

## RAPPORT FINAL

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-GRAIN/SOYA TOUT EN LIMITANT  
LES APPORTS DE PHOSPHORE EN PRODUCTION  
BIOLOGIQUE.

**Auteur et responsable scientifique : Christine Landry, Chercheure**

co-auteur : Mylène Marchand-Roy, Julie Mainguy, Caroline Côté, Mylène Généreux, Luc Belzile et Denise Godonou

Date : 20 décembre 2018

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](http://www.irda.qc.ca)

Projet :

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-grain/soya tout en limitant les apports de phosphore en production biologique.

Présenté à :

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

*Programme de soutien à l'innovation en agroalimentaire, INNOV'ACTION agroalimentaire, un programme issu de l'accord du cadre Cultivons l'avenir conclu entre le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation et Agriculture et Agroalimentaire Canada*

## LE RAPPORT PEUT ÊTRE CITÉ COMME SUIT :

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-grain/soya tout en limitant les apports de phosphore en production biologique. Projet Innov'Action no. IA115487. Rapport final IRDA présenté au Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec. 46 pages.

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

## ÉQUIPE DE RÉALISATION DU PROJET

- Responsable scientifique : Christine Landry, agr., Ph.D., IRDA
- Caroline Côté, agr., Ph. D., IRDA
- Mylène Marchand-Roy, agr., M.Sc., IRDA
- Mylène Généreux, M. Sc., IRDA
- Julie Mainguy, agr., B.Sc., IRDA
- Mélissa Paradis, M.Sc., IRDA
- Luc Belzile, agroéconomiste, M.Sc., IRDA

## ÉQUIPE DE RÉDACTION DU RAPPORT

- Christine Landry, Chercheure principale, agr., Ph. D., IRDA
- Mylène Marchand-Roy, agr., M. Sc., IRDA
- Julie Mainguy, agr., B. Sc., IRDA
- Caroline Côté, agr., Ph. D. IRDA
- Mylène Généreux, M.Sc., IRDA
- Luc Belzile, agroéconomiste, M.Sc., IRDA
- Denise Godonou, agroéconomiste, M.Sc., IRDA

## COLLABORATEURS

- Élisabeth Vachon, agr., Les Moulins de Soulange
- Nicolas Turgeon, MAPAQ
- Adrien N'Dayegamiye, Ph.D.
- Maude Forté, agr.
- Michèle Grenier, biostatisticienne

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](mailto:christine.landry@irda.qc.ca)

## REMERCIEMENTS

Ces travaux ont été réalisés grâce à une aide financière du Programme de soutien à l'innovation en agroalimentaire, un programme issu de l'accord du cadre Cultivons l'avenir 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-Bruno et Deschambault, personnel technique des différents laboratoires d'analyse de l'IRDA, ainsi que les étudiants d'été.

## RÉSUMÉ

Les engrais de ferme (EF) sont largement utilisés en agriculture biologique puisqu'ils sont riches en azote efficace ( $N_{\text{eff}}$ ). Toutefois, ils contiennent beaucoup de phosphore (P), ce qui leur crée un ratio  $N_{\text{eff}}/P_{\text{tot}}$  faible. Pour les cultures exigeantes en N, des quantités excessives de P sont donc apportées, ce qui favorise l'enrichissement en P des sols. Ceci est une contrainte importante dans les régions productrices de grains, telle la Montérégie, où une majorité de sols sont saturés en P. Ce projet visait donc à valider une régie de trois ans combinant l'usage prédominant d'engrais verts (EV) en tête de rotation et d'EF l'année de la culture la plus exigeante en N d'une rotation blé/maïs-grain/soya. Les EV testés devaient présenter un fort potentiel de fourniture en N ( $50 \text{ kg } N_{\text{eff}}/\text{ha}$ ) et les EF devaient permettre de fournir rapidement une quantité appréciable de  $N_{\text{eff}}$  ( $100 \text{ kg ha}^{-1}$ ). Cependant, des biomasses plus faibles qu'attendues ont été produites, avec  $2,0$  et  $2,8 \text{ T ha}^{-1}$  (b.h.) de trèfle en intercalaire du blé et de pois fourrager en post récolte du blé, respectivement, n'apportant ainsi que  $14$  et  $21 \text{ kg } N_{\text{eff}} \text{ ha}^{-1}$ . Néanmoins, le pois a montré une forte tendance ( $P = 0,1272$ ) à accroître les rendements en maïs de  $17 \%$  ( $1,42 \text{ T/ha}$  de plus), comparativement au témoin sans EV et au trèfle. L'effet des EF sur les rendements en maïs a été plus grand ( $P = 0,0004$ ) que celui des EV, d'une part à cause des biomasses d'EV, mais surtout parce que les doses d'EF visaient des apports deux fois plus élevés de  $N_{\text{eff}} \text{ ha}^{-1}$ . Le lisier de porc (LP) appliqué en post-émergence du maïs et le fumier de poulet à griller incorporé à l'automne (FPA) ont produit les plus hauts rendements (plus de  $9,6 \text{ T ha}^{-1}$ ),  $63 \%$  plus élevés que celui du sol sans EF. Tel que le révèle le suivi *in situ* en continu du nitrate ( $\text{NO}_3$ ) du sol, cette performance s'explique par une meilleure synchronisation entre leur fourniture en  $\text{NO}_3$  et le pic de besoin en N du maïs (60-90 JAS), obtenue par des moments d'application convenant mieux à la plus grande résistance à la minéralisation du FPA et à la forte labilité du LP. À l'opposé, le fumier de poulet à griller appliqué au printemps (FPP) n'a pas minéralisé assez rapidement, tandis que les granules de fientes de volailles (GFV) ont minéralisé trop hâtivement. En effet, le fumier de poulet à griller n'a que  $43 \%$  de son carbone (C) dans la fraction la plus soluble, avec un C/N de 15. À l'opposé, les GFV contiennent  $72 \%$  de leur C dans cette fraction, avec un C/N de 8. Le FPP et les GFV ont quand même permis des rendements  $45 \%$  plus élevés que les sols sans EF. Toutefois, une régie mieux adaptée aux caractéristiques des GFV, qui ont donné moins de rendement que le LP mais autant que le FPA, telle l'application en bande en post-émergence, permettrait probablement une diminution des quantités à appliquer et de meilleurs rendements. Comme cet intrant est plus dispendieux, ceci améliorerait sa marge sur coût variable et permettrait sa justification économique. En dernière année de rotation, aucun engrais n'a été apporté. Un arrière-effet des EV 2015 a été mesuré ( $P = 0,1059$ ), avec  $10 \%$  plus de rendement dans les sols ayant reçu du pois comparativement à ceux ayant reçu du trèfle ( $P = 0,0453$ ) et une faible tendance à  $5 \%$  plus que dans les parcelles sans EV ( $P = 0,1837$ ). Tant les EV que les EF ont eu un impact positif sur les indicateurs microbiologiques, mais pas les mêmes, renforçant l'intérêt d'une régie mixte pour stimuler la santé du sol. Les EV semblent avoir davantage modifié à la hausse la biomasse microbienne, tandis que les EF ont fait davantage augmenter les activités enzymatiques. D'un point de vue environnemental, les teneurs en  $\text{NO}_3$  résiduel du sol restent globalement faibles ( $< 9 \text{ kg N-NO}_3/\text{ha}$ ) en post-récolte du maïs et du soya sur les trois strates étudiées (0-20, 20-40 et 40-60 cm). Les EV ( $P = 0,0295$ ), haussent tout de même le  $\text{NO}_3$ , comparativement au sol témoin, mais uniquement dans la strate de surface et lors de l'année maïs. Les EF ont un effet beaucoup plus marqué car des hausses significatives sont mesurées dans les trois strates et ce, jusqu'en automne 2017, soit 1,5 à 2 ans après leur application. Dans l'ensemble, aucun n'a d'impact négatif vraiment plus marqué que les autres.



# TABLE DES MATIÈRES

1	Introduction .....	1
1.1	Objectifs .....	2
1.1.1	Objectifs détaillés.....	2
2	Matériel et méthodes.....	3
2.1	Site et traitements.....	3
2.2	Dispositif et analyses statistiques .....	3
2.2.1	Mise en place des rotations.....	5
2.3	Analyses chimiques de laboratoire .....	5
2.3.1	Année blé et engrais verts .....	6
2.3.2	Année maïs-grain .....	6
2.3.3	Année soya.....	7
2.4	Suivi <i>in situ</i> en continu du N et P disponibles .....	7
2.5	Caractérisation des engrais de ferme .....	8
2.6	Analyse économique .....	8
3	Résultats et discussion.....	10
3.1	Caractérisation des engrais verts et des engrais de ferme.....	10
3.2	Blé (2015) .....	12
3.3	Maïs-grain (2016) .....	14
3.3.1	Analyses ponctuelles du sol.....	14
3.3.2	Dynamique du nitrate du sol et rendements en grains.....	18
3.4	Soya (2017).....	23
3.5	Impacts de la rotation .....	25
3.5.1	Activité biologique du sol.....	25
3.5.2	Azote résiduel .....	27
3.6	Analyse économique .....	30
4	Conclusion .....	35
	Références .....	36
	Annexe A Qualité boulangère des grains de blé.....	39
	Annexe B Caractéristiques chimiques du sol.....	38

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Caractérisation biochimique, biomasses et apports d'éléments fertilisants des engrais verts et des engrais de ferme.....	10
Tableau 2. Contenu du sol en N-NO <sub>3</sub> (kg/ha b.s) au printemps 2016 (20 avril), en fonction des engrais verts et de l'engrais de ferme (fumier de poulet à griller) incorporés à l'automne 2015.....	14
Tableau 3. Contenus du sol en NPK disponibles au stade post-émergence du maïs-grain (avant lisier) selon les engrais verts et les engrais de ferme.....	16
Tableau 4. Contenus du sol en NPK disponibles au stade soie du maïs-grain en fonction des engrais verts et de ferme.....	17
Tableau 5. Impact des engrais verts et des engrais de ferme de la rotation sur certains indicateurs d'activité biologique du sol en 2016 (3 août) et 2017 (18 juillet).....	25
Tableau 6. Marge sur coûts variables de la rotation selon l'engrais vert.....	30
Tableau 7. Marge sur coûts variables de la rotation selon l'engrais de ferme.....	31
Tableau 8. Comparaison du rendement et du revenu entre la référence du CRAAQ et les résultats.....	33

## LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Plan du dispositif de l'essai.....	4
Figure 2.	Équipements d'épandage des engrais de ferme en 2015-2016, pour soit le fumier de poulet à griller (à gauche), les granules de fientes de volaille (au centre) et le lisier de porc (à droite). ....	5
Figure 3.	Apparence du trèfle intercalaire après la récolte du blé, le 24 août 2015 (gauche) et du trèfle et du pois fourrager juste avant l'enfouissement le 5 novembre 2015 (droite). ....	12
Figure 4.	Rendements en grains de blé (14 % hum.) en fonction des engrais verts, le 21 août 2015. ....	13
Figure 5.	Prélèvements totaux (grains et pailles) en N du blé en fonction des engrais verts, le 21 août 2015.....	13
Figure 6.	Contenu du sol (strate 0-20 cm) en N-NO <sub>3</sub> à la récolte du blé le 21 août et juste avant l'enfouissement des engrais verts, le 3 novembre 2015.....	14
Figure 7.	Croissance du maïs au stade post-émergence (30 juin 2016 - à gauche) et soie (3 août 2016 - à droite).....	16
Figure 8.	Flux de N-NO <sub>3</sub> des membranes d'échange ionique sur la saison 2016 selon les engrais verts d'automne 2015, tous engrais de ferme confondus. ....	19
Figure 9.	Rendement en grains de maïs en fonction des engrais verts (1 <sup>er</sup> novembre 2016) tous engrais de ferme confondus.. ....	19
Figure 10.	Flux de N-NO <sub>3</sub> des membranes d'échange ionique sur la saison 2016 selon la fertilisation des engrais de ferme, tous engrais verts confondus. ....	20
Figure 11.	Prélèvements totaux en azote (N) par les tiges de maïs-grain (pointillé) et les grains (coloré) en fonction des engrais de ferme au 1 <sup>er</sup> novembre 2016, tous engrais verts confondus.....	21
Figure 12.	Rendement en grains de maïs en fonction des engrais de ferme, le 1 <sup>er</sup> novembre 2016, tous engrais verts confondus.. ....	22
Figure 13.	Rendement en grains du maïs en fonction des engrais verts et des engrais de ferme au 1 <sup>er</sup> novembre 2016. ....	23
Figure 14.	Rendement en grains de soya en fonction des engrais verts, le 28 septembre 2017, tous engrais de ferme confondus.. ....	24
Figure 15.	Rendement en grains de soya en fonction des engrais de ferme, le 28 septembre 2017, tous engrais verts confondus. ....	25
Figure 16.	Capacité de fourniture en nitrate du sol par minéralisation selon les engrais verts et les engrais de ferme (3 août 2016).....	26
Figure 17.	Contenu en nitrate résiduel du sol selon les apports d'engrais verts, pour 3 profondeurs d'échantillonnage, le 9 novembre 2016 et le 10 octobre 2017, tous engrais de ferme confondus.....	27
Figure 18.	Contenu en nitrate résiduel du sol selon les apports d'engrais de ferme, pour 3 profondeurs d'échantillonnage, le 9 novembre 2016 et le 10 octobre 2017, tous engrais verts confondus.....	28



# 1 INTRODUCTION

Au Québec, la volonté de produire de la viande biologique (bio) est en pleine expansion. Plusieurs entreprises importantes ont ainsi décidé de se positionner sur le marché de la viande bio. Toutefois, le développement de cette production est grandement limité par le manque d'approvisionnement local en grains bio. Les industries tentent effectivement de sécuriser leurs approvisionnements avec la production locale puisque les approvisionnements externes sont soumis à des variations incontrôlables de prix qui rendent très difficile le développement des marchés connexes. La consommation locale est donc priorisée et pourrait facilement tripler sans que les prix s'en ressentent si la demande reste constante ou s'accroît. Ce qui devrait être le cas puisque moins de 50 % de la demande provinciale (200 000 T) est comblée par des grains d'ici, et ce, malgré le fait que 323 entreprises québécoises produisent des grains bio (Sall 2015). À titre d'exemple, Aliments Breton (comm. personnelle 2014) a des objectifs de croissance qui représentent une consommation de 20 000 T de grains biologiques à moyen terme. Toutefois, l'entreprise est présentement restreinte à 20 % de cet objectif dû aux difficultés d'approvisionnement. Le Québec a pourtant une grande expertise en production de grains de qualité. La problématique est donc propre à l'aspect biologique de la production. Les engrais minéraux étant proscrits, des sources organiques doivent être utilisées pour fertiliser les cultures. Les engrais de ferme (EF) sont utilisés largement puisqu'ils sont relativement riches en azote efficace ( $N_{\text{eff}}$ ). Toutefois, ils contiennent aussi beaucoup de phosphore (P). Leur ratio  $N_{\text{eff}}/P_{\text{tot}}$  est ainsi faible. Pour les cultures exigeantes en N, des quantités excessives de P sont ainsi apportées. Ceci favorise l'enrichissement en P des sols et présente une contrainte importante dans les régions productrices de grains, telle la Montérégie, où les EF sont abondants mais où une majorité de sols sont déjà riches à très riches en P (Beudet et coll. 2003). En effet, selon le règlement sur les exploitations agricoles (RÉA) (MDDELCC 2014), les apports de P permis sont très limités en sol riche en P, ce qui rend impossible l'apport de grandes quantités d'EF. D'autre part, la difficulté réside aussi parfois dans le faible approvisionnement possible en fumiers/lisiers répondant aux critères de production bio. Ainsi, que ce soit à cause de l'état des sols ou de l'approvisionnement en EF, le principal frein à la croissance de la production biologique réside donc dans la faible productivité attribuable à l'insuffisance en intrants azotés efficaces.

Une solution mixte envisageable serait d'utiliser prioritairement les engrais verts (EV) dans une rotation pour combler une partie des besoins en N et restreindre l'usage des EF à l'année de la culture la plus exigeante en N. Une fois une gestion optimale développée, celle-ci pourrait accroître l'autonomie en intrants azotés de ce secteur et assurer la rentabilité des entreprises, en plus d'améliorer durablement 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.) (Fragaria et coll. 2005). Dans un tel contexte, le choix de l'EV et de l'EF utilisés devient critique. Ceux-ci doivent être les plus efficaces de leur catégorie et être adéquats pour assurer chacun des rôles bien distincts. La production de l'EV ne doit pas priver le producteur d'une année de rendement. Ainsi, l'EV, probablement cultivé en intercalaire ou en post-récolte de la culture principale, devra emmagasiner rapidement une forte teneur en N tout en produisant une biomasse intéressante afin de fournir pour la saison suivante une quantité suffisante de N. De son côté, l'EF devra fournir rapidement une forte quantité de N hautement disponible au moment permettant de répondre à la demande de pointe en N de la culture exigeante en cet élément.

Le développement de régies de fertilisation performantes vise à aider les producteurs de grains bio à hausser leur productivité et leur compétitivité. Globalement au Québec, c'est 24 000 ha de grandes cultures bio qui pourraient bénéficier de ces gains (Sall 2015). Dans le contexte où la demande en grains bio au Québec est satisfaite en grande partie par les importations, des efforts en ce sens sont prioritaires. La plus-value associée aux grains bio est également fort importante, alors que les prix y sont généralement 2,5 fois plus élevés que ceux des grains conventionnels, et cela constitue un incitatif fort à la transition à l'agriculture biologique.

