

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

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

Notre mission

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

Notre vision

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

Pour en savoir plus

www.irda.qc.ca

PARTENAIRES

**Agriculture, Pêcheries
et Alimentation**

Québec 

Étude de synchronisation de la fourniture en azote des engrais verts permettant la réduction ou le remplacement des applications de lisier de porc en post-levée du maïs-grain, contexte de transition biologique en Chaudière-Appalaches.

Rapport final 2020

Présenté à :

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

LE RAPPORT PEUT ÊTRE CITÉ COMME SUIT :

Landry, C., Marchand-Roy, M., Mainguy, J., Samson, V. et Langelier, M. 2020. Étude de synchronisation de la fourniture en azote des engrais verts permettant la réduction ou le remplacement des applications de lisier de porc en post-levée du maïs-grain, contexte de transition biologique en Chaudière-Appalaches. Rapport final. IRDA et MAPAQ. 29 pages.

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

ÉQUIPE DE RÉALISATION DU PROJET

- Responsable scientifique : Christine Landry, Ph. D., IRDA
- Mylène Marchand-Roy, M. Sc., IRDA
- Julie Mainguy, B.Sc., IRDA

ÉQUIPE DE RÉDACTION DU RAPPORT

- Chercheure principale, Christine Landry, Ph. D., IRDA
- Mylène Marchand-Roy, M. Sc., IRDA
- Julie Mainguy, B.Sc., IRDA
- Maude Langelier, M.Sc., IRDA
- Michèle Grenier, biostatisticienne, IRDA

COLLABORATEURS

- Véronique Samson, agronome, MAPAQ
- Anaïs Charles, Ph. D.

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

Christine Landry

Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)

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

Téléphone : 418 643-2380, poste 640

Courriel : christine.landry@irda.gc.ca

REMERCIEMENTS

Ce projet de recherche a été réalisé grâce à une aide financière accordée par le Programme d'appui au développement de l'agriculture et de l'agroalimentaire en région (PADAAR) du Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ). Des remerciements s'adressent également à l'IRDA qui a fourni une contribution importante dans le cadre de cette étude. Les auteurs remercient également les participants du projet et reconnaissent également l'appui technique fourni par le personnel de recherche de l'IRDA et du MAPAQ.

TABLE DES MATIÈRES

1	Introduction	1
2	Matériel et méthodes.....	4
2.1	Site et traitements	4
2.2	Dispositif et analyses statistiques	5
2.3	Collecte de données et analyses chimiques de laboratoire	6
3	Résultats et discussion	11
3.1	Caractérisation du sol	11
3.2	Caractérisation des engrais organiques	13
3.2.1	Engrais verts d'automne 2018	13
3.2.2	Engrais organiques 2019.....	13
3.3	Charge du sol en nitrate	14
3.3.1	Automne 2018	14
3.3.2	Saison 2019.....	15
3.4	Croissance et prélèvements en nutriments du maïs-grains	18
3.4.1	Croissance et rendements	18
3.4.2	Prélèvements en nutriments par la culture	20
3.5	Évaluation des coûts des régies	21
	Conclusion.....	24
	Références	25
	Annexe	27

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Variétés et taux de semis des engrais verts, saison 2018.	4
Tableau 2.	Description des traitements, saisons 2018 et 2019.	4
Tableau 3.	Calendrier des principales opérations culturales dans le dispositif expérimental en 2018 et 2019.	5
Tableau 4.	Périodes de pose-retrait des membranes d'échange ionique lors de la saison maïs-grains en 2019.	7
Tableau 5.	Caractéristiques physico-chimiques du sol au site d'étude en 2018 et 2019.	12
Tableau 6.	Biomasse d'engrais verts produite, contenu en N-P-K et apport estimé de N pour la culture du maïs-grain, en fonction de chacun des engrais verts d'automne 2018.	13
Tableau 7.	Caractérisation des engrais organiques de 2019.	14
Tableau 8.	Analyse coût-bénéfices en fonction des différentes régies de fertilisation organique du maïs-grains biologique en 2018 et 2019.	23

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Parcelle expérimentale de pois fourrager (gauche) et sans engrais vert (droite), le 20 septembre 2018.	7
Figure 2.	Parcelle expérimentale de pois avec seigle, le 20 septembre 2018.	8
Figure 3.	Épandage de la prairie « fauché-récolté » (EVfc), 2 juillet 2019.	8
Figure 4.	Épandage du lisier de porc, 11 juillet 2019.	9
Figure 5.	Dispositif expérimental à Saint-Lambert-de-Lauzon, saisons 2018 et 2019.	10
Figure 6.	Contenu du sol en N-NO ₃ résiduel juste avant l'enfouissement des engrais verts le 15 octobre 2018.	15
Figure 7.	Flux de N-NO ₃ en fonction des apports d'engrais verts d'automne 2018 et d'engrais organiques de 2019, pendant la saison de croissance du maïs-grains en 2019.	16
Figure 8.	Charge du sol en N-NO ₃ en fonction des apports d'engrais verts d'automne 2018 et d'engrais organiques en 2019 à différents moments pendant la croissance du maïs-grains en 2019.	17
Figure 9.	Biomasse aérienne des plants de maïs en fonction des apports d'engrais verts d'automne 2018 et d'engrais organiques, le 2 juillet 2019.	18
Figure 10.	Biomasse aérienne des plants et biomasse des grains de maïs en fonction des apports d'engrais verts d'automne 2018 et d'engrais organiques en 2019 à la récolte du maïs-grains le 24 octobre 2019.	19
Figure 11.	Prélèvements totaux en N (plants + grains) en fonction des engrais verts d'automne et des engrais organiques en 2019, à la récolte du maïs -grains le 24 octobre 2019.	20
Figure 12.	Prélèvements totaux en K (plants + grains) en fonction des engrais verts d'automne et des engrais organiques en 2019, à la récolte du maïs -grains le 24 octobre 2019.	21

