérieur, ce qui concorde avec sa stabilité plus grande, au contraire des FPG, plutôt considérées comme instables et activant la déperdition de la matière organique du sol. Il est à noter cependant que cette différence entre FUM et FPG n'est pas présente dans les sols ayant reçu de la vesce. Il semble donc possible de mitiger les effets des FPG avec une régie appropriée d'EV.

RÉFÉRENCES

Agridea. 2007. Pomme de terre bio – Culture. Bulletin 4.4.11 et 4.4.41. 17 pages.

AFNOR. 2018. Amendements organiques et supports de culture - Caractérisation de la matière organique par la minéralisation potentielle du carbone et de l'azote. Association française de normalisation. Norme FD U4-163.

Baute, T., Hayes, A., McDonald, I. et Reid, K. 2002. Agronomy guide for field crops. Publication 811. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, Queen's Printer for Ontario, Toronto, ON.

Beudet, P., Grenier, M., Giroux, M. et Girard, V. 2004. Description statistique des propriétés chimiques des sols minéraux du Québec. MAPAQ et IRDA, Québec. 112 pages.

Beaudoin. Communication personnelle. 2015.

Belzile, L. et Grondines, H. 2015. Compléments d'analyse économique à la recherche agronomique et agroenvironnementale en grandes cultures. Rapport final présenté au Réseau Innovagrains. IRDA. 68 pages.

Bostock, M. 2008. Growing potatoes organically from market garden to field crop: a COG practical skills handbook. Canadian Organic Growers, Ott.

Carter, M.R. et Ball, B.C. 1993. Soil water desorption curves. Chapter 53. In soil sampling and methods of analysis. M.R. Carter, editor. Canadian Society of Soil Science.

CARTV. 2013. Statistiques 2012 Usage de l'appellation biologique au Québec. 7ème éd. 18 pages.

Conseil des productions végétales du Québec (CPVQ). 1988. Méthodes d'analyse des sols, des fumiers et des tissus végétaux. Conseil des productions végétales du Québec (CPVQ). Québec. AGDEX 533, méthode SS-1.

Landry, C., M. Marchand-Roy, J. Mainguy, C. Côté, M. Généreux, L. Belzile, D. Godonou. 2018. Développement d'une régie de fertilisation combinant des engrais verts et des engrais de ferme pour combler les besoins en azote d'une rotation blé-maïs-soya tout en limitant les apports de phosphore en production biologique. IRDA. 48 p.

CRAAQ. 2010. Guide de références en fertilisation du Québec. 2ième Édition. Ste-Foy, Québec : CRAAQ . 293 pages.

CRAAQ. 2016. Pomme de terre biologique -Budget à l'hectare (AGDEX 258.19/821). CRAAQ, 8 pages.

CRAAQ. 2017. Valeur de remplacement engrais de ferme (AGDEX 538). CRAAQ. 4 pages.

- CRAAQ. 2018a. Grains de semences-Prix (AGDEX 100.45/855). CRAAQ, 3 pages.
- CRAAQ. 2018b. Machinerie- Coûts d'utilisation et taux à forfait suggérés (AGDEX 740/825). CRAAQ, 25 pages.
- CRAAQ. 2019a. Blé panifiable biologique -Budget à l'hectare (AGDEX 112.19/821). CRAAQ, 6 pages.
- CRAAQ. 2019b. Avoine biologique -Budget à l'hectare (AGDEX 113.19/821b). CRAAQ, 5 pages.
- Danielson, R.E. et Sutherland, P.L. 1986. Porosity. Chapter 18. Methods of soil analysis. A. Klute, editor. Agronomy. p. 443-460.
- Duval, J., Weill, A., et N'Dayegamiye, A. 2014. Contribution en azote en provenance des engrais verts de légumineuses. CETAB. 6 p.
- Duval, J., Weill, A., et N'Dayegamiye, A. 2015. Remplacer l'azote venant des apports de fumier par des engrais verts de légumineuses; des exemples au Québec et ailleurs en Amérique du Nord. [En ligne] <http://www.cetab.org/publications/remplacer-lazote-venant-des-apports-en-fumier-par-des-engrais-verts-de-legumineuses>.
- ÉcoRessources Consultants. 2012. Analyse du marché des produits biologiques en fonction du développement du secteur biologique au Québec. ÉcoRess. 44 p.
- Economic Research Service (ERS). 2015. (<http://www.ers.usda.gov>).
- Fageria, N.K., Baligar, V. et Bailey, B. 2005. Role of Cover Crops in Improving Soil and Row Crop Productivity. Comm. Soil Sci. Plant Anal. 36:2733-2757.
- Fraser. 1998. La production biologique de la pomme de terre. Centre agr. biol. de Lapocatière. 50 p.
- Finckh, M.R., Schulte-Geldermann, E. et Bruns, C. 2006. Challenges to Organic Potato Farming: Disease and Nutrient Management. Potato Res. 49(1):27-42.
- Fox, R.H. et Piekielek, W.P. 1978. A rapid method for estimating the nitrogen supplying capability of a soil. Soil Sci. Soc. Am. J. 42:743-747.
- Garcia, C., Hernandez, T. Costa, F. 1990. Study on water extract of sewage sludge compost. Soil Sci. Plant Nutr. 37:399-408.
- Gee, G.W. et Bauder, J.W. 1986. Particle-size analysis. In A. Klute (ed) Methods of soil analysis. Part 1. ASA. Monograph No 9. 2nd edition. Madison, WI. p. 383-411