## 1.1 OBJECTIFS

Valider une régie mixte combinant l'usage prédominant d'EV au fort potentiel de fourniture en N, accompagnés d'EF comme démarreur afin de stimuler la minéralisation des EV et de fournir rapidement une certaine quantité de N disponible à la culture la plus exigeante en N (maïs-grain) d'une rotation de grains biologiques.

### 1.1.1 Objectifs détaillés

1. Évaluer l'impact des différentes régies testées sur les rendements et les prélèvements en nutriments de chacune des cultures de la rotation (blé, maïs-grain et soya).
2. Caractériser en laboratoire les contenus en nutriments des engrais verts et des engrais de ferme afin d'estimer leur valeur fertilisante en éléments disponibles.
3. À chaque année de la rotation, comparer les effets des différentes régies sur les paramètres chimiques et biologiques des sols.
4. L'année la plus exigeante en N de la rotation (maïs-grain), suivre *in situ* en continu pendant toute la saison de croissance les flux de nitrate découlant de la minéralisation des engrais verts et des engrais de ferme.
5. Mesurer l'impact des différentes régies sur l'accumulation de nitrate résiduel en profondeur dans le sol (0 à 60 cm de profondeur).
6. Réaliser une analyse économique de la marge sur coûts variables de chacune des régies à l'essai.

## 2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

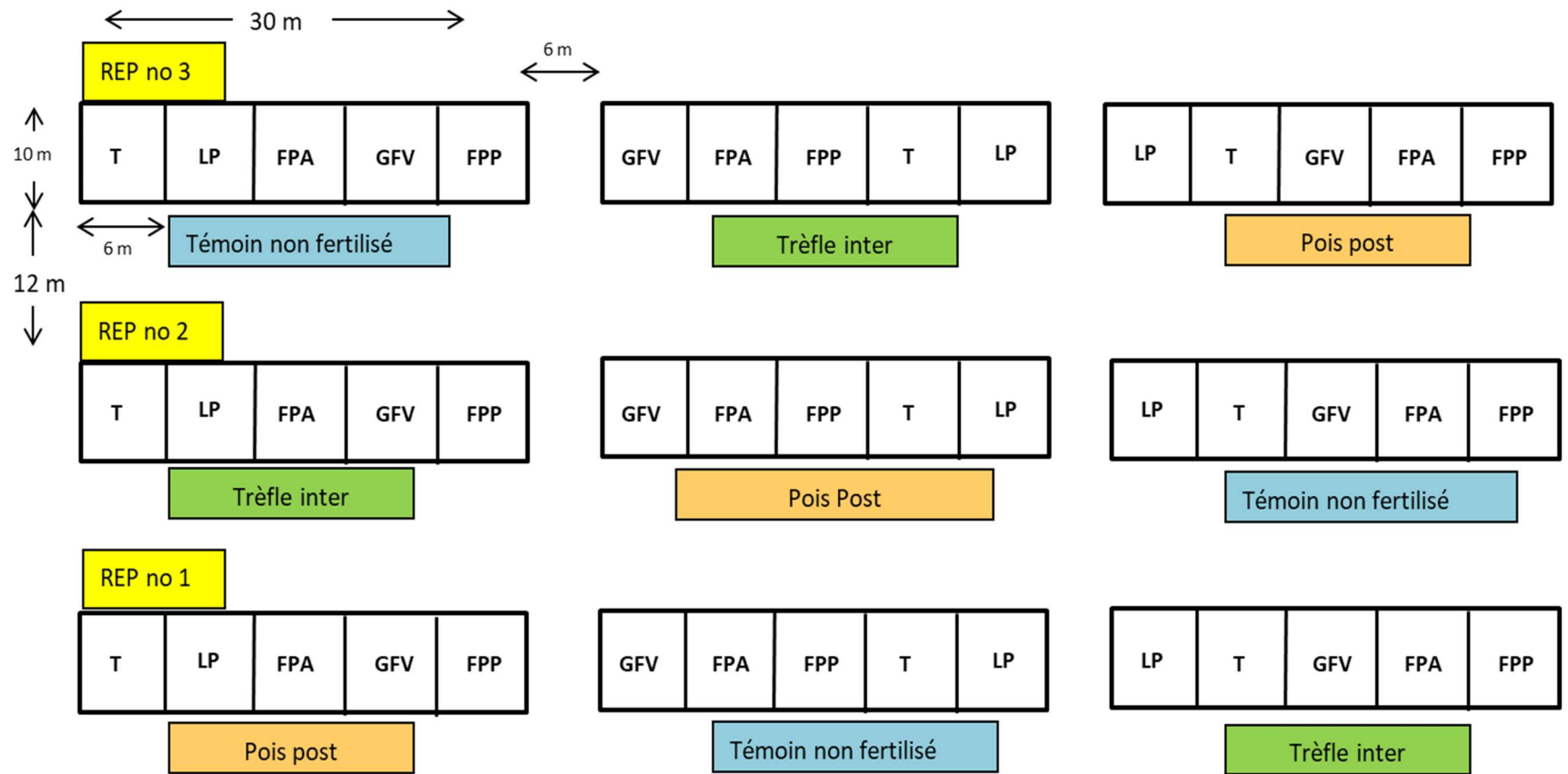
### 2.1 SITE ET TRAITEMENTS

L'étude s'est déroulée à la plateforme d'innovation en agriculture biologique de l'IRDA à la ferme expérimentale de Saint-Bruno-de-Montarville en sol argileux du printemps 2015 à l'automne 2017. Une rencontre préparatoire avec des producteurs, des conseillers de clubs agroenvironnementaux et des conseillers du MAPAQ de la Montérégie a 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. Le choix des EV et des rotations s'appuie également sur des travaux du CETAB (Duval et coll. 2015) et de l'IRDA (N'Dayegamiye et coll. 2014a, N'Dayegamiye et coll. 2014b, Belzile et Grondines 2015) qui visaient à évaluer les meilleurs EV et rotations d'un point de vue agronomique et économique. Le choix de la rotation a donc été : blé panifiable (2015), maïs-grain (2016) et soya (2017). Les EV de 1<sup>ière</sup> année, devant fournir une bonne part du N au maïs-grain semé en 2<sup>ième</sup> année de rotation étaient 1) un mélange de trèfle rouge et blanc en intercalaire avec le blé et 2) le pois fourrager 40-10 semé en post-récolte du blé. Les EF, visant à fournir un complément de N rapidement disponible pour le maïs-grain étaient 1) du fumier de poulet à griller qui avait été appliqué à l'automne (FPA) de la 1<sup>ière</sup> année (2015) ou 2) du fumier de poulet à griller (FPP) et 3) des granules de fientes de volaille (GFV) tous les deux appliqués au printemps (semis) 2016 ou 4) du lisier de porc (LP) appliqué en post-émergence du maïs-grain. Enfin, trois témoins ont aussi été inclus. Un témoin sans EV ni EF pour déterminer ce que le sol seul peut fournir en N. Un témoin avec EF mais sans EV et un témoin sans EV mais avec EF pour distinguer le N supplémentaire tiré des EV ou des EF selon chacun des traitements de fertilisation.

### 2.2 DISPOSITIF ET ANALYSES STATISTIQUES

Le dispositif comprenait 3 répétitions de 3 parcelles principales (PP) subdivisées en 5 sous-parcelles (SP) pour un total de 45 unités expérimentales. Les parcelles principales faisaient 10 m x 30 m et les sous-parcelles faisaient 6 m x 10 m. Il y avait 12 m de zone tampon séparant les répétitions entre elles et 3 m de zone tampon entre les PP d'une même répétition. Sur la recommandation de la biostatisticienne, étant donnée la contrainte créée par l'épandage des EF; il était impossible d'épandre uniformément en arrêtant l'épandeur aux 6 m pour changer de parcelles, le dispositif devenait ainsi un plan à parcelles partagées en bandes (strip-plot). De ce fait, les traitements d'EF étaient tous disposés en bandes côte à côte qui traversaient les 3 blocs dans une direction perpendiculaire à celle des parcelles principales, disposées en blocs aléatoires complets. La Figure 1 ci-dessous illustre cette disposition. 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 à l'étude 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).



Parcelle principale (10 X 30 m) : Témoin non fertilisé, Trèfle en intercalaire du blé (Trèfle inter) et Pois fourrager semé après la récolte du blé (Pois post)  
 Sous-Parcelle (6 X 10 m) : Témoin sans N (T), Fumier de poulet à grillé appliqué à l'automne (FPA), Fumier de poulet à griller appliqué au printemps (FPP), Granules de fientes de volailles (GFV) et Lisier de porc (LP)

**Figure 1. Plan du dispositif de l'essai**

### 2.2.1 Mise en place des rotations

Lors de la 1<sup>ière</sup> année, le blé panifiable (cv. Walton) a été semé le 8 mai 2015 et le dispositif a été divisé en parcelles principales. Le mélange de trèfle rouge 2 coupes et de trèfle blanc huia (6 kg/ha) a pour sa part été semé à la volée, en intercalaire avec le blé dans les parcelles principales testant cet EV, quelques jours après le semis du blé, soit le 15 mai. Il est à noter qu'à la suite d'une levée difficile, un 2<sup>ième</sup> semis du mélange de trèfle a été effectué le 3 juin, cette fois à une dose de 9 kg/ha. La récolte du blé a été réalisée le 21 août dans toutes les parcelles. Dans celles comprenant le trèfle, celui-ci a été laissé à pousser jusqu'à son enfouissement. Dans les parcelles devant recevoir le pois fourrager 40-10, celui-ci a été semé suivant la récolte du blé et une légère préparation de sol (vibro). Les deux EV ont été enfouis avec les pailles de blé restées au sol, le 5 novembre. À cette même date, chacune des PP a été subdivisée en 5 SP pour tester les quatre sources d'EF. Le FPA a été appliqué à la volée et incorporé en même temps que la paille et les EV, selon le cas. Au printemps 2016, le FPP a été appliqué à la volée et incorporé tout de suite avant les semis de maïs (cv. Blue River, 80 000 grains ha<sup>-1</sup>), le 18 mai 2016. De leur côté, les GFV ont été appliqués et incorporés avec le semis de maïs également le 18 mai. Un peu plus tard en début de saison, le 30 juin, le LP a été appliqué en bande et simultanément incorporé, en post émergence (Figure 2). La récolte du maïs a eu lieu le 1<sup>er</sup> novembre et les résidus ont été incorporés. Enfin, en 2017, toutes les parcelles du dispositif ont été semées en soya (cv. Laurent, 450 000 grains ha<sup>-1</sup>), le 1<sup>er</sup> juin 2017, sans aucun apport de produit, et donc de N. Pour toutes les années de la rotation, il n'y a pas eu d'apport en P et K autre que ceux fournis par les applications d'EF. Les doses d'EF ont été ajustées pour apporter des quantités de N efficace similaires (100 kg N ha<sup>-1</sup>) entre les produits, tout en s'assurant que le P et K ne soient pas limitants.



**Figure 2.** Équipements d'épandage des engrais de ferme en 2015-2016, pour soit le fumier de poulet à griller (à gauche), les granules de fientes de volaille (au centre) et le lisier de porc (à droite).

## 2.3 ANALYSES CHIMIQUES DE LABORATOIRE

Toutes les analyses de sol ont été effectuées sur la strate 0-20 cm, excepté celles réalisées en automne sur le nitrate (NO<sub>3</sub>) résiduel, pour lesquelles les échantillons prélevés avec une foreuse hydraulique (Gidding) comprenaient aussi les strates 20-40 et 40-60 cm. Pour le dosage du statut nutritionnel et la teneur en éléments

de la biomasse, les éléments dosés étaient toujours le N, P, K, Ca et Mg totaux. Le  $N_{total}$  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<sub>3</sub>) (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. Les prélèvements ont été calculés en multipliant la biomasse par la teneur en éléments des tissus. En ce qui a trait aux analyses de sol, les échantillons ont été conservés à 4 °C dans une glacière. Le pH<sub>eau</sub> a été mesuré dans un rapport sol/eau 1:1 (Conseil des productions végétales du Québec, 1988). Le pH tampon a aussi été déterminé par la méthode SMP. La matière organique (MO) a été obtenue par perte au feu. Les contenus en carbone (C<sub>total</sub>) et azote (N<sub>total</sub>) totaux ont été mesurés par combustion au LECO. Les ions nitrates (N-NO<sub>3</sub>) et ammonium (N-NH<sub>4</sub>) ont été extraits au KCl 2M (Isaac et Johnson, 1976) et déterminés par colorimétrie avec un auto analyseur Technicon. Le P<sub>total</sub>, le K<sub>total</sub> et les éléments mineurs ont été extraits dans une solution Mehlich-3 (Tran et coll, 1992) et dosés à l'ICP optique. Les éléments P (Peau) et K (Keau) solubles ont été évalués par la méthode de Sissingh (1971). De plus, le C labile soluble à l'eau (Ceau) a été extrait selon la méthode proposée par Garcia et coll. (1990). Le même extrait à l'eau a servi également à doser le N organique (No) labile et le N minérale (N-NH<sub>4</sub> et N-NO<sub>3</sub>), ensuite dosés par colorimétrie au Technicon. La granulométrie a été déterminée par la méthode de l'hydromètre en six points suivi d'un tamisage des sables (Gee et Bauder, 1986).

### 2.3.1 Année blé et engrais verts

Au printemps 2015, le sol a été caractérisé par bloc (pH<sub>eau</sub>, éléments Mehlich-3, NO<sub>3</sub> et NH<sub>4</sub> (KCl 2M), C et N totaux (Leco)). Par la suite, au stade tallage (3 juin) et au moment de l'épiaison (29 juin), les contenus en NPK disponibles du sol ont été dosés dans chacune des PP. De plus, pour ces deux stades également, une mesure de biomasse aérienne a été effectuée, ainsi que le dosage en éléments des tissus afin de pouvoir calculer les prélèvements atteints par le blé à ces stades. À l'épiaison, une analyse foliaire (feuille étendard) du statut nutritionnel du blé a également été effectuée. Cela devait permettre de vérifier si le blé présente un moins bon statut nutritionnel en présence d'une compétition avec le trèfle. Le 21 août, lors de la récolte du blé, les rendements en paille et en grains ont été établis, ainsi que les prélèvements totaux (grains et paille). La paille a toutefois été laissée sur place. Son prélèvement ne constitue donc pas une exportation mais il est intéressant de savoir à ce moment ce que la culture dans son ensemble a pu prélever. Une analyse du NPK disponibles du sol a également été effectuée pour mesurer la quantité d'éléments encore disponibles à ce moment-là pour la culture du pois à implanter, pour la continuité du trèfle ou pour celle qui est à risque d'être perdue dans les parcelles sans EV. Par la suite, dans les parcelles principales avec trèfle et pois, juste avant leur enfouissement le 5 novembre, la biomasse aérienne produite a été mesurée (quadrats 1 m<sup>2</sup>) et les quantités de N, P, K, Ca et Mg enfouis calculées. Enfin, le NO<sub>3</sub> résiduel a été dosé pour voir si certains traitements sont plus à risque de générer des pertes de NO<sub>3</sub> dans l'environnement.

### 2.3.2 Année maïs-grain

Dès le printemps 2016, le sol a été caractérisé (20 avril 2016) et les contenus en NPK disponibles dosés afin de mesurer l'impact de la présence ou non des EV et du FPA sur ces éléments au moment qui servirait normalement à évaluer les besoins en engrais de la culture en conditions de production. Par la suite, au stade post-émergence, soit juste avant l'épandage du LP, le 30 juin, dans les parcelles devant en recevoir, le NO<sub>3</sub> du sol a été dosé dans



toutes les SP. Cette mesure a été ciblée car elle a été reconnue au Québec comme étant celle la mieux corrélée avec la variabilité des rendements et des doses économiques de N à apporter dans la culture du maïs (Nyiraneza et coll. 2010). À la même occasion, le PK disponibles du sol a aussi été mesuré. Il a ainsi été possible de voir les effets de l'application des GFV et du FPP au semis sur le contenu en NPK disponibles du sol quelques temps après leur apport. Une mesure de la biomasse aérienne a également été réalisée. Plus tard en saison, à l'apparition des soies (3 août), le statut nutritionnel du maïs a été évalué (feuille à l'opposée et sous l'épi), de même que le contenu en NPK disponibles du sol. Une mesure de la biomasse aérienne, ainsi que des prélèvements totaux ont également été mesurés. De plus, à ce moment, le taux d'activité biologique du sol a été évalué (activités uréase et phosphatases acides et alcalines, respiration microbienne [ $\text{CO}_2$  NaOH 1N], pouvoir de minéralisation du No et Po [incubation aérobie 10 jours],  $\text{C}_{\text{eau}}$  labile, C et N microbien). Lors de la récolte, le 1<sup>er</sup> novembre, les rendements en tiges et en grains ont établis sur 8 m linéaire/parcelle (2 rangs X 4 m linéaire), ainsi que les prélèvements totaux en nutriments (grains et tiges). Enfin, comme pour l'automne précédent, le  $\text{NO}_3$  résiduel a été dosé (3 profondeurs) le 9 novembre.

### 2.3.3 Année soya

Les mesures de la 3<sup>ème</sup> année visaient principalement à voir les arrières-effets éventuels des EV et EF puisqu'aucune matière fertilisante n'a été apportée. Tel que par les années antérieures, le sol a été caractérisé et les contenus en NPK disponibles du sol ont été dosés dès le printemps (27 avril 2017) pour voir la présence d'éventuels arrières-effets des EV et EF. Une seule fois en milieu de saison, à la floraison (18 juillet), les contenus en NPK disponibles et le taux d'activité biologique (respiration microbienne, pouvoir de minéralisation du No et Po, C labile) du sol ont été évalués. La biomasse aérienne, les prélèvements totaux, ainsi que le statut nutritionnel des plants (première floraison, première feuille trifoliée pleinement développée) ont aussi été mesurés. Lors de la récolte (28 septembre), les mesures de rendements en biomasse et en grains, ainsi que le classement des grains ont été réalisés (2 rangs X 7 m linéaire). De plus, les prélèvements totaux (grains et biomasse) ont été établis. Une dernière fois, le  $\text{NO}_3$  résiduel du sol a été dosé le 10 octobre.

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

En 2016 (année maïs), 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  $\text{NO}_3$ ,  $\text{NH}_4$  et  $\text{PO}_4$  se rendant jusqu'à elles. Ainsi, trois paires de MEI anioniques (N- $\text{NO}_3$  et  $\text{PO}_4$ ) et cationiques (N- $\text{NH}_4$ ) ont été insérées par parcelles de façon à couvrir verticalement le milieu de la strate 0-20 cm de sol. Les MEI étaient laissées au champ pour une période de deux semaines et par la suite échangées pour de nouvelles et ce pour 11 périodes consécutives, du 19 mai au 20 octobre. Étant donné le suivi continu, il a été possible de déterminer la dynamique (temps et intensité) des ions  $\text{NO}_3$ ,  $\text{NH}_4$  et  $\text{PO}_4$  du sol sur la saison avec chacune des combinaisons de traitement. Les analyses ponctuelles de sol demeuraient toutefois nécessaires car les MEI mesurent des intensités ( $\mu\text{g cm}^{-2}$  2 semaines<sup>-1</sup>) et ne permettent pas d'établir des charges par hectare ( $\text{kg N ha}^{-1}$ ).

## 2.5 CARACTÉRISATION DES ENGRAIS DE FERME

Tous les engrais de ferme 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  $\text{pH}_{\text{eau}}$ , le taux de matières sèches à 105 °C (MS) et le taux de MO. Le  $C_{\text{total}}$  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). Le  $N_{\text{total}}$  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  $N_{\text{total}}$  (NTK +  $\text{N-NO}_3$ ) (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 ( $P_{\text{HCl}}$ ) (Salomons et Gerriste 1981), puis déterminé par colorimétrie automatisée Technicon. Le  $\text{N-NO}_3$  et le  $\text{N-NH}_4$  ont été extraits au KCl 2M (Isaac et Johnson 1976), puis déterminés par colorimétrie automatisée Technicon. Également le P labile ( $P_{\text{eau}}$ ) 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. L'ISB est intéressant car il détermine la proportion du carbone d'un AEO qui se retrouvent dans 4 fractions, de soluble à très résistante (Linères et Djakovitch 1993, Robin 1997). Ceci permet de calculer un indice de la facilité avec laquelle le C et le N organique ( $N_o$ ) totaux d'un AEO seront minéralisés. Il est donc plus utile pour comparer des AEO d'origines diverses que le seul rapport C/N car ce dernier n'est basé que sur les contenus totaux en N et C et ne tient pas compte de leur nature biochimique. Le C/N est donc beaucoup moins corrélé au N potentiellement minéralisable d'un AEO que son ISB (Nduwamungu 2006).

## 2.6 ANALYSE ÉCONOMIQUE

Pour comparer les différentes combinaisons d'EF et d'EV, une analyse de marge sur coûts variables (MCV) a été sélectionnée. La MCV est le résultat de la différence entre les revenus de production et les coûts variables. Dans le cadre du projet, le revenu a été calculé pour chacune des trois cultures (blé, maïs-grain, soya). Les revenus correspondent aux ventes de grains, soit le rendement obtenu multiplié par le prix de vente unitaire du grain sur le marché. Pour chacune des cultures, les prix de vente unitaires provenaient des *Références économiques* du CRAAQ.

Les coûts variables quant à eux étaient regroupés en :

- Coûts d'implantation des EV (approvisionnement en semences, opérations culturales propres à l'EV);

- Coûts des fertilisants organiques (achat<sup>1</sup>, coût de l'épandage et d'incorporation);
- Coûts associés à chaque culture (approvisionnement en semence, opérations culturales, mise en marché<sup>2</sup> et autres coûts<sup>3</sup>).

Sur la base de tous ces éléments, le calcul de la marge sur coûts variables a été faite pour l'ensemble de la rotation :

$$\begin{aligned}
 MCV_{rotation} = & Revenu_{blé} + Revenu_{maïs-grain} + Revenu_{soya} - (coûts\ d'implantation_{trèfle} \\
 & + coûts\ d'implantation_{pois\ fourrager} + coûts\ de\ fertilisation_{GFV2015} \\
 & + coûts\ de\ fertilisation_{FPA2015} + coûts\ de\ fertilisation_{FPP2016} + coûts\ de\ fertilisation_{GFV2016} \\
 & + coûts\ de\ fertilisation_{LP2016} + coûts_{blé} + coûts_{maïs-g} + coûts_{soya})
 \end{aligned}$$

Avec *GFV2015* : les granules de fumier de poulet mis à l'automne 2015; *FPA2015* : le fumier de poulet mis à l'automne 2015; *FPP2016* : le fumier de poulet mis au printemps 2016; *GFV2016* : les granules de fumier de poulet mis au printemps 2016 et *LP2016* : le lisier de porc mis en été 2016.

Pour les coûts unitaires de la fertilisation<sup>4</sup>, des semences, des opérations culturales, en plus des budgets à l'hectare des cultures, les références économiques du CRAAQ sur le prix des grains de semences, les coûts d'utilisation et taux à forfait suggérés de la machinerie et la valeur de remplacement engrais de ferme ont été exploitées. Les coûts de mise en marché et autres coûts associés à chacune des cultures proviennent respectivement du budget à l'hectare de la culture (AGDEX) fournis dans les références économiques du CRAAQ.

<sup>1</sup> Le coût de transport des fertilisants organiques n'est pas pris en compte dans le budget. La méthode est similaire à celle des budgets pour les grains biologiques fournis dans les références économiques du CRAAQ.

<sup>2</sup> Les frais de mises en marché prennent en compte l'entreposage, le séchage des grains, le criblage (pour le blé et le soya), le plan conjoint, l'analyse qualité (juste pour le blé, obligatoire pour la classification pour l'alimentation humaine) et le transport hors ferme.

<sup>3</sup> Les autres coûts regroupent les fais pour l'ASRA (juste pour le blé), l'ASREC, l'intérêt à court terme, la certification biologique.

<sup>4</sup> Seul le prix unitaire des granules de fumier de volaille a été obtenu d'une communication avec Mme Marie-Thérèse Thibault le 31 Janvier 2018.

## 3 RÉSULTATS ET DISCUSSION

### 3.1 CARACTÉRISATION DES ENGRAIS VERTS ET DES ENGRAIS DE FERME

En 2015, les rendements moyens en biomasse des engrais verts (EV) ont été inférieurs aux attentes (Tableau 1 et Figure 3). Ceci s'est traduit par une fourniture calculée en N total rendue possible pour fertiliser le maïs de 23 et 18 kg N ha<sup>-1</sup> (21 et 14 kg N<sub>efficace</sub> ha<sup>-1</sup>) par le pois et le trèfle, respectivement (Tableau 1), au lieu des 50 kg N ha<sup>-1</sup> qui étaient attendus selon la littérature. Les apports d'engrais de ferme (EF) d'automne (fumier de poulet à griller (FPA)) ont toutefois été maintenus à 100 kg N<sub>eff</sub> ha<sup>-1</sup> tel que prévu au protocole sur la base théorique que les EV fourniraient 50 kg N<sub>eff</sub> ha<sup>-1</sup>. Le choix de ne pas dépasser des apports de 100 kg N<sub>eff</sub> ha<sup>-1</sup> s'est appuyé également sur le fait qu'un producteur étant aux prises avec une limitation d'apport d'EF due à une richesse en P du sol (contexte de base de l'essai) ne pourrait pas hausser significativement ses apports de fumier. Ainsi, tel que prévu, les autres EF à mettre au printemps 2016 (FPP, GFV et LP) ont également été apportés pour fournir 100 kg N<sub>eff</sub> ha<sup>-1</sup>. Cela garantissait donc que les différentes fertilisations animales demeuraient comparables entre elles, selon leur nature et leur temps d'application, et non sur la quantité apportée de N<sub>eff</sub>. Par ailleurs, il demeure que l'apport global en N n'a été finalement que légèrement inférieur à celui recommandé pour le maïs-grain (121 et 114 kg N ha<sup>-1</sup> vs 150 kg N ha<sup>-1</sup>) selon l'EV considéré. La caractérisation des EF présentée au Tableau 1 montre également que tous les EF ont un ratio N<sub>eff</sub>/P<sub>tot</sub> près de 7 fois inférieur à celui des EV. Plus le ratio N<sub>eff</sub>/P<sub>total</sub> est bas, plus son emploi en sol riche en P est limité puisqu'il apporte beaucoup plus de P pour satisfaire un même besoin en N. Au contraire, les EV sont pour leur part beaucoup plus riches en N qu'en P. L'étude du ratio C/N et de l'ISB des engrais de ferme démontre également que les GFV et le LP ont les valeurs les plus faibles et donc qu'ils se minéraliseront beaucoup plus rapidement que le fumier de poulet qui possède les valeurs les plus élevées. Le fumier de poulet possède également une part beaucoup plus grande de son carbone dans les fractions plus résistantes, comparativement au GFV qui se minéraliseront donc plus rapidement. Ceci explique pourquoi des quantités de 200 kg N<sub>total</sub> ha<sup>-1</sup> ont dû être apportées avec le fumier de poulet vs. 140-160 kg N<sub>total</sub> ha<sup>-1</sup> avec les autres, pour s'assurer d'avoir 100 kg N<sub>eff</sub> ha<sup>-1</sup> pour la fertilisation du maïs (CRAAQ 2010) (Tableau 1).

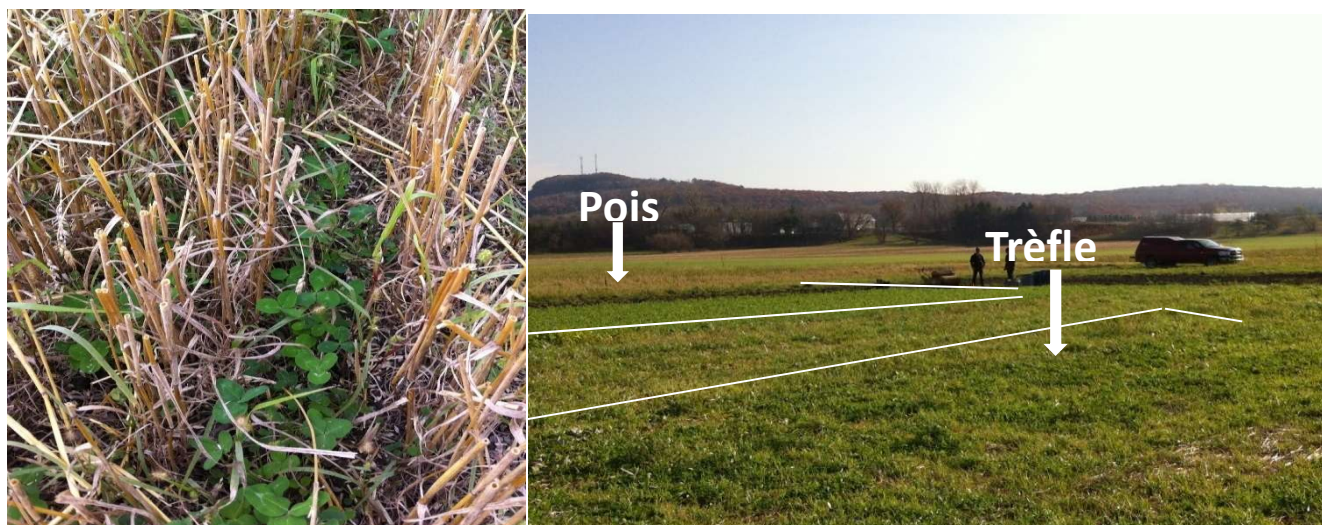
**Tableau 1. Caractérisation biochimique, biomasses et apports d'éléments fertilisants des engrais verts et des engrais de ferme.**

Engrais	Biomasse	N <sub>total</sub>	N <sub>eff</sub> <sup>1 2</sup>	P <sub>total</sub>	K <sub>total</sub>	N <sub>eff</sub> /P <sub>total</sub>	C/N	Carbone (%)		ISB <sup>3</sup>
	(T ha <sup>-1</sup> ) (b.h.)	-----	(kg ha <sup>-1</sup> ) -----	-----	Soluble			Résistant <sup>3</sup>	%	
Saison 2015										
Trèfle intercalaire	2,0	18	14	1,2	9	11,7	11	.	.	.
Pois post-récolte	2,8	23	21	1,9	12	11,0	9	.	.	.
Fumier de poulet (FPA)	8,4	234	100	68	116	1,47	15	45	35	nd
Saison 2016										
Fumier de poulet (FPP)	7,6	201	100	76	144	1,32	12	43	50	45
Granules de fientes de volaille (GFV)	3,8	158	100	61	93	1,64	7,5	72	9	10
Lisier de porc (LP)	25,0	142	100	45	82	2,22	4,5	.	.	.

<sup>1</sup> Engrais verts: Jobin et Douville (1996) dans Duval et coll. (2014)

<sup>2</sup> Engrais de ferme: CRAAQ (2010)

<sup>3</sup> Fractions selon la méthode ISB. Résistant = Lignine + cellulose brute.



**Figure 3.** Apparence du trèfle intercalaire après la récolte du blé, le 24 août 2015 (gauche) et du trèfle et du pois fourrager juste avant l'enfouissement le 5 novembre 2015 (droite).

### 3.2 BLÉ (2015)

Les rendements en blé ont été très intéressants pour la production biologique (Figure 4). L'année 2015 a d'ailleurs été profitable en général pour la croissance du blé en Montérégie. L'Institut de la statistique du Québec (ISQ 2018) a mesuré des rendements moyens en blé conventionnel de 4 T ha<sup>-1</sup> en 2015, ce qui est comparable aux rendements obtenus dans l'essai avec un taux d'humidité moyen de 14 %. Les rendements en grains (b.h.) n'étaient pas significativement différents en fonction des EV ( $P = 0,4384$ ) ce qui signifie que la culture intercalaire de trèfle n'a pas fait compétition à la culture, mais qu'elle n'a pas non plus aidé, en fournissant plus de N par exemple. Pourtant, au stade de fin tallage, la couche utile de sol (0-20 cm) des parcelles de trèfle tendait ( $P = 0,1212$ ) à contenir plus de N-NO<sub>3</sub> (22 % plus) que les sols des parcelles témoins et de pois (identiques à ce stade aux parcelles témoins puisque le pois a été semé en post-récolte). Les biomasses de pailles (moyenne de 3 T/ha) étaient aussi similaires ( $P = 0,2367$ ). Pour les prélèvements totaux en N par la culture, la présence du trèfle intercalaire n'a pas non plus eu d'impact ( $P = 0,4020$ ). Au total, le blé de toutes les parcelles a prélevé en moyenne 78 kg N ha<sup>-1</sup> (grains + pailles) pour des besoins de référence de 90 kg N ha<sup>-1</sup> (CRAAQ 2010) (Figure 5). À noter que la partie exportée de N qu'il faut viser remplacer par la fertilisation atteignait 64 kg N ha<sup>-1</sup>. La qualité boulangère du blé quant à elle ne semble pas avoir été affectée par le trèfle, les analyses sont présentées à l'Annexe A.



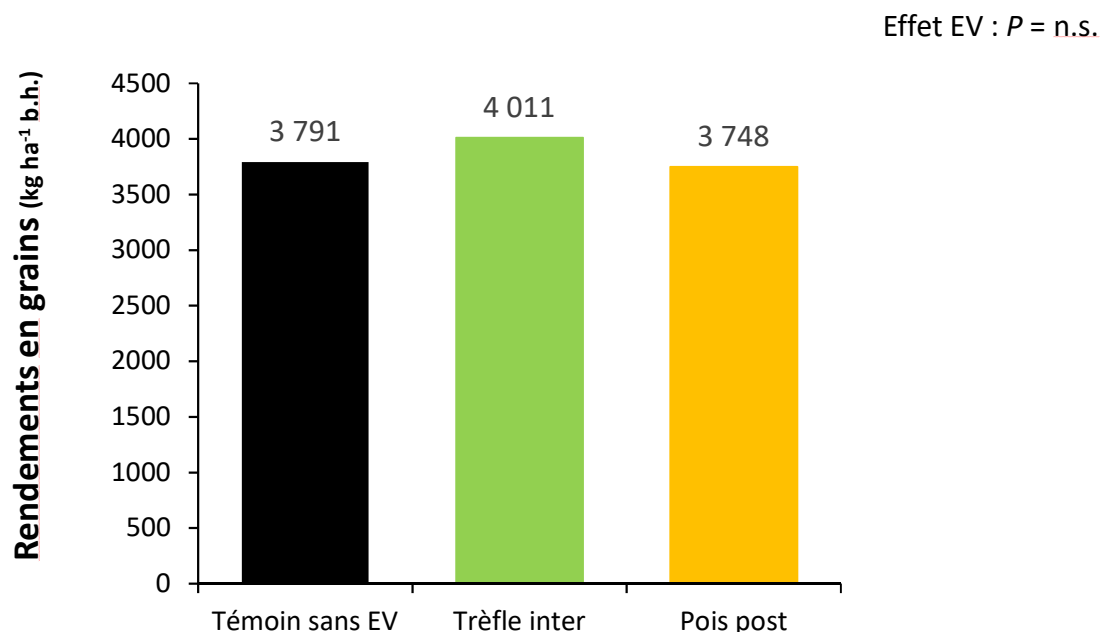


Figure 4. Rendements en grains de blé (14 % hum.) en fonction des engrais verts, le 21 août 2015.