Giroux, M. et Audesse, P. 2004. Comparaison de deux méthodes de détermination des teneurs en carbone organique, en azote total et du rapport C/N de divers amendements organiques et engrais de ferme. *Agrisol*. 15.

Gouvernement du Canada – Norme nationale du Canada – Système de production biologique – Principes généraux et normes de gestion – CAN/CGSB-32.310-2015

Grubinger. 2005. Growing Organic Potatoes. U. Vermont. [En ligne] <https://www.uvm.edu/vtvegandberry/factsheets/organicpotato.html>

Hagman, J., Martensson, A. et Grandin, U. 2009. Cultivation Practices and Potato Cultivars Suitable for Organic Potato Production. *Potato Res.* 52(4):319-330.

He, Z., Larkin R.P. et Honeycutt, W. 2012. Sustainable Potato Production: Global Case Studies. Springer Netherlands. p. 61-79.

Institut de la Statistique du Québec. 2015. www.stat.gouv.qc.ca

Institut de la Statistique du Québec. 2016. www.stat.gouv.qc.ca

Institut de la statistique du Québec. 2018. www.stat.gouv.qc.ca

Isaac, R.A. et Johnson, W.C. 1976. Determination of total nitrogen in plant tissues using a block digester. *J. Ass. Off. Anal. Chem.* 69:98-101.

Jobin, P. et Douville, Y. 1996. Engrais verts et cultures intercalaires. Ste-Élizabeth-de-Warwick: Centre de développement d'agrobiologie.

Johnson, S.B. et Sideman, E. 2006. Producing potatoes organically in Maine. Bulletin No.2419. University of Maine Extension, Orono, Maine.

Juma, N., Paul, E.A., et Mary B. 1984. Kinetic Analysis of Net Nitrogen Mineralization in Soil. *Soil Science Society of America Journal - SSSAJ*. 48. 753-757. 10.2136/sssaj1984.03615995004800040011x.

Khiari, L., Parent, L.E., Pellerin, A., Alimi, A.R.A., Tremblay, C., Simard, R. et Fortin, J. 2000. An Agri-Environmental Phosphorus Saturation Index for Acid Coarse-Textured Soils. *J ENVIRON QUAL*. 29(5): 1561-1567. doi:10.2134/jeq2000.00472425002900050024x.

Landry, C., P. Dubé, J. Mainguy, D. Pagé et D. Y. Martin. 2011. Évaluation de l'efficacité fertilisante en N et P, et de l'ISB de la fraction solide de lisier de porcs conditionnée obtenue du séparateur décanteur centrifuge afin d'en déterminer la valeur économique. Rapport scientifique final, Projet CDAQ #6186, 96 p.

Landry, C., C. Coté, R. Hogue, M. Marchand-Roy, M. Généreux et J. Mainguy. 2016. Impact des cultures de couverture et des engrais de ferme sur la dynamique saisonnière de l'azote disponible dans la culture de la carotte biologique en terres noires. Affiche scientifique présentée dans le cadre de la 2e conférence scientifique canadienne en agriculture biologique, Longueuil, Québec.