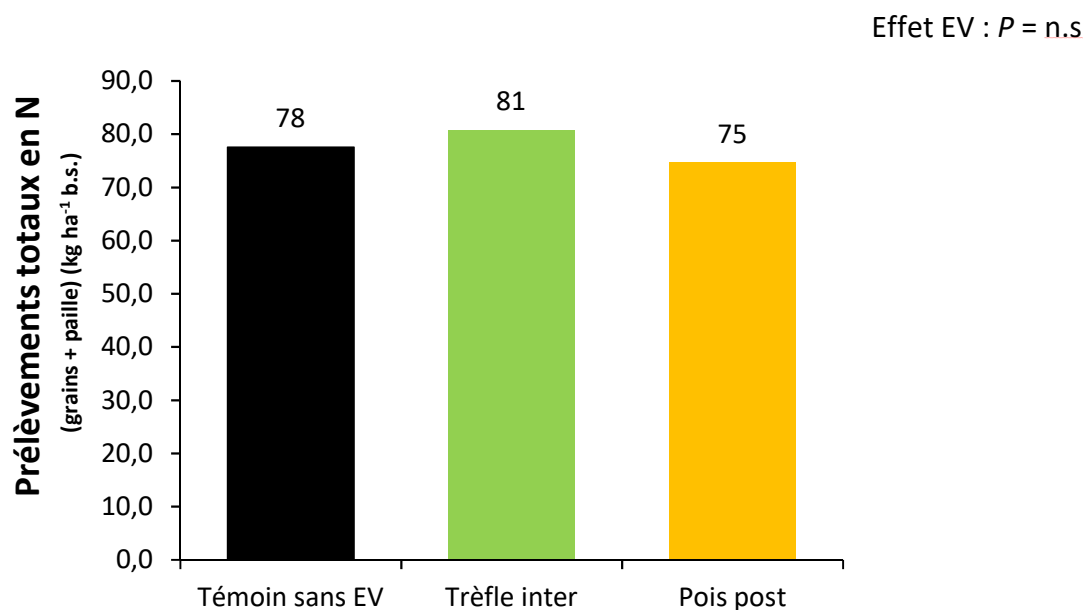
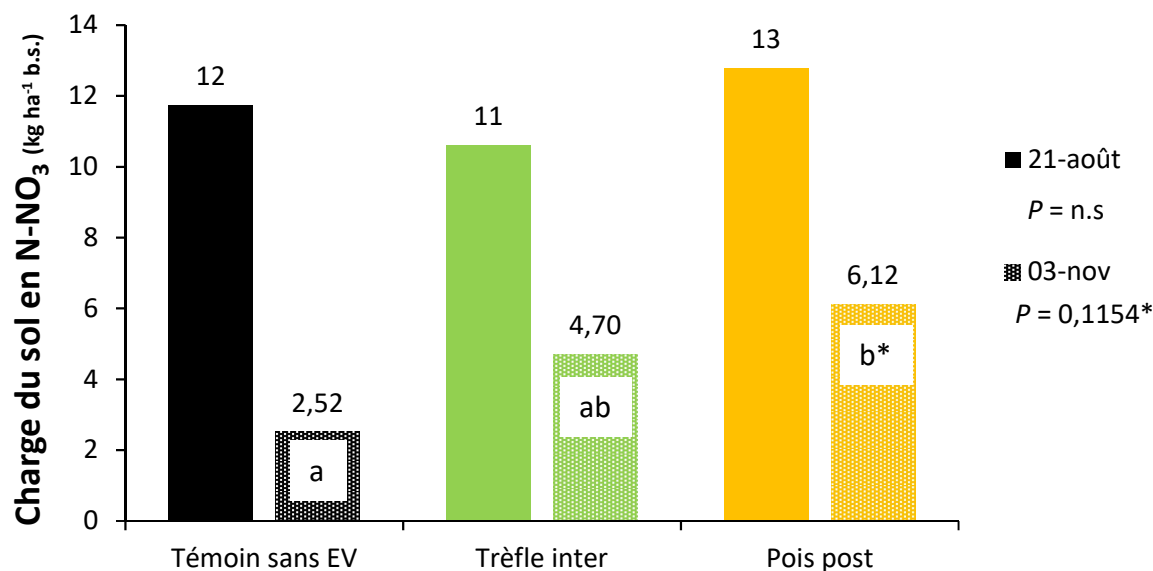


Figure 5. Prélèvements totaux (grains et pailles) en N du blé en fonction des engrais verts, le 21 août 2015.

Lors de la récolte de blé (21 août 2015), juste avant les semis du pois, les charges en nitrate ( $N-NO_3$ ) du sol de tous les traitements étaient similaires et peu élevées (Effet EV à  $P = 0,3357$ ), variant entre 11 et 13 kg  $N-NO_3$  ha<sup>-1</sup> (Figure 6). En automne, juste avant l'enfouissement des EV, même si les charges étaient toujours peu élevées, les sols des

traitements de pois et de trèfle avaient tout de même des charges en N-NO<sub>3</sub> qui tendaient (Effet EV à  $P = 0,1154$ ) à être plus élevées que celles de la parcelle témoin (sans EV), de l'ordre de 2,4 et 1,9 fois supérieures, respectivement. La présence de la couverture d'EV, surtout du pois a donc permis de conserver une plus grande concentration de N-NO<sub>3</sub> dans la couche supérieure de sol 0-20 cm que le traitement témoin laissé à nu. Il se peut aussi que ces légumineuses aient enrichi le sol en N par leurs exsudats racinaires.



**Figure 6.** Contenu du sol (strate 0-20 cm) en N-NO<sub>3</sub> à la récolte du blé le 21 août et juste avant l'enfouissement des engrais verts, le 3 novembre 2015. Les valeurs avec des lettres distinctes sont significativement différentes au seuil  $P < 0,1$ .

### 3.3 MAÏS-GRAIN (2016)

#### 3.3.1 Analyses ponctuelles du sol

Au printemps 2016, avant les semis du maïs-grain et les apports d'EF de printemps, l'analyse de sol des parcelles d'EV n'ayant pas reçu de FPA montrait que leurs contenus en nitrate étaient similaires à ceux mesurés à l'automne 2015 dans ces mêmes parcelles. À l'inverse, le contenu en N-NO<sub>3</sub> était 1,8 fois plus élevé au printemps qu'à l'automne dans les parcelles témoin sans EV (Tableau 2). Ainsi au printemps 2016, les sols de toutes les parcelles sans EF, avec ou sans EV enfouis, présentaient des contenus en nitrate similaires. Le sol des sous-parcelles ayant reçu les apports de FPA en automne présentait, cependant, des concentrations en moyenne 2,2 fois plus élevées (non analysé statistiquement) que celles des sous-parcelles n'ayant pas encore reçu d'EF (Tableau 2). Ainsi, il y avait en moyenne 9 kg de N<sub>efficace</sub>/ha sous forme de nitrate de plus suivant l'apport de FPA.

**Tableau 2. Contenu du sol en N-NO<sub>3</sub> (kg ha<sup>-1</sup> b.s) au printemps 2016 (20 avril), en fonction des engrais verts et de l'engrais de ferme (fumier de poulet à griller) incorporés à l'automne 2015.**

	Témoin	Trèfle inter	Pois Post
Sous-parcelle avant apport d'engrais de ferme de printemps	6,96	8,22	6,77
Sous-parcelle avec fumier de poulet à griller apporté à l'automne 2015	14,05	14,42	19,22

*Aucune analyse statistique*

Le suivi plus tard en saison aux stades post-émergence (avant l'apport du lisier (30 juin)) et apparition des soies (3 août) (Figure 7), tant sur le nitrate, que sur les contenus en P et K disponibles (formes solubles à l'eau), démontrent que ce sont surtout les EF qui ont modifié la disponibilité de ces éléments et cela, sans interaction avec les EV (Tableau 3 et 4). En ce qui a trait aux EV, il y avait une faible tendance à plus de nitrate dans les sols avec EV (2 à 5 kg N-NO<sub>3</sub>/ha de plus;  $P = 0,2065$ ), comparativement au sol témoin. Toutefois, au stade soie, plus aucun effet n'était mesurable. Au 30 juin, les EV ont également montré un effet significatif sur les charges de  $P_{eau}$  alors que les parcelles de pois présentaient des charges 10 % plus importantes en PO<sub>4</sub> disponible que celles des parcelles de trèfle et témoins (tous EF confondus) (Tableau 3). Ceci pourrait être dû au fait que le pois apportait plus de P que le trèfle via sa biomasse (Tableau 1). Toutefois, cela est peu probable car les quantités restaient très faibles comparativement aux EF. De plus, au stade soie, c'est à la fois dans les parcelles de pois et de trèfle que le  $P_{eau}$  semblait le plus élevé comparativement aux parcelles témoin, avec un écart de 25 %. Cependant, malgré cet écart important, la différence sort non statistiquement significative à  $P = 0,26$  (Tableau 4). Dans la littérature, un effet des EV sur la hausse de la disponibilité du P des fractions les plus labiles (phosphates (PO<sub>4</sub>) en solution du sol) a toutefois déjà été rapporté. Celui-ci serait dû à la présence accrue d'anions organiques dans le sol qui font compétition pour les mêmes sites d'adsorption que ceux fixant le PO<sub>4</sub> disponible en solution du sol. Le PO<sub>4</sub> peut donc y demeurer plus longtemps ou en plus grande concentration (Nziguheba et al 2016). Dans notre étude, il ressort aussi que les EV peuvent hausser le  $P_{eau}$  du sol aux mêmes concentrations que les EF pour des apports de  $P_{total}$  30-50 fois inférieurs et l'atteinte de teneurs foliaires en P adéquates (données non montrées). Ainsi, pour un sol à 6 % ISP comme dans cette étude (Annexe B), il n'était pas nécessaire d'apporter des quantités de P de l'ampleur de celles apportées par les EF.

Au niveau du K, aucun effet des EV n'a été mesuré. Cependant, au 30 juin (LP non appliqué), les EF ont haussé les contenus en tous les éléments par rapport au témoin sans EF. La hausse de N-NO<sub>3</sub> est moins forte dans les parcelles de FPA (1,5 x) que dans celles de FPP et GFV (2,8 x) (Tableau 3). Cette observation concorde avec ce que suggèrent les flux mesurés par les MEI (voir section 3.3.2). L'effet sur le  $P_{eau}$  est moins prononcé avec une hausse équivalente de 1,2x dans les parcelles FPA et FPP, comparativement au témoin qui est similaire aux parcelles de GFV. Les hausses de  $K_{eau}$  sont de même ampleur que celle du  $P_{eau}$ , mais c'est le FPP qui fait augmenter le plus le  $K_{eau}$  (1,4 x) comparativement au témoin, alors que le FPA et les GFV augmentent le  $K_{eau}$  de 1,2 x. Plus tard en saison, le 3 août, les charges en N-NO<sub>3</sub> sont encore plus élevées dans les parcelles d'EF que dans le témoin. Le lisier épandu plus récemment présente la plus forte hausse (2,4 x), suivi du FPP et des GFV (2,0 x), puis du FPA

présentant la moins grande différence (1,4 x), comparativement au témoin. Il est intéressant également de constater que le FPA rend disponible 5,3 kg N-NO<sub>3</sub> ha<sup>-1</sup> de plus que le sol sans EF (Tableau 4). Le lisier incorporé en post-émergence permet pour sa part la fourniture de 17 kg N-NO<sub>3</sub> ha<sup>-1</sup> de plus à un moment charnière dans la nutrition du maïs. À la même date, les mesures des flux de N-NO<sub>3</sub> corroborent ces résultats (voir section 3.3.2). Au niveau du P<sub>eau</sub>, tous les EF ont un effet similaire, avec un contenu 22 % plus élevé dans ces parcelles que celle du sol sans EF. En ce qui a trait au K<sub>eau</sub>, la hausse est beaucoup moins marquée quel que soit l'EF (entre 5-15%), avec en ordre croissant d'effet les GFV > FPP = FPA > LP. Au global, le FPP apparaît comme l'un des EF qui avait les charges en N disponible les plus élevées pendant la saison. Toutefois, lorsque ces analyses sont combinées avec celles des courbes des MEI, les valeurs peuvent être mises en perspective puisque le FPP ne génère jamais les pics de flux de N-NO<sub>3</sub> les plus élevés, contrairement aux FPA, GFV et LP (voir section 3.3.2).



**Figure 7.** Croissance du maïs au stade post-émergence (30 juin 2016 - à gauche) et soie (3 août 2016 - à droite).

**Tableau 3. Contenus du sol en NPK disponibles au stade post-émergence du maïs-grain (avant lisier) en fonction des engrais verts et des engrais de ferme.**

	Charge N-NO <sub>3</sub> Kg ha <sup>-1</sup> b.s				Charge P soluble Kg ha <sup>-1</sup> b.s				Charge K soluble Kg ha <sup>-1</sup> b.s.			
	Sans EV	Trèfle	Pois	$\bar{x}$ EF	Sans EV	Trèfle	Pois	$\bar{x}$ EF	Sans EV	Trèfle	Pois	$\bar{x}$ EF
Témoin	12,5	16,0	18,6	<b>15,7 a</b>	13,8	17,3	18,1	<b>16,4 a</b>	117,7	123,3	133,4	<b>124,8 a</b>
FPA	25,3	25,7	19,9	<b>23,6 b</b>	20,8	18,1	20,5	<b>19,8 b</b>	144,2	154,1	143,5	<b>147,3 b</b>
FPP	35,1	48,0	42,1	<b>41,7 c</b>	19,5	19,4	20,3	<b>19,7 b</b>	159,8	183,7	165,7	<b>169,7 c</b>
GFV	40,7	49,6	43,3	<b>44,5 c</b>	18,1	16,8	20,1	<b>18,3 ab</b>	140,5	155,1	157,2	<b>150,9 b</b>
LP	17,8	15,6	16,1	<b>16,5 a</b>	15,9	16,5	17,3	<b>16,6 a</b>	119,6	128,8	129,8	<b>126,1 a</b>
$\bar{x}$ EV	<b>26,2</b>	<b>31,0</b>	<b>28,0</b>		<b>17,6 a</b>	<b>17,6 a</b>	<b>19,3 b</b>		<b>136,4</b>	<b>149,0</b>	<b>145,9</b>	
Valeurs de P												
EV	0,2065				0,0765				n.s			
EF	< 0,0001				0,0493				0,0004			
EV X EF	n.s				n.s				n.s			

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

Données du 30 juin 2016; Engrais verts (EV) incorporés à l'automne 2015 et engrais de ferme appliqué à l'automne 2015 (FPA) ou au printemps 2016.

**Tableau 4. Contenus du sol en NPK disponibles au stade soie du maïs-grain en fonction des engrais verts et des engrais de ferme.**

	Charge N-NO <sub>3</sub> Kg ha <sup>-1</sup> b.s				Charge P soluble Kg ha <sup>-1</sup> b.s				Charge K soluble Kg ha <sup>-1</sup> b.s.			
	Sans EV	Trèfle	Pois	$\bar{x}$ EF	Sans EV	Trèfle	Pois	$\bar{x}$ EF	Sans EV	Trèfle	Pois	$\bar{x}$ EF
Témoin	11,3	12,4	13,0	<b>12,2 a</b>	24,7	33,5	23,8	<b>27,3 a</b>	152,1	155,0	153,6	<b>153,5 a</b>
FPA	17,8	22,8	12,0	<b>17,6 ab</b>	29,4	35,2	33,6	<b>32,7 b</b>	180,2	178,3	159,6	<b>172,7 bc</b>
FPP	22,5	21,8	29,5	<b>24,6 bc</b>	26,0	35,7	35,2	<b>32,3 b</b>	170,3	171,4	165,5	<b>169,0 bc</b>
GFV	25,9	22,2	22,4	<b>23,5 bc</b>	28,2	30,3	35,2	<b>31,2 ab</b>	147,2	169,5	162,6	<b>159,8 ab</b>
LP	25,8	26,3	35,8	<b>29,3 c</b>	29,2	41,9	38,6	<b>36,6 b</b>	179,0	181,2	171,7	<b>177,3 c</b>
$\bar{x}$ EV	<b>20,7</b>	<b>21,1</b>	<b>22,5</b>		<b>27,5</b>	<b>35,3</b>	<b>33,3</b>		<b>165,7</b>	<b>171,1</b>	<b>162,6</b>	
Valeurs de P												
EV	<i>n.s.</i>				<i>n.s.</i>				<i>n.s.</i>			
EF	<i>0,0131</i>				<i>0,0271</i>				<i>0,0462</i>			
EV X EF	<i>n.s.</i>				<i>n.s.</i>				<i>n.s.</i>			

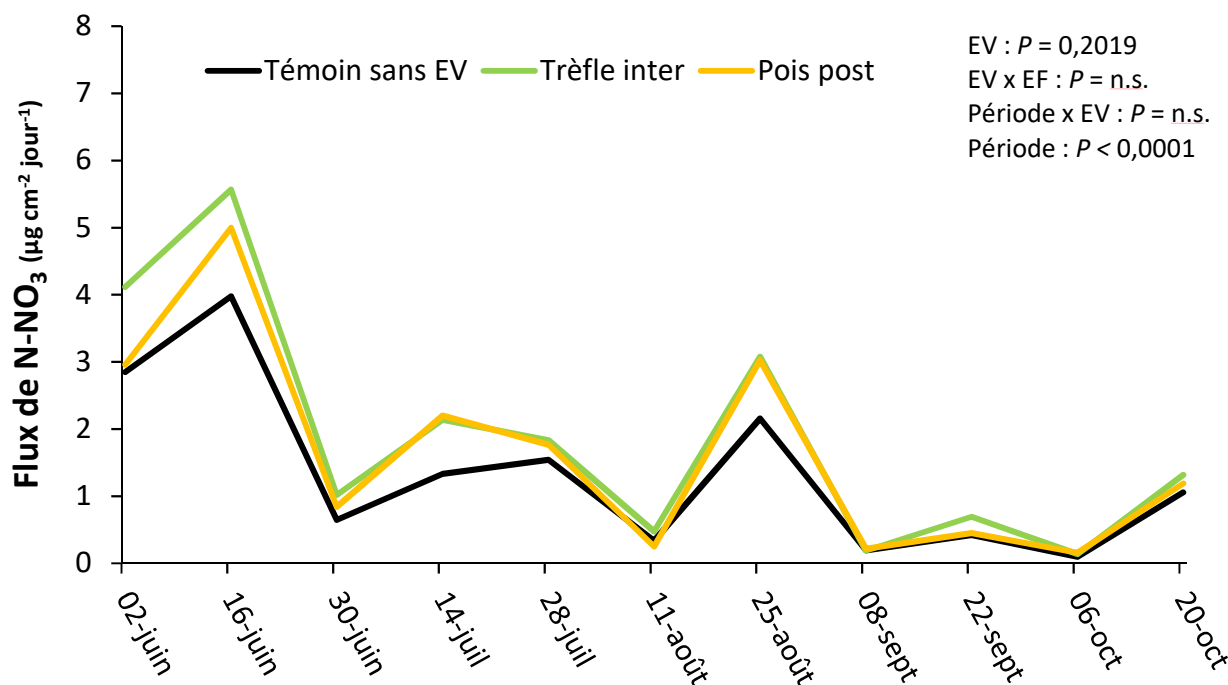
Les valeurs avec des lettres distinctes sont significativement différentes au seuil  $P < 0,1$ .

Données du 3 août 2016; Engrais verts (EV) incorporés à l'automne 2015 et engrais de ferme appliqué à l'automne 2015 (FPA) ou au printemps 2016.

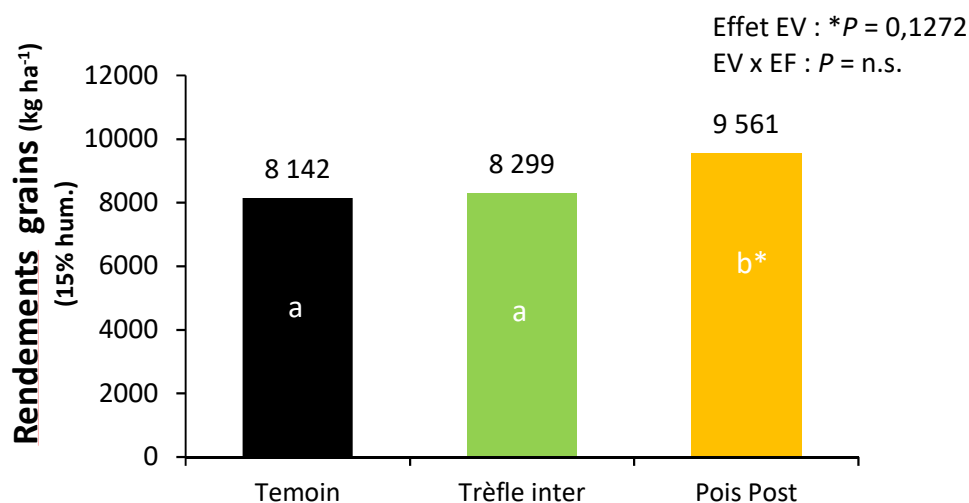
### 3.3.2 Dynamique du nitrate du sol et rendements en grains

Le suivi *in situ* de l'intensité du N disponible du sol (N-NO<sub>3</sub>) à l'aide de membranes d'échange ionique (MEI) a permis également d'expliquer à quels moments pendant la saison les plants ont eu accès à davantage de nitrate. La Figure 8 montre que les apports d'EV tendent ( $P = 0,2019$ ) à hausser le contenu en N disponible du sol par rapport au témoin sans EV. La tendance s'observe à plusieurs moments dans la saison, mais est surtout présente avant le stade post-émergence (30 juin 2016). Même si cet effet n'est pas ressorti significatif au seuil  $P < 0,10$  (Figure 8 :  $P = 0,2019$ ), cela peut certainement expliquer, en partie, que les rendements en maïs aient eu tendance à être 17 % supérieurs (Figure 9;  $P = 0,1272$ ) en présence du pois fourrager, comparativement au témoin. Le pois était d'ailleurs l'EV testé apportant le plus de N (Tableau 1). Le pois fourrager est également le seul traitement d'EV qui a significativement hausser le poids des grains (68 kg hl<sup>-1</sup> vs. ~66 kg ha<sup>-1</sup>;  $P = 0,0928$ ).





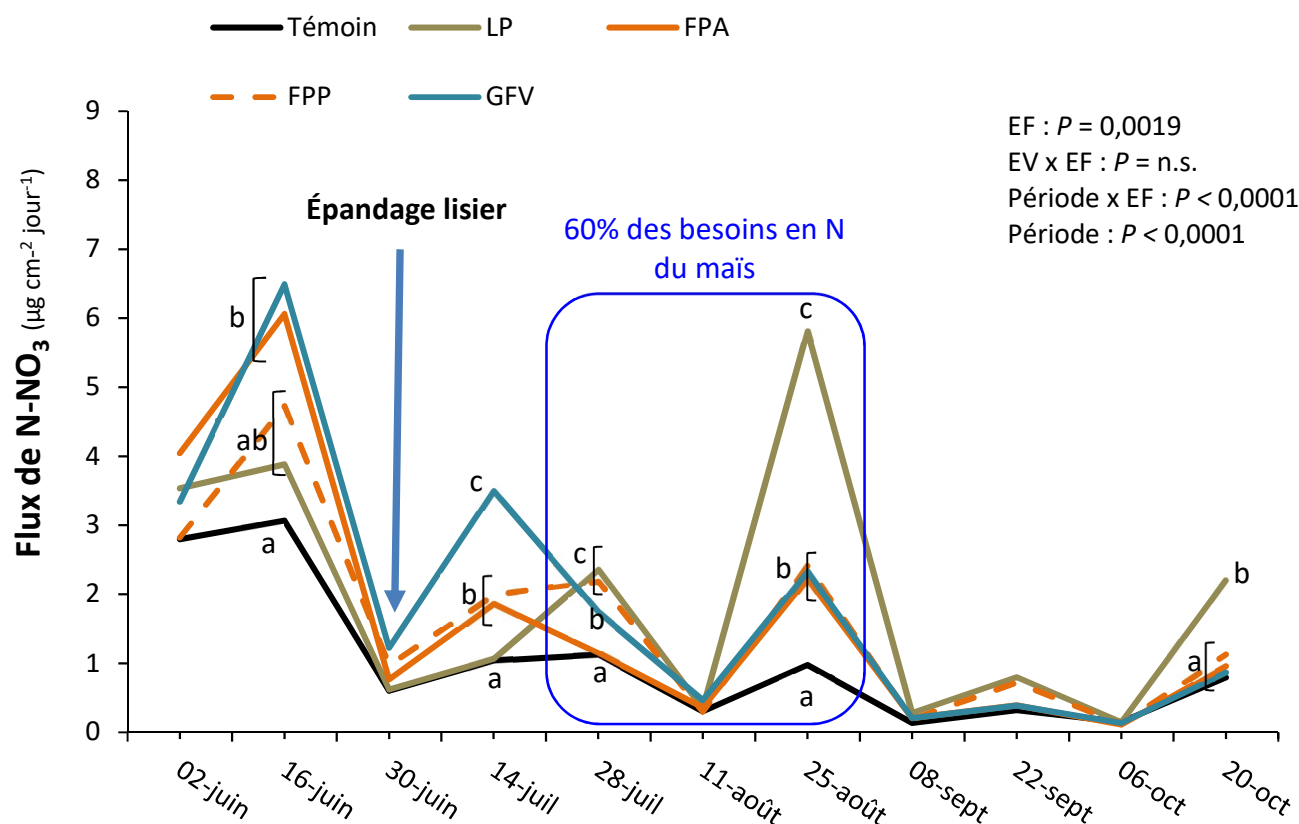
**Figure 8.** Flux de N-NO<sub>3</sub> des membranes d'échange ionique sur la saison 2016 selon les engrais verts d'automne 2015, tous engrais de ferme confondus.



**Figure 9.** Rendement en grains de maïs en fonction des engrais verts (1<sup>er</sup> novembre 2016) tous engrais de ferme confondus. Les valeurs avec des lettres distinctes sont significativement différentes au seuil  $P < 0,1$ .

Les EF ont quant à eux haussé davantage les flux de nitrate en saison que les EV. La nature et le moment d'apports d'EF ont grandement influencé les pics de disponibilité du N-NO<sub>3</sub> du sol. Les GFV, le FPA et le LP sont les EF ayant produit les pics avec le plus d'intensité à une date donnée. Les GFV et le FPA avaient des flux supérieurs dans les

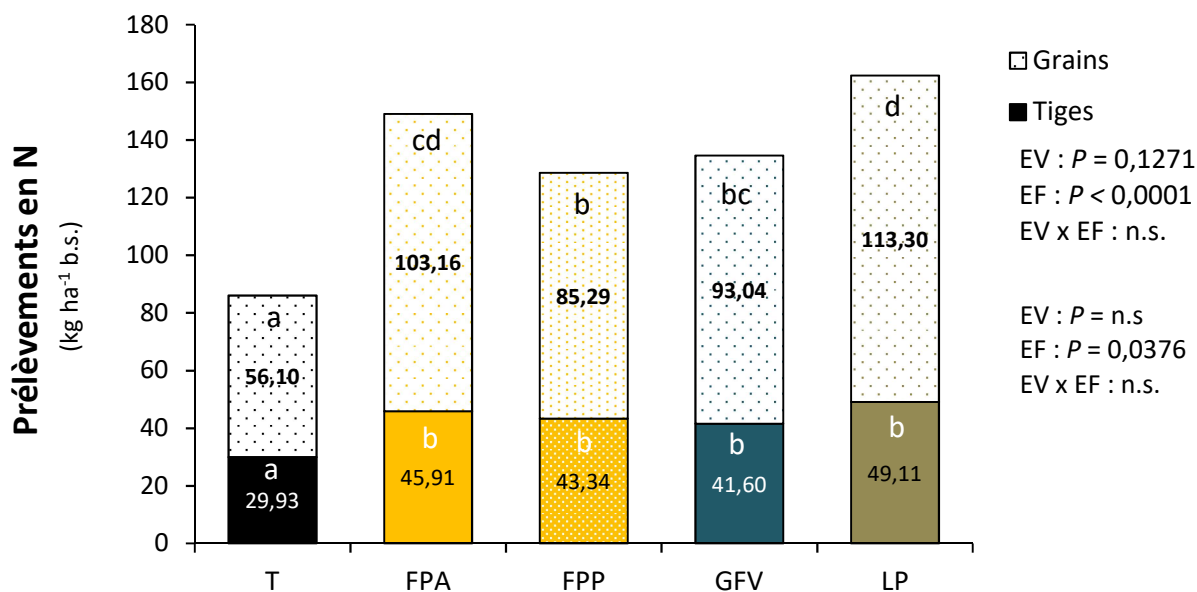
périodes de début de saison se produisant avant la mi-juillet (Figure 10), soit avant la période critique des besoins en N par le maïs-grain. À l'inverse, le LP appliqué en post-émergence (30 juin) a généré le plus haut pic de N-NO<sub>3</sub> dans la fenêtre de besoin critique en N du maïs, soit entre le 28 juillet et le 25 août, alors que le maïs prélèvera 60 % de ses besoins en N (Figure 10). À l'image du LP, comme les GFV ont eu un effet rapide et le plus élevé sur les flux de N-NO<sub>3</sub> dans les périodes suivant leur application, il serait plus avantageux de les apporter plus tard en saison. Ceux-ci pourraient être appliqués en bande au même stade que le LP pour que le relâchement de N-NO<sub>3</sub> arrive pendant la période de forte demande. Enfin le FPP est l'EF qui tout au long de la saison a montré la plus faible intensité en flux de N-NO<sub>3</sub>, l'application à l'automne de cet EF apparaît donc plus judicieuse pour permettre à la minéralisation de se réaliser. Le fumier de type « poulet à griller » n'a en effet que 43 % de son carbone (C) dans la fraction la plus soluble, avec un C/N de 15. À l'opposé, les GFV qui ont minéralisé très rapidement contiennent 72 % de leur C dans la fraction la plus soluble, avec un C/N de 8.



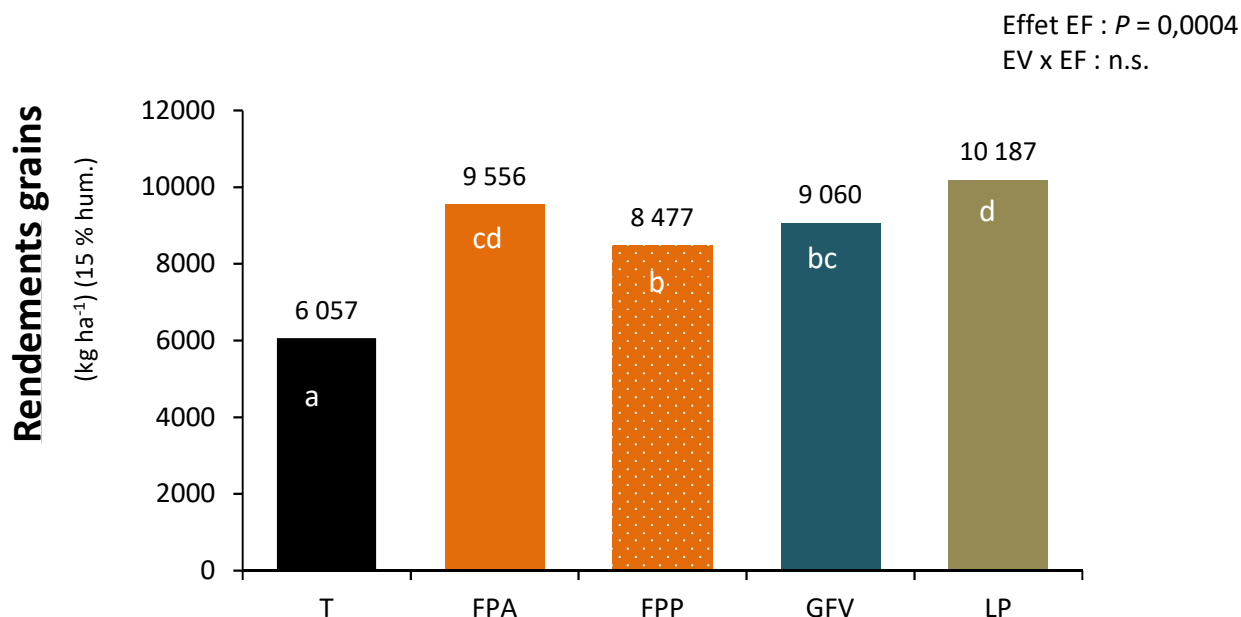
**Figure 10.** Flux de N-NO<sub>3</sub> des membranes d'échange ionique sur la saison 2016 selon la fertilisation des engrais de ferme, tous engrais verts confondus. Les valeurs avec des lettres distinctes sont significativement différentes au seuil  $P < 0,1$ .