Landry, C., M. Marchand-Roy, J. Mainguy, C. Côté, M. Généreux, L. Belzile et D. Godonou. 2018. Développement d'une régie de fertilisation combinant des engrais verts et des engrais de ferme pour combler les besoins en azote d'une rotation blé-maïs-soya tout en limitant les apports de phosphore en production biologique. Rapport scientifique final IRDA, Projet Innov'Action # IA115487, présenté au MAPAQ, 48 p.

Landry, C. et Leblanc, M. 2018. Miser sur les engrais verts en grandes cultures biologiques pour limiter les apports de phosphore. Présentation au Colloque Bio pour tous du 22 février. Cetab +.

Landry, C., M. Marchand-Roy, J. Mainguy et M. Paradis. 2019. Détermination terrain du coefficient d'efficacité azoté et du délai de libération du N des fientes granulées de poules pondeuses dans les cultures du maïs-grain et de l'avoine. Rapport scientifique final IRDA, Projet InnovAction #216694, présenté au MAPAQ, 50 p.

Littell, R.C., Milliken, G.A., Stroup, W.W., Wolfinger, R.D., et Schabengerger, O. 2006. SAS. System for Mixed Models, second edition. Cary, NC : SAS Institute inc.

Lynch, D.H., Zheng, Z., Zebarth, B.J. et Martin, R.C. 2008a. Organic amendment effects on tuber yield, plant N uptake and soil mineral N under organic potato production. *Renew Agr Food Syst.* 23:250–259.

Lynch, D.H., Clegg, E., Owen, J. et Burton, D. 2008b. Greenhouse gas emissions from organic crop management in humid region eastern Canada. *Proceedings of "Org. Agri. Clim. Chge"*, April 17–18th, Enita Clermont, Lempdes, France.

MAPAQ. 2018a. Culture de la pomme de terre.

<https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Productions/Production/Pages/Pomme-de-terre.aspx>

MAPAQ. 2018b. Politique bioalimentaire 2018-2025 – Alimenter notre monde. 108 pages.

<https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Ministere/md/Publications/Pages/Details-Publication.aspx?guid=%7Bc250a9cb-459e-44c6-bf9c-af532a45f1bd%7D>

MAAARO. 2009. Guide agronomique des grandes cultures. Publication 811F. www.omafra.gov.on.ca

McGill, W.B., Cannon, K.R., Robertson, J.A. et Cook, F.D. 1986. Dynamics of soil microbial biomass and water-soluble organic C in Breton L after 50 years of cropping to two rotations. *Can. J. Soil Sci.* 66:1-19

MDDELCC. 2014. Guide de référence du Règlement sur les exploitations agricoles. MDDELCC. 182 p.

Möller, K. et Reents, H.J. 2007. Impact of agronomic strategies (seed tuber pre-sprouting, cultivar choice) to control late blight (*Phytophthora infestans*) on tuber growth and yield in organic potato (*Solanum tuberosum* L.) crops. *Potato. Res.* 50:15–29

Moore, A.D., Olsen, N., Satterwhite, M. et Frazier, M.J. 2013. Organic potato production in Idaho : Nutrient management and variety selection. University of Idaho Extension Publication. BUL 885. 9 p.

N'Dayegamiye, A., Gasser, M.-O., Grenier, M., Giroux, M., Landry, C., Guertin, S. et Tremblay, G. 2011. Choix d'indicateurs efficaces pour prédire la fertilisation azotée des sols. Rapport de recherche présenté au CDAQ. Projet No 6177. 28 p.

N'Dayegamiye, A., Grenier, M., Weill, A., Drapeau, A. et Deschênes, P. 2014a. Gestion efficace et intégrée des rotations, du travail du sol, des fumiers et des composts pour une rentabilité accrue en agriculture biologique. Rapport final de recherche, PCAA CDAQ et InnovBio MAPAQ, 20 pages.

N'Dayegamiye, Tremblay, G. et Drapeau, A.. 2014b. Impact agronomique et économique des légumineuses dans les rotations agricoles. Rapport final de recherche, PCAA CDAQ. 20 pages.