Tout comme pour la disponibilité du N en saison en fonction des régies, les prélèvements totaux en N par le maïs-grain ont varié selon la régie testée. C'est le LP qui a permis les meilleurs prélèvements de l'essai, avec 162 kg N ha<sup>-1</sup> (Figure 11). Toutefois, ces derniers étaient non statistiquement différents de ceux obtenus avec le FPA, qui a

permis des prélèvements totaux de 149 kg N ha<sup>-1</sup>. Les GFV, suivi par le FPP ont pour leur part soutenu des prélèvements en N moins importants, avec 135 et 129 kg N ha<sup>-1</sup>, respectivement, mais néanmoins significativement plus élevés que ceux obtenus avec le témoin sans EF (86 kg N ha<sup>-1</sup>). Puisqu'avec tous les traitements d'EF, les prélèvements totaux en N sont plus élevés que ceux obtenus avec le témoin, cela signifie que le site répondait aux apports d'azote et que les effets observés avec les différentes régies sont bien dus aux apports de N. Ainsi les régies qui ont le plus favorisé les prélèvements en N ont également permis l'atteinte des rendements supérieurs de l'essai (Figure 12). Le LP et le FPA (tous EV confondus) ont ainsi donné les rendements les plus élevés avec plus de 9,5 T ha<sup>-1</sup> de grains. Cela démontre donc 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 FPP, soit le même intrant que le FPA mais apporté au printemps, a donné les rendements les plus bas après la régie témoin, malgré des apports en N<sub>eff</sub> équivalents au FPA et à tous les autres EF.



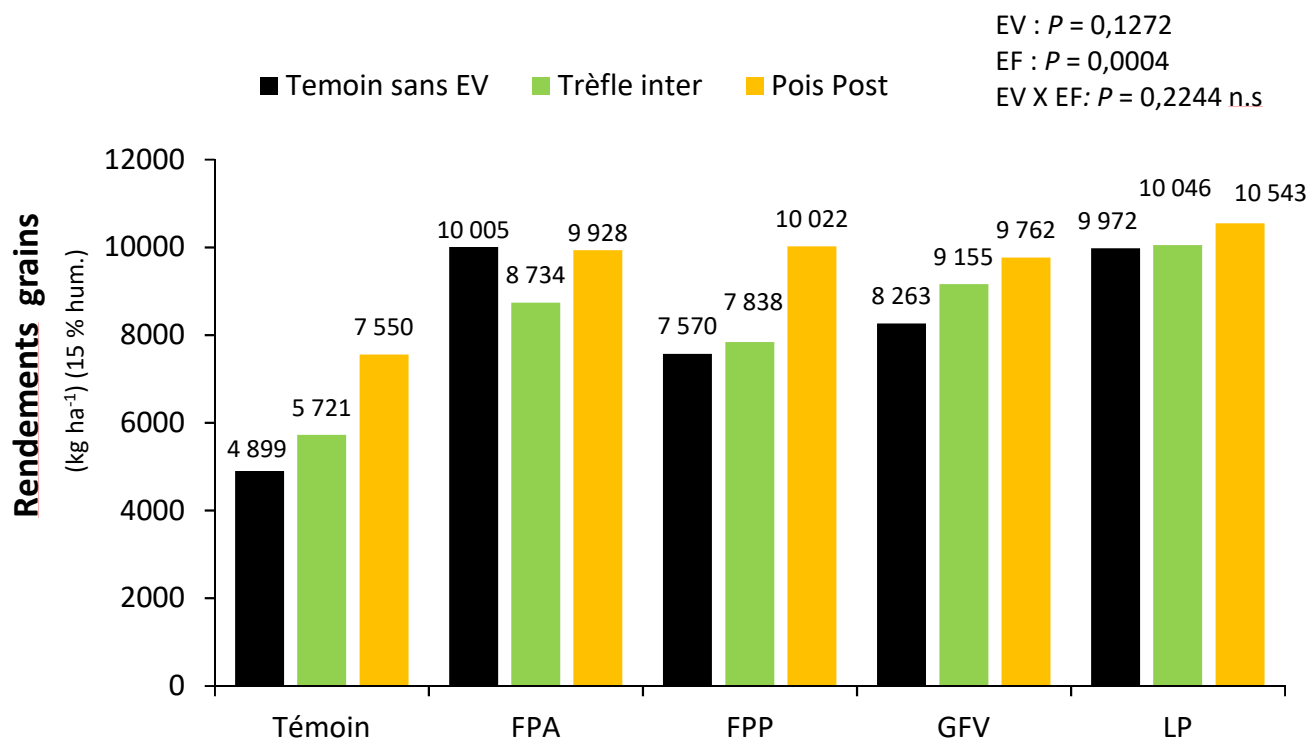
**Figure 11. Prélèvements totaux en azote (N) par les tiges de maïs-grain (pointillé) et les grains (coloré) en fonction des engrais de ferme au 1<sup>er</sup> novembre 2016, tous engrais verts confondus.** Les valeurs avec des lettres distinctes sont significativement différentes au seuil  $P < 0,1$ .



**Figure 12.** Rendement en grains de maïs en fonction des engrais de ferme, le 1<sup>er</sup> novembre 2016, tous engrais verts confondus. Les valeurs avec des lettres distinctes sont significativement différentes au seuil  $P < 0,1$ .

Sur une base annuelle, la comparaison des rendements en maïs-grain obtenus avec les différentes régies d'EV X EF (4,9 à 10,5 T/ha) montrent qu'ils ont été très intéressants pour la production biologique. Les rendements moyens pour le maïs-grain en Montérégie en 2016 ont été évalués à 11 T ha<sup>-1</sup>, tous types de cultures confondus (bio et conventionnel) (ISQ, 2018). Toutefois, en régie biologique, des rendements équivalents ou supérieurs à 7 T ha<sup>-1</sup> sont considérés bons (CRAAQ 2018). Ainsi, seules les régies « témoin sans EV ni EF » et « trèfle seul sans EF » ont donné des rendements inférieurs à 7 T ha<sup>-1</sup> (Figure 13). Les EV ( $P = 0,1272$ ) et les EF ( $P = 0,0004$ ) ont tous les deux modifié les rendements. Dans le traitement témoin sans EF, l'implantation des EV de trèfle ou pois seuls a tout de même permis d'accroître les rendements de 17 % et 54 %, respectivement. Ceci n'est pas négligeable et est très intéressant considérant que leurs apports en N étaient seulement estimés à 14 et 21 kg N<sub>eff</sub> ha<sup>-1</sup>, respectivement. En fait, le pois apporté seul a même donné un rendement égal au FPP apporté seul à une dose de 100 kg N<sub>eff</sub>, soit 7,6 T ha<sup>-1</sup>. Le pois apportait pourtant uniquement 23 kg N<sub>total</sub>/ha, comparativement à 201 kg N<sub>total</sub>/ha pour le FPP, soit 9 fois moins, et cela a un site qui répond fortement à la fertilisation N. Des apports beaucoup plus élevés de P (40 fois) et K (12 fois) ont donc eu lieu avec le FPP, comparativement au pois, sans aucun gains de rendement. Aussi, comme il n'y a pas eu d'interaction significative entre les EV et les EF sur les rendements (Figure 13 :  $P = 0,2244$ ), cela signifie que c'est toujours le pois qui a permis de hausser davantage les rendements en combinaison avec les EF. Avec l'apport de EF seul (sans engrais vert), les rendements les plus intéressants de l'essai ont été obtenus avec une régie de LP ou FPA, tel que déjà observé avec l'analyse des rendements avec tous les EV confondus (Figure 12). Un essai voisin à celui-ci, avec aussi du maïs-grains, avait d'ailleurs montré les mêmes conclusions, le LP appliqué en post-émergence ayant donné les meilleurs rendements

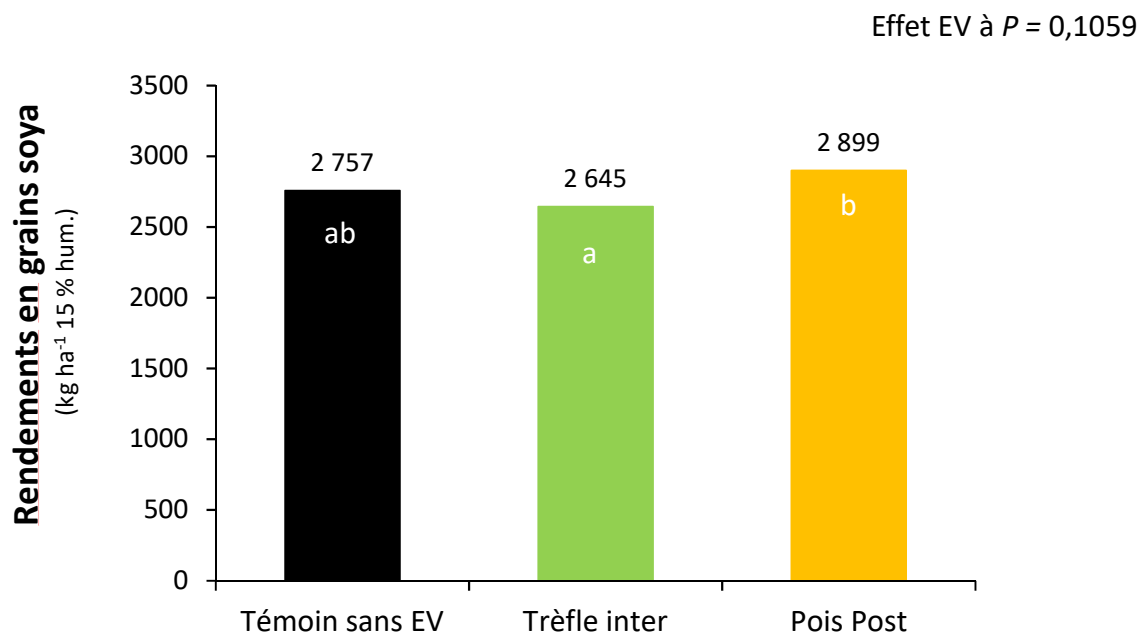
en comparaison des autres EF appliqués en pré-semis grâce à une meilleure synchronisation entre les besoins et les apports (Côté et coll. 2018).



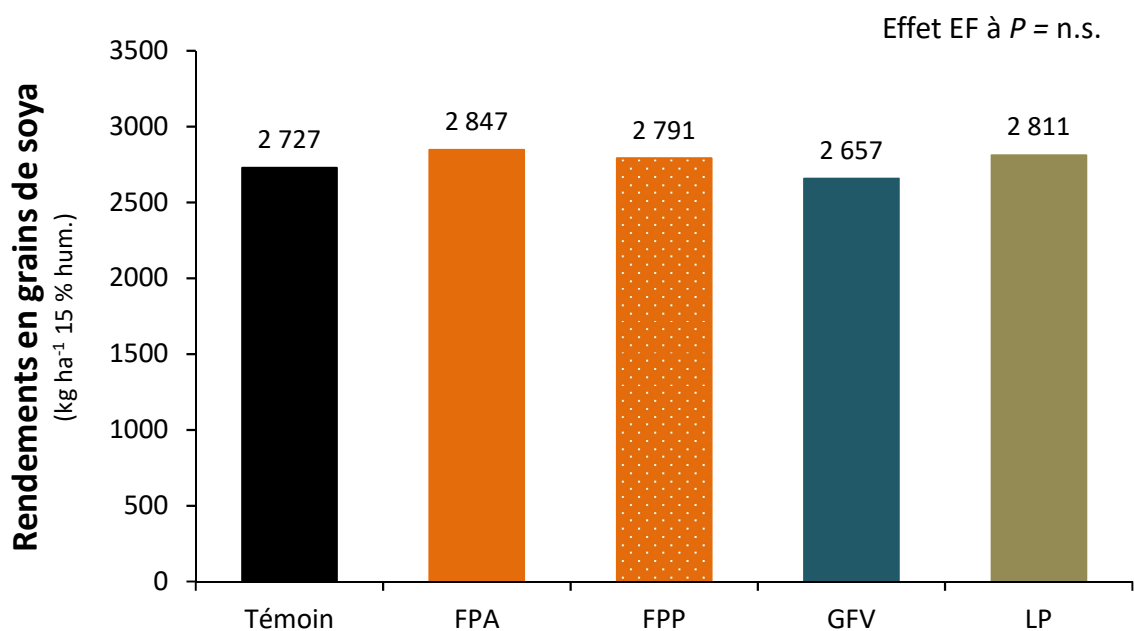
**Figure 13. Rendement en grains du maïs en fonction des engrais verts et des engrais de ferme au 1<sup>er</sup> novembre 2016.**

### 3.4 SOYA (2017)

En 2017, aucun apport d'engrais additionnel à ceux de 2015 et 2016 n'a été réalisé, de sorte qu'il est possible d'évaluer les arrières-effets des différentes régies sur la croissance et les rendements du soya. Globalement les rendements ont été excellents, en moyenne de 2,8 T ha<sup>-1</sup>, soit tout près de ceux obtenus ailleurs en Montérégie en 2017 (bio et conventionnel confondus), qui étaient de 3,1 T ha<sup>-1</sup> selon l'ISQ (2018). Par ailleurs, un arrière-effet des EV 2015 a été mesuré ( $P = 0,1059$ ), avec 10 % plus de rendement dans les sols ayant reçu du pois, comparativement à ceux ayant reçu du trèfle ( $P = 0,0453$ ). Il y avait aussi une faible tendance ( $P = 0,1837$ ) pour 5 % plus de rendement avec le pois que dans les sols sans EV (Figure 14). Les EF quant à eux n'ont eu aucun arrière-effet sur les rendements en soya (Figure 15). Ainsi, deux ans après avoir été incorporé, seul le pois pourrait encore avoir un léger effet positif sur la productivité du soya. Une hypothèse pour expliquer cet avantage pourrait venir du fait que le pois, tout comme le soya, est une culture vivant en symbiose avec les bactéries *Rhizobium* et donc que la présence du pois dans la rotation a pu favoriser une inoculation plus importante du soya par ces bactéries, favorisant ainsi la fixation de N par les racines du soya et occasionner les bénéfices mesurés.



**Figure 14.** Rendement en grains de soya en fonction des engrais verts, le 28 septembre 2017, tous engrais de ferme confondus. Les valeurs avec des lettres distinctes sont significativement différentes au seuil  $P < 0,1$ .





**Figure 15. Rendement en grains de soya en fonction des engrais de ferme, le 28 septembre 2017, tous engrais verts confondus.**

## 3.5 IMPACTS DE LA ROTATION

### 3.5.1 Activité biologique du sol

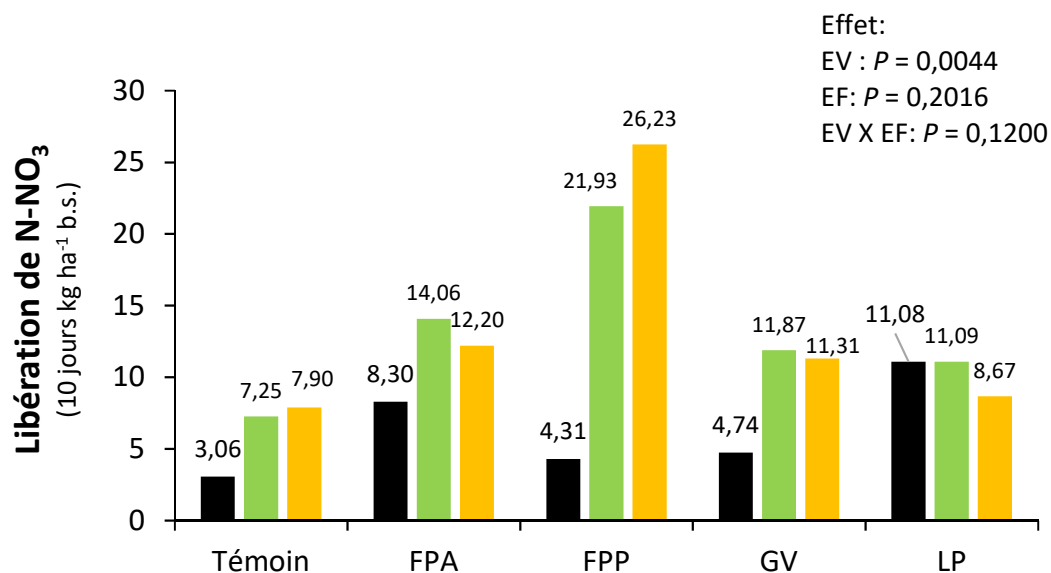
Cette étude visait également à mesurer les effets de la rotation et des différentes régies de fertilisation sur l'activité biologique du sol au stade cible de la croissance du maïs et du soya. Le Tableau 5 présente un résumé de ces effets pour différents indicateurs de l'activité microbienne du sol. De façon générale, il n'y a pas eu d'interaction significative entre les EV X EF, de sorte qu'il est possible d'évaluer l'effet de chacun de manière indépendante (Tableau 5). Suivant leur incorporation, les EV ont influencé plusieurs des paramètres mesurés lors de la 1<sup>ère</sup> année (2016), mais n'avaient plus d'effet significatif après deux ans. Ainsi, à l'été 2016, les EV ont modifié les contenus du sol en C provenant de la biomasse microbienne ( $P = 0,0086$ ). Tous EF confondus, le pois et le trèfle ont haussé de 10 et 3 % le contenu en C microbien du sol, respectivement, en comparaison du témoin sans EV. Ceci indique que la concentration en microorganismes était plus élevée dans ces sols et donne une indication que ceux-ci avaient un potentiel d'activité biologique plus grand que le sol témoin, même si celui-ci n'a pas pu être mesuré par dégagement de  $\text{CO}_2$  (respiration microbienne) lors des incubations de sol en laboratoire. De plus, lors de ces mêmes incubations, l'activité uréase tendait fortement ( $P = 0,1418$ ) à être plus élevée, surtout dans les parcelles de pois (18 % de hausse), indiquant une plus grande activité de libération de  $\text{NO}_3$  par minéralisation du No. En fait, tous EF confondus, les sols des parcelles de pois et de trèfle ont libéré en moyenne deux fois plus de nitrate que le sol témoin sans EV (Effet EV :  $P = 0,0044$ ). Toutefois, si on tient compte de la forte tendance à l'interaction EV X EF ( $P = 0,1200$ ), les sols avec EV ont tous fourni plus de  $\text{N-NO}_3$  que les sols témoin sans EV, parfois jusqu'à 7 fois plus, sauf dans les sols ayant aussi reçu du LP (Figure 16).

En ce qui a trait aux EF, leurs effets sur les paramètres biologiques sont également concentrés lors de la saison 2016 (Tableau 5). Lors de cette saison au cours de laquelle tous les EF ont été apportés, sauf le FPA, les EF ont modifié l'activité de plusieurs enzymes associées à la minéralisation de la matière organique, soit l'uréase et les phosphatases alcaline et acide. Les traitements avec fumier de poulet (FPA et FPP) ont davantage haussé l'activité de phosphatase acide ( $\sim 219,9 \mu\text{g PNP g}^{-1}$ ) que les GFV et le LP qui ont conservé des valeurs similaires au témoin ( $\sim 194,7 \mu\text{g PNP g}^{-1}$ ). Pour la phosphatase alcaline, c'est plutôt le FPP et le LP qui ont montré les activités les plus élevées ( $\sim 342,5 \mu\text{g PNP g}^{-1}$ ), en comparaison des autres traitements d'EF soit, FPA, GV et témoin ( $\sim 311 \mu\text{g PNP g}^{-1}$ ). L'uréase quant à elle a été haussée de 18 % en moyenne avec tous les EF ( $\sim 77,8 \mu\text{g N-NH}_4 \text{ g}^{-1}$ ) en comparaison du témoin sans EF ( $65,5 \mu\text{g N-NH}_4 \text{ g}^{-1}$ ). En ce qui a trait à la fourniture en  $\text{N-NO}_3$  par minéralisation, les sols avec EF-sans EV n'ont pas fait mieux globalement que les sols avec EV-sans EF. En fait, les sols avec le FPP et les GV seuls ont produit moins de  $\text{N-NO}_3$  que les EV de trèfle ou pois seuls. Par contre, la combinaison EV-FPP a de loin produit le plus de  $\text{N-NO}_3$ . Lors de la saison 2017 toutefois, seul un effet sur la respiration microbienne du sol a été mesuré. La différence majeure concerne principalement les GFV dont les sols avaient un taux respiratoire ( $0,2140 \text{ mg CO}_2 \text{ g}^{-1}$ ) en moyenne 20 % inférieur à celui des sols des autres EF et du sol témoin. De plus, le LP ( $0,2823 \text{ mg CO}_2 \text{ g}^{-1}$ ) était le seul EF présentant une respiration microbienne significativement plus élevée (17 %) que celle du sol témoin ( $0,2410 \text{ mg CO}_2 \text{ g}^{-1}$ ).

**Tableau 5. Impact des engrais verts et des engrais de ferme de la rotation sur certains indicateurs d'activité biologique du sol en 2016 (3 août) et 2017 (18 juillet).**

Paramètre (base sèche)	Engrais vert (EV)		Engrais de ferme (EF)		EV X EF	
Années	2016	2017	2016	2017	2016	2017
	Valeurs de <i>P</i>					
C Biomasse (mg kg <sup>-1</sup> )	0,0086	.	n.s.	.	n.s.	.
N Biomasse (mg kg <sup>-1</sup> )	n.s.	.	n.s.	.	n.s.	.
C org. soluble	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Respiration CO <sub>2</sub> (mg CO <sub>2</sub> g <sup>-1</sup> )	n.s.	n.s.	n.s.	0,0237	n.s.	n.s.
Phosph. acide (µg PNP g <sup>-1</sup> )	n.s.	.	0,0390	.	n.s.	.
Phosph. alcaline (µg PNP g <sup>-1</sup> )	n.s.	.	0,0011	.	n.s.	.
Uréease (µg N-NH <sub>4</sub> g <sup>-1</sup> )	0,1418	.	0,0169	.	n.s.	.
Libération N-NO <sub>3</sub> (kg ha <sup>-1</sup> ) (10 jours)	0,0046	n.s.	n.s.	n.s.	0,1212	n.s.

Les cases avec un « . » signifient que cet indicateur n'a pas été analysé au laboratoire cette année-là.

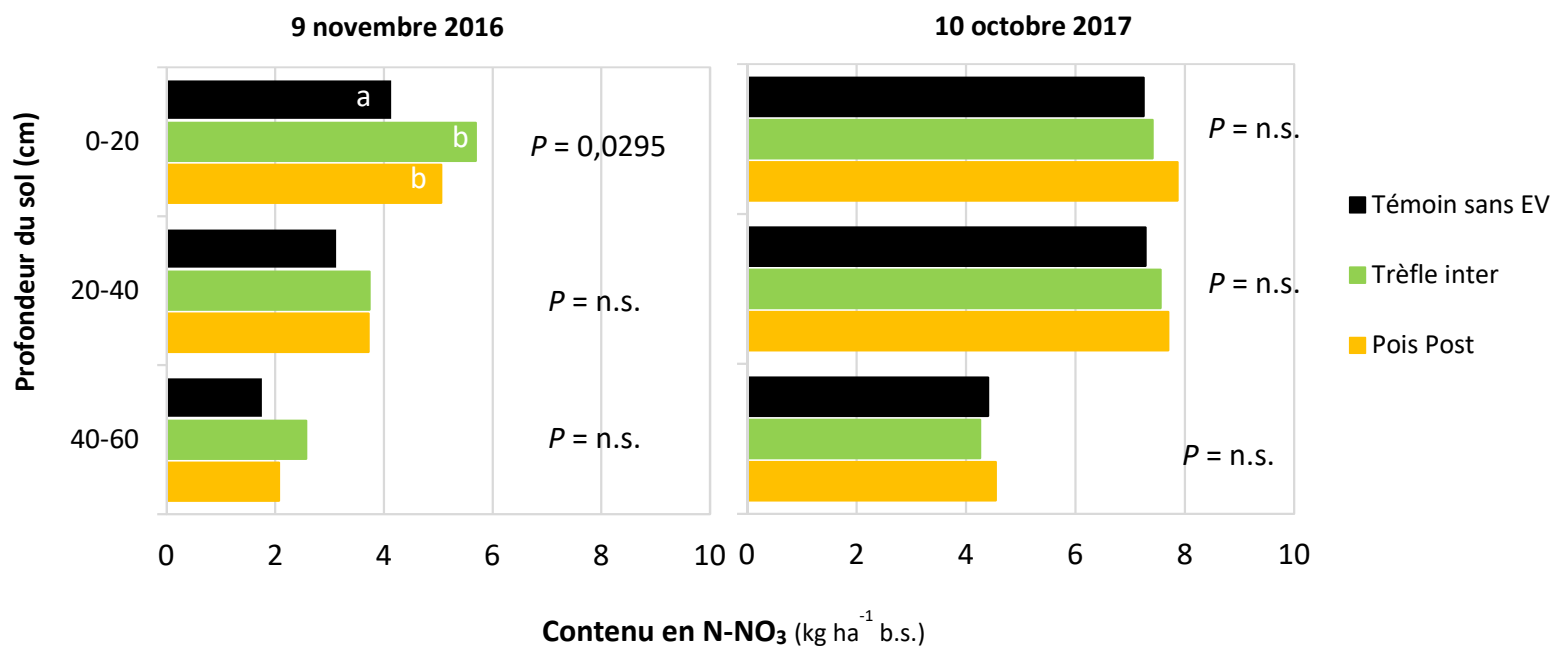


**Figure 16. Capacité de fourniture en nitrate du sol par minéralisation selon les engrais verts et les engrais de ferme (3 août 2016).**

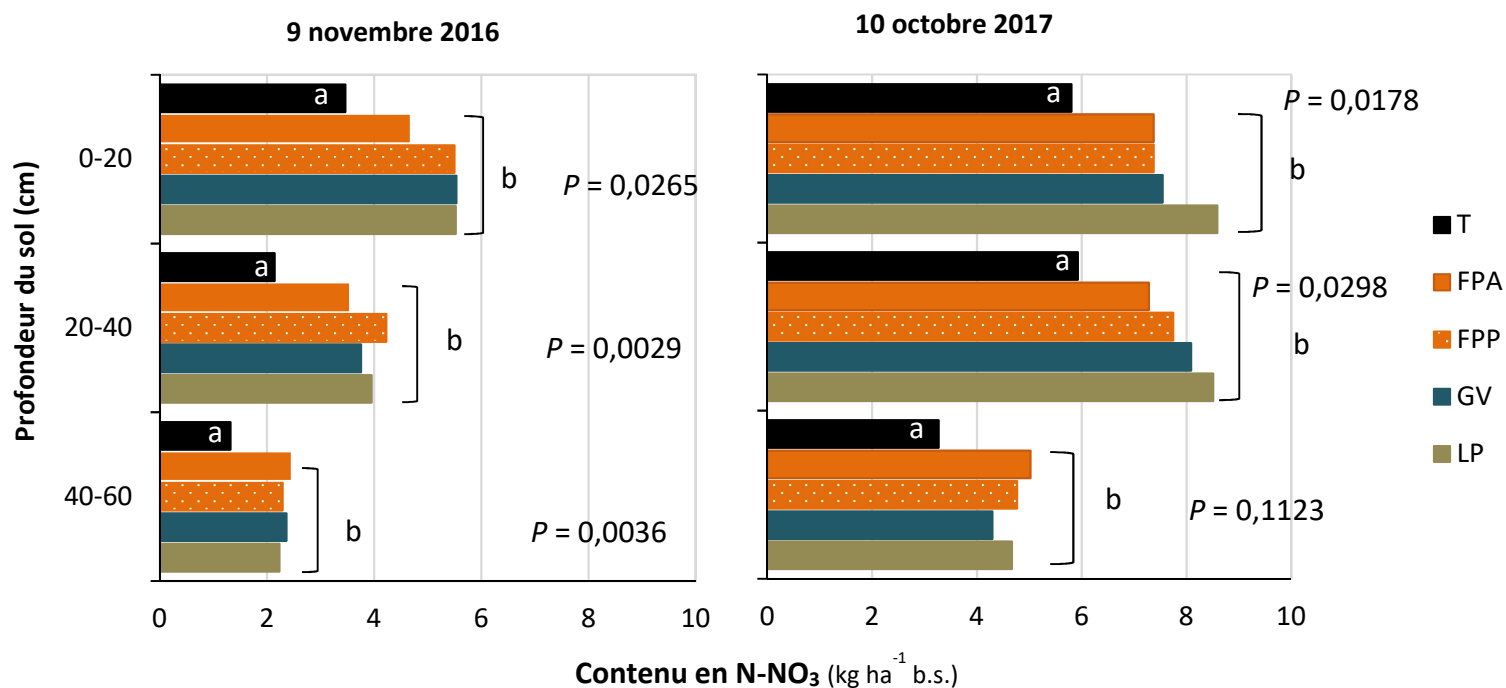
### 3.5.2 Azote résiduel

Les engrais verts ont eu très peu d'impacts environnementaux négatifs puisqu'ils n'ont pas entraîné la hausse des concentrations en N résiduel suivant la récolte du maïs-grain et du soya sur les trois profondeurs de sol étudiées (0-20 cm, 20-40 cm et 40-60 cm). Seule une légère hausse de 1 à près de 2 kg N-NO<sub>3</sub> ha<sup>-1</sup> (Figure 17 :  $P = 0,0130$ ) de la strate de surface en post-récolte du maïs-grain (2016) a été mesurée dans les sols des parcelles avec EV, comparativement au sol témoin sans EV. Par la suite, aucune différence n'est détectable en post-récolte du soya (2017) sur les trois profondeurs (Figure 17).

Les engrais de ferme ont eu un effet plus constant et présent. Toutefois, il demeure que les teneurs de nitrate résiduel mesurées sont en tout temps globalement faibles (< 9 kg N-NO<sub>3</sub>/ha), que ce soit en post-récolte du maïs ou du soya sur les trois strates étudiées (0-20, 20-40 et 40-60 cm). Cela dit, les EF ont haussé les teneurs en N-NO<sub>3</sub> résiduel dans le sol les deux années et à toutes les profondeurs échantillonnées. La hausse est modérée mais elle est présente jusqu'à 2 ans après l'apport des EF (Figure 18), ce qui indique que ceux-ci doivent être utilisés de façon raisonnée pour en limiter l'impact environnemental puisque le nitrate qui a migré sous la zone utile de sol migre hors de l'agrosystème. Par ailleurs, dans l'ensemble, aucun EF n'a d'impact négatif vraiment plus marqué que les autres. En post-récolte du maïs, les sols ayant reçu des EF avaient tous un contenu 58 % plus haut en N-NO<sub>3</sub> que celui du sol témoin sans EF dans la couche de surface, mais 2 fois supérieur dans les strates plus profondes.



**Figure 17.** Contenu en nitrate résiduel du sol selon les apports d'engrais verts, pour 3 profondeurs d'échantillonnage, le 9 novembre 2016 et le 10 octobre 2017, tous engrais de ferme confondus. Les valeurs avec des lettres distinctes sont significativement différentes au seuil  $P < 0,1$ .



**Figure 18.** Contenu en nitrate résiduel du sol selon les apports d'engrais de ferme, pour 3 profondeurs d'échantillonnage, le 9 novembre 2016 et le 10 octobre 2017, tous engrais verts confondus. Les valeurs avec des lettres distinctes sont significativement différentes au seuil  $P < 0,1$ .

### 3.6 ANALYSE ÉCONOMIQUE

Le calcul de la moyenne du revenu, des coûts variables et de la MCV (marge sur coûts variables) des 45 parcelles de l'expérimentation pour la rotation a permis de constater que le pois fourrager est l'EV qui donne la meilleure rentabilité économique (Tableau 6), soit une MCV de 6 209\$ ha<sup>-1</sup>, qui est plus élevée de 333\$ ha<sup>-1</sup> comparativement à celle obtenue avec le trèfle en intercalaire.



Tableau 6. Marge sur coûts variables (MCV) de la rotation selon l'engrais vert

Engrais verts	Engrais de ferme	Revenu moyen (\$/ha)	Coûts variables moyen \$/ha	MCV moyenne \$/ha
Pois fourrager	FPA	9 942,34 \$	3 233,41 \$	6 708,92 \$
	FPP	9 929,24 \$	3 285,33 \$	6 643,91 \$
	GFV	9 662,71 \$	4 768,02 \$	4 894,68 \$
	LP	10 202,88 \$	3 260,82 \$	6 942,06 \$
	Témoin sans EF	8 663,25 \$	2 809,00 \$	5 854,25 \$
<b>Moyenne Pois fourrager</b>		<b>9 680,08 \$</b>	<b>3 471,32 \$</b>	<b>6 208,76 \$</b>
Trèfle intercalaire	FPA	9 525,97 \$	3 119,64 \$	6 406,33 \$
	FPP	9 032,72 \$	3 132,47 \$	5 900,26 \$
	GFV	9 531,04 \$	4 677,42 \$	4 853,61 \$
	LP	10 124,56 \$	3 174,56 \$	6 950,00 \$
	Témoin sans EF	7 938,91 \$	2 670,15 \$	5 268,75 \$
<b>Moyenne Trèfle intercalaire</b>		<b>9 230,64 \$</b>	<b>3 354,85 \$</b>	<b>5 875,79 \$</b>
Témoin sans EV	FPA	10 015,91 \$	3 009,83 \$	7 006,08 \$
	FPP	8 776,24 \$	2 936,85 \$	5 839,39 \$
	GFV	8 971,92 \$	4 457,17 \$	4 514,74 \$
	LP	9 962,17 \$	2 986,61 \$	6 975,56 \$
	Témoin sans EF	7 413,74 \$	2 452,67 \$	4 961,07 \$
<b>Moyenne Témoin</b>		<b>9 027,99 \$</b>	<b>3 168,63 \$</b>	<b>5 859,37 \$</b>
<b>Moyenne générale</b>		<b>9 312,91 \$</b>	<b>3 331,60 \$</b>	<b>5 981,31 \$</b>

En ce qui concerne les EF, c'est le LP qui a donné la meilleure rentabilité économique, avec une MCV moyenne (indépendamment de l'EV) de 6956\$ ha<sup>-1</sup> (Tableau 7), suivi des fumiers de poulet (FPA et FPP). Le témoin non fertilisé quant à lui donne une meilleure MCV que les GFV vu le prix unitaire élevé de cet engrais organique.