Nduwamungu. 2006. Stabilité biologique et pouvoir tampon des amendements et des engrais organiques. Thèse de doctorat. Université Laval. 110 pages.

Nyiraneza, J., N'Dayegamiye, A., Gasser, M.-O., Giroux, M., Grenier, M., Landry, C. et Guertin, S. 2010. Soil and crop parameters related to corn nitrogen response in Eastern Canada. *Agron. J.* 102: 1478-1490.

Nziguheba, G., Palm, C.A., Buresh, R.J. et Smithson, P.C. 1998. Soil phosphorus fractions and adsorption as affected by organic and inorganic sources. *Plant and Soil.* 198, 159–168. <https://doi.org/10.1023/A:1004389704235>

OMAFRA. 2011a. Field crop budgets. Publication 60. OMAFRA. www.omafra.gov.on.ca

OMAFRA. 2011b. Cover crops. www.omafra.gov.on.ca

Organic Trade Association. 2013. Canada's Organic Market : National Highlights. 6 p.

Pellerin, A., Parent, L. E., 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. *Can. J. Soil Sci.* 86: 711–723.

Perreault, S., Communication personnelle. 2016.

Poffenbarger, H.J., Mirsky, S.B., Weil, R.R., Kramer, M., Spargo, J.T. et Cavigelli, M.A. 2015. Legume Proportion, Poultry Litter, and Tillage Effects on Cover Crop Decomposition. *Agron. J.* 107(6):2083-2096. doi:10.2134/agronj15.0065

Salomons, W. et Gerritse, R.G. 1981. Some observations on the occurrence of phosphorus in recent sediments from western Europe. *The Science of the Total Environment* 17:37-49.

Seaman. 2015. Production Guide for Organic Potato. Publisher: New York State Integrated Pest Management Program, Cornell U. 102 p.

Semican. 2015. Guide Engrais Verts. 17p.

Sharifi, M., Zebarth, B.J., Burton, D.L., Grant, C.A. et Porter, G.A. 2008. Organic amendment history and crop rotation effects on soil nitrogen mineralization potential and soil nitrogen supply in a potato cropping system. *Agron. J.* 100:1562–1572.

Sharifi, M., Zebarth, B., Porter, G., Burton, D. et Grant, C. 2009. Soil mineralizable nitrogen and soil nitrogen supply under two-year potato rotations. *Plant and Soil.* 320. 267-279. 10.1007/s11104-009-9892-5.

Sincik, M., Turan, Z.M. et Göksoy, A.T. 2008. Responses of Potato (*Solanum tuberosum* L.) to Green Manure Cover Crops and Nitrogen Fertilization Rates. *Am. J. Pot Res.* 85(2):150–158. <https://doi.org/10.1007/s12230-008-9011-9>

Sissingh, H.A. 1971. Analytical technique of the PW method used for the assessment of the phosphate status of arabe soils in the Netherlands. *Plant and Soil.* 34:483-486.

Swenson, R. M., C. V. Cole et D. H. Sieling, 1949. Fixation of phosphate by iron and aluminium and replacement by organic and inorganic ions. *Soil Sci.* 67: 3-22.

Thibault, M.T., communication personnelle, 2018.

Tran, T.S., Giroux, M. et N'Dayegamiye, A. 1992. Utilisation rationnelle des fumures azotées minérales : aspects agronomiques et environnementaux. *Agrosol.* 5(2):18-25.

United States Department of Agriculture (USDA). 2010. Marketing Maine Tablestock Potatoes. USDA, 65 p.

Vanasse et Allard. 2015. Survie à l'hiver et rendement du blé d'automne selon différentes dates et densité de semis. U. Laval. <https://www.agrireseau.net>

Verville, F. 2014. Effet des engrais verts et de leur période d'enfouissement sur la nutrition azotée et les rendements du blé. Mémoire de maîtrise. Université Laval. 102 p

Zebarth, B.J., Leclerc, Y., Moreau, G., Sanderson, J.B., Arsenault, W.J., Botha, E.J. et Wang-Pruski, G. 2005. Estimation des réserves d'azote dans le sol des champs de pommes de terre par dosage biologique des plantes. Can. J. Soil Sci. 85(3):377–386.