Tableau 7. Marge sur coûts variables (MCV) de la rotation selon l'engrais de ferme

Engrais de ferme	Engrais verts	Revenu moyen (\$/ha)	Coûts variables moyen (\$/ha)	MCV moyenne (\$/ha)
LP	Pois fourrager	10 202,88 \$	3 260,82 \$	6 942,06 \$
	Témoin sans EV	9 962,17 \$	2 986,61 \$	6 975,56 \$
	Trèfle intercalaire	10 124,56 \$	3 174,56 \$	6 950,00 \$
	<b>Moyenne LP</b>	<b>10 096,54 \$</b>	<b>3 140,66 \$</b>	<b>6 955,88 \$</b>
FPA	Pois fourrager	9 942,34 \$	3 233,41 \$	6 708,92 \$
	Témoin sans EV	10 015,91 \$	3 009,83 \$	7 006,08 \$
	Trèfle intercalaire	9 525,97 \$	3 119,64 \$	6 406,33 \$
	<b>Moyenne FPA</b>	<b>9 828,07 \$</b>	<b>3 120,96 \$</b>	<b>6 707,11 \$</b>
FPP	Pois fourrager	9 929,24 \$	3 285,33 \$	6 643,91 \$
	Témoin sans EV	8 776,24 \$	2 936,85 \$	5 839,39 \$
	Trèfle intercalaire	9 032,72 \$	3 132,47 \$	5 900,26 \$
	<b>Moyenne FPP</b>	<b>9 246,07 \$</b>	<b>3 118,22 \$</b>	<b>6 127,85 \$</b>
Témoin sans EF	Pois fourrager	8 663,25 \$	2 809,00 \$	5 854,25 \$
	Témoin sans EV	7 413,74 \$	2 452,67 \$	4 961,07 \$
	Trèfle intercalaire	7 938,91 \$	2 670,15 \$	5 268,75 \$
	<b>Moyenne Témoin</b>	<b>8 005,30 \$</b>	<b>2 643,94 \$</b>	<b>5 361,36 \$</b>
GFV	Pois fourrager	9 662,71 \$	4 768,02 \$	4 894,68 \$
	Témoin sans EV	8 971,92 \$	4 457,17 \$	4 514,74 \$
	Trèfle intercalaire	9 531,04 \$	4 677,42 \$	4 853,61 \$
	<b>Moyenne GFV</b>	<b>9 388,55 \$</b>	<b>4 634,21 \$</b>	<b>4 754,35 \$</b>
<b>Moyenne générale</b>		<b>9 312,91 \$</b>	<b>3 331,60 \$</b>	<b>5 981,31 \$</b>

Pour les engrais verts, le pois fourrager à la dérobée génère des coûts variables à l'hectare supérieurs de 116\$ aux coûts variables à l'hectare du trèfle en intercalaire. Malgré cela, il offre une meilleure MCV. En effet cela s'explique par le fait que le revenu moyen généré par les parcelles ayant eu le pois fourrager à la dérobée est supérieur au revenu moyen des parcelles ayant eu le trèfle, de l'ordre de 449\$ ha<sup>-1</sup>. Il est donc possible de conclure dans cette séquence de rotation, pour ce site, que le pois fourrager à la dérobée permet d'obtenir de meilleurs rendements et une meilleure rentabilité économique que le trèfle en culture intercalaire.

Pour les engrais de ferme, les parcelles ayant reçu le LP donnent de loin le meilleur revenu moyen à l'hectare, soit 10 096\$ ha<sup>-1</sup> ce qui représente 267\$ ha<sup>-1</sup> de plus que le 2<sup>ème</sup> meilleur revenu moyen obtenu avec les parcelles

ayant reçu du FPA. Pourtant les parcelles avec LP génèrent des coûts variables (3 141\$ ha<sup>-1</sup>) sensiblement similaires aux coûts générés par le FPP (3 121\$ ha<sup>-1</sup>) et le FPA (3 118\$ ha<sup>-1</sup>), soit une différence de coûts de moins de 25\$ ha<sup>-1</sup>. Ainsi, à coûts presque similaires aux coûts variables des fumiers de poulet, le LP offre de meilleurs rendements et donc une meilleure rentabilité économique.

Le témoin non fertilisé donne une meilleure MCV que les GFV (Tableau 7). Pourtant, les parcelles aux GFV donnent un revenu moyen (9389\$ ha<sup>-1</sup>) supérieur au revenu des parcelles témoin (8005\$ ha<sup>-1</sup>) et même aux parcelles ayant reçu le FPP (9246\$ ha<sup>-1</sup>). Les parcelles de GFV donnent la plus faible rentabilité économique parce que le coût de fertilisation des GFV est très élevé. On observe une différence de coûts variables moyen de près de 1500\$ ha<sup>-1</sup> entre l'utilisation des GFV et les autres types d'EF. Ainsi, l'utilisation des GFV appliquée au printemps et à une dose de 100 kg N<sub>efficace</sub> ha<sup>-1</sup> n'est pas une bonne option économique puisque dans ces circonstances il devenait plus intéressant économiquement de ne pas fertiliser du tout.

Par ailleurs, si on compare les résultats du présent projet à ceux d'une référence économique du CRAAQ, pour une rotation similaire (maïs-grain, soya, blé) en moyenne, de meilleurs résultats agronomiques et économiques ont été obtenus dans le cadre de l'étude (Tableau 8). Dans le cas de la référence<sup>5</sup>, le trèfle en intercalaire et le fumier de poulet ont été utilisés et une MCV de 5 907\$ ha<sup>-16</sup> a été obtenue. Dans le cas de l'expérimentation, une MCV moyenne de 6 042\$ ha<sup>-1</sup> a été obtenue en ne considérant pas les parcelles témoins. Les régies testées donnent donc toutes une meilleure rentabilité économique qui peut s'expliquer dans un premier temps par une différence de plus de 100\$ ha<sup>-1</sup> entre la MCV moyenne de l'expérimentation et la MCV de la référence économique et dans un second temps, la différence de MCV aurait été encore plus importante si les prix de vente unitaire étaient similaires. En effet, même avec des rendements élevés (Tableau 8) comparativement à la référence, la différence entre les revenus a été atténuée par des prix plus faibles. Certes, il est souvent habituel d'obtenir des rendements plus élevés en contexte expérimental, quoique les rendements obtenus dans ce contexte demeurent dans l'intervalle de variation des rendements obtenus<sup>7</sup> à la ferme, sauf pour le blé.

<sup>5</sup> Entreprise céréalière biologique, Budget d'exploitation. AGDEX 111.19/821 2017

<sup>6</sup>  $MCV \left( \frac{\$}{ha} \right) = \sum_{i=1}^3 \frac{MCV_i}{Superficie\ récoltée_i} + \frac{Coûts\ d'amélioration\ du\ sol}{Superficie\ totale\ récoltée}$  Avec i les trois cultures

<sup>7</sup> Variation rendement : 3,9-11T/ha pour le maïs-grain, 1,2-3T/ha pour le soya et 1,6-3T/ha pour le blé

**Tableau 8. Comparaison du rendement et du revenu entre la référence du CRAAQ et les résultats.**

Culture	AGDEX			Expérimentation		
	Rendement (T ha <sup>-1</sup> )	Prix unitaire (\$ T <sup>-1</sup> )	Revenu (\$ ha <sup>-1</sup> )	Rendement <sup>8</sup> (T ha <sup>-1</sup> )	Prix unitaire (\$ T <sup>-1</sup> )	Revenu (\$ ha <sup>-1</sup> )
<b>Blé</b>	2,43	606 \$	1473 \$	3,90	575 \$	2 243 \$
<b>Maïs-grain</b>	7,00	526 \$	3682 \$	9,50	485 \$	4 608 \$
<b>Soya</b>	2,36	1073 \$	2532 \$	2,80	1 048 \$	2 934 \$

En résumé, le pois fourrager à la dérobée permet d'obtenir de meilleurs rendements et une meilleure rentabilité économique que le trèfle en culture intercalaire. Pour les engrais de ferme, à coûts presque similaires aux coûts variables des fumiers de poulet, le lisier de porc, apporté en post-émergence, offre un meilleur rendement et donc une meilleure rentabilité économique. Même si les GFV s'avèrent une option intéressante sur le plan agronomique (3<sup>ème</sup> meilleur rendement/revenu), sur le plan économique, ce choix est le moins rentable car les coûts de fertilisation qui lui sont associés sont très élevés. Toutefois, selon une étude en cours (Landry et coll. 2018), l'efficacité fertilisante des GFV serait plus élevée que celle utilisée actuellement sur la base des valeurs références (CRAAQ 2010). De plus, les mesures *in situ* des flux de nitrate par Landry et Coll. (2018) et la présente étude révèle que les GFV minéralisent beaucoup plus rapidement qu'attendu. Les GFV pourraient donc être utilisées à dose moindre en valorisant deux de leur qualité, soit leur haute efficacité et leur applicabilité en bande. Celles-ci pourraient donc être apportées en bande, en post-émergence du maïs, tout comme le lisier. Une meilleure synchronisation du relâchement de NO<sub>3</sub> des GFV avec la fenêtre de besoin maximale en N de la culture grâce à un temps d'application optimisé favoriserait probablement de meilleurs rendements en grains par kg N<sub>eff</sub> apporté. Tout ceci pourrait hausser les gains économiques pouvant être réalisés avec cet engrais. Néanmoins, au final, dans cette étude, la meilleure option économique est demeurée la régie combinant le pois fourrager à la dérobée après la récolte du blé et le lisier de porc appliqué en post émergence du maïs-grain.

<sup>8</sup> Calculé en écartant les parcelles témoins

## 4 CONCLUSION

En résumé, dans cette étude, les EV de légumineuses ont fourni du N disponible très rapidement au printemps et les pics de  $\text{NO}_3$  atteints tendaient à être d'intensité similaire à ceux des EF. Les EV apparaissent donc comme un bon intrant pour fournir de l'azote, tout en limitant les apports de P et de K. Il serait toutefois plus avantageux de trouver un moyen de mieux synchroniser leur relâchement de  $\text{NO}_3$ , très hâtif, avec le pic de besoin en N de la culture, tel qu'atteint avec l'application en post-émergence du lisier de porc dans le maïs-grain. La pratique de l'apport de EV fauché-récolté ou «cut and carry» par exemple pourrait permettre cet ajustement. Dans cette étude, le pois fourrager à la dérobée est apparu très performant. Apporté seul, il a permis de produire un rendement similaire à celui du FPP (moy. 7 T ha<sup>-1</sup>) dans un sol qui répond fortement au N (4,9 T ha<sup>-1</sup> avec témoin ON) et ce, malgré une biomasse plus faible qu'attendue. Cela démontre l'excellent potentiel des EV qui ont aussi permis d'obtenir un  $P_{\text{eau}}$  du sol à des concentrations similaires aux EF pour des apports de  $P_{\text{total}}$  30-50 fois inférieurs, ainsi que des teneurs foliaires en P du maïs adéquates. Ainsi, pour un sol à 6 % ISP comme dans cette étude, il n'était pas nécessaire d'apporter des quantités de P de l'ampleur de celle apportée par les EF. Ce projet démontre aussi que pour obtenir le meilleur rendement possible du fumier de poulet à griller, celui-ci doit préférablement être appliqué en automne et non au printemps. À l'opposé, les granules de fientes de volailles appliquées à la volée au printemps minéralisent trop hâtivement, ce qui diminue grandement l'effet fertilisant qui peut en être obtenu. Leur application en bande 2-3 semaines avant la fenêtre de besoins maximaux de la culture produite devrait être testée. Des quantités moindres pourraient ainsi peut-être être appliquées avec de meilleurs effets sur les rendements. Puisque cet EF est plus dispendieux, cette meilleure valorisation pourrait permettre sa justification économique. D'un point de vue santé des sols, comme les deux types d'engrais ont affecté des indicateurs différents, cette étude renforce l'intérêt de miser sur une régie mixte. De plus, le lien hautement significatif entre les EF et le  $\text{NO}_3$  résiduel retrouvé dans les strates de sol jusqu'à 60 cm, et jusqu'à 1,5 à 2 ans après leur application, indique que leur apport doit être géré rigoureusement. Tant la dose que le moment doivent être considérés, afin d'éviter un excès d'apport ou une sous-utilisation due à une mauvaise synchronisation relâchement-prélèvement par la culture, ce qui hausserait directement et durablement les risques de lessivage du  $\text{NO}_3$  dans l'environnement.

## RÉFÉRENCES

- AFNOR. 2005. Fractionnement biochimique et estimation de la stabilité biologique : Méthode de caractérisation de la matière organique par solubilisations successives. Association française de normalisation. Norme XP U p.44-162.
- 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.
- Beaudet et coll. 2003. Description statistique des propriétés chimiques des sols minéraux du Québec. MAPAQ, IRDA, Québec. 112 p.
- Belzile et Grondines. 2015. Compléments d'analyse économique à la recherche agronomique et agroenvironnementale en grandes cultures. Rapport final présenté au Réseau Innovagrains. IRDA. 68 p.
- 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.
- Côté et coll. 2018. Action spécifique en agriculture biologique à la plateforme d'innovation en agriculture biologique de l'IRDA, volet grandes culture. Rapport final présenté au MAPAQ. 48 p.
- CRAAQ. 2010. Guide de références en fertilisation du Québec. 2ième Édition. Ste-Foy, Québec : CRAAQ . 293 p.
- Duval et coll. 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. Disponible en ligne <http://www.cetab.org/publications/remplacer-lazote-venant-des-apports-en-fumier-par-des-engrais-verts-de-legumineuses>.
- Fragaria et coll. 2005. Role of cover crops in improving soil and row crop productivity. Comm. Soil Sci. Plant Anal. 36:2733-2757.
- Gee, G.W. et Bauder, J.W. 1986. Particle-size analysis. p. 383-411. In A. Klute (ed) Methods of soil analysis. Part 1. ASA. Monograph No 9. 2nd edition. Madison, WI.
- 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. Agrosol 15(2):107-110.
- Institut de la statistique du Québec. 2018. [www.stat.gouv.qc.ca](http://www.stat.gouv.qc.ca)
- Isaac, A.R. et Johnson, W.C. 1976. Determination of nitrogen in plants tissue using a block digester. J. AOAC 59 :98-100.

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. IRDA. 96 pages.

Landry, C. et coll. 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 +

Linères et Djakovitch. 1993. Caractérisation de la stabilité biologique des apports organiques par l'analyse biochimique. Dans Decroux et Ignazi (eds.) Matières organiques et agriculture. Quatrième journée de l'analyse de terre (Gemmas). Cinquième forum de la fertilisation raisonnée (Comifer), 16-18 novembre 1993. Pages 159-168.

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

N'Dayegamiye et coll. 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 et coll. 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 et coll. 2010. Soil and Crop Parameters Related to Corn Nitrogen Response in Eastern Canada. Agr. J. 102 :1478-1490

Nziguheba, G. et coll. Soil phosphorus fractions and adsorption as affected by organic and inorganic sources. Plant and soil. 198 : 159-168.

Sall et coll. 2015. Monographie de l'industrie des grains au Québec. MAPAQ. 27 p.

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.

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

Thomas, G.W., 1982. Exchangeable cations. Dans : Methods of soil Analysis . (AL Page et al, eds) Agronomy 9 ; 154-157 (Madison).



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

Centre de références en agriculture et agroalimentaire du Québec

- 2018. *Blé panifiable biologique – Budget à l’hectare (AGDEX 112.19/821 2018)*. CRAAQ, 6 pages.
- 2018. Maïs-grain biologique - Budget à l’hectare (AGDEX 111.19/821a). CRAAQ, 5 pages.
- 2018. Soya humain biologique - Budget à l’hectare (AGDEX 141.19/821). CRAAQ, 5 pages.
- 2018. Prix des grains de semences (AGDEX 100.45/855). CRAAQ, 3 pages.
- 2018. Machinerie, Coûts d’utilisation et taux à forfait suggérés (AGDEX 740/825). CRAAQ, 25 pages.
- 2017. Valeur de remplacement engrais de ferme (AGDEX 538). CRAAQ, 4 pages.
- 2017. Entreprise céréalière biologique, Budget d’exploitation (AGDEX 111.19/821). CRAAQ, 11 pages.

## ANNEXE A – QUALITÉ BOULANGÈRE DES GRAINS DE BLÉ



### Résultats d'analyses

<u>GRAINS</u>	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	<u>6</u>	<u>7</u>	<u>8</u>	<u>9</u>
% D'HUMIDITÉ	9,1	8,8	8,2	8,6	9,5	9	8,8	8,4	8,4
% DE PROTÉINE	10,6	10,5	10,7	12	12,6	12,2	11	11	11,1
% DE CENDRES	1,29	1,39	1,47	1,45	1,4	1,46	1,44	1,45	1,47
INDICE DE CHUTE	373	375	342	382	386	415	391	361	351
VOMITOXINE PPM:	0,7	0,5	1	1,3	0,9	0,7	0,4	0,7	0,7
GPT									
PMT	115	131	142	100	102	111	129	118	127
BEM	50	50	50	58	61	58	53	52	54
GLUTEN HUMIDE	32,6	32,8	33,1	35,1	36,4	36,1	33,7	33,7	33,8

Les numéros d'échantillons correspondent aux traitements suivants : pois fourrager (1-5-9), trèfle intercalaire (3-4-8) et témoin sans EV (2-6-7). Les échantillons 1-2-3, 4-5-6 et 7-8-9 ont été prélevés dans les blocs 1, 2 et 3, respectivement.

## ANNEXE B – CARACTÉRISTIQUES CHIMIQUES DU SOL

Paramètres	Valeurs
Printemps 2015	
pH <sub>eau</sub>	7,2
Matière org. (%)	3,5
C <sub>tot</sub> (%)	1,9
N <sub>tot</sub> (%)	0,2
Éléments majeurs Mehlich III (kg ha <sup>-1</sup> b.s.)	
P	134
K	508
Ca	7458
Mg	683,2
Al	1008
P <sub>M3</sub> /Al <sub>M3</sub> (%)	6,2