Figure 13. Analyse du lisier de porc pour calcul d'apport avant épandage (source : Carl Paquet agr.)	27
Figure 14. Conditions météorologiques journalières au site d'étude. Les précipitations sont issues du pluviomètre en place au site et les températures maximales et minimales proviennent de la station météorologique St-Bernard (Chaudière-Appalaches), à proximité du site, saison 2018.	28
Figure 15. Conditions météorologiques journalières au site d'étude. Les précipitations sont issues du pluviomètre en place au site et les températures maximales et minimales proviennent de la station météorologique St-Bernard (Chaudière-Appalaches), à proximité du site, saison 2019.....	28

1 INTRODUCTION

Au Québec, on observe actuellement une hausse de la transition vers la production biologique des grandes cultures et la région de Chaudière-Appalaches n’y échappe pas. En 2016, le Québec comptait d’ailleurs le nombre le plus élevé d’exploitations agricoles biologiques, toutes cultures confondues au Canada (ISQ, 2016). Leur nombre s’est en effet accru de 22,3 %, passant de 1 037 à 1 268 exploitations entre 2011 et 2016. En grandes cultures, depuis 2005, le Québec est aussi passé de 232 exploitants à 447 en 2017, soit de 3 000 ha à 24 000 ha (Roy, 2016). Cette hausse s’explique en partie par la plus-value associée aux grains biologiques qui est fort importante, les prix des grains bio étant généralement 2,5 fois plus élevés que ceux des grains conventionnels, ce qui constitue un incitatif fort pour la transition vers l’agriculture biologique. La politique bioalimentaire du Québec 2018-2025 a d’ailleurs comme objectif de doubler les superficies en production biologique.

Dans un même ordre d’idées, le Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ) a publié, grâce au travail de concertation de près de quatre-vingts acteurs du secteur de l’agriculture biologique et à l’avis de 130 producteurs, la liste des besoins et des priorités de recherche, d’innovation et de transfert pour le secteur de l’agriculture biologique. À cet effet, l’une des priorités du secteur des grandes cultures est de mieux connaître le rôle des engrais verts (EV) par rapport à celui des engrais de ferme (EF) sur le rendement et de déterminer des méthodes de gestion qui permettent de maximiser l’apport en azote (N) de ces deux types d’engrais, pour permettre entre autres de diminuer les apports de phosphore (P). Cet aspect est déterminant dans les régions biologiques puisque les engrais minéraux y sont proscrits et que la nutrition des cultures repose donc principalement sur ces apports d’éléments.

Usuellement, une plus grande part des besoins nutritionnels des cultures est comblée avec les EF, comparativement aux EV car ils sont riches en N efficace. Néanmoins, ils sont également riches en P, ce qui présente une contrainte importante dans les régions où les EF sont abondants mais où une majorité de sols sont saturés en P (Beudet et coll., 2003) aussi pour fertiliser des cultures exigeantes en N (ex. le maïs-grain), surtout celles ayant de faibles besoins en P, ce qui crée alors un important déséquilibre. En effet, selon le règlement sur les exploitations agricoles (MDDELCC, 2014), les apports de P permis sont limités aux besoins en P de la culture en sol riche en P, ce qui rend impossible l’apport de grandes quantités d’EF. Les pertes de nitrates (N-NO_3) par lessivage, liées avec les apports de EF, sont également un enjeu puisque ces derniers sont souvent plus riches en NO_3 (ex. lisier) que les EV, quant à eux plus riches en N organique, non lessivable. D’autre part, la difficulté réside aussi parfois dans le faible approvisionnement possible en fumiers/lisiers répondant aux critères de production biologique. Ainsi, que ce soit à cause de l’état des sols, de la préservation de l’environnement ou de l’approvisionnement en EF, le principal frein à la croissance de la production biologique réside dans la difficulté de trouver des intrants azotés efficaces sans contenu en P excessif par rapport aux besoins de la culture.

L’usage des EV apporte également son lot de défis. Entre autres, contrairement aux EF qui sont riches en N dès leur production et qui peuvent être appliqués au moment voulu selon les besoins de la culture (ex. post-levée du maïs), les EV doivent avoir le temps d’accumuler suffisamment de N dans leurs tissus et ce N doit être rendu disponible à la suite d’une minéralisation non seulement efficace, mais adéquatement synchronisée avec le pic

de besoins de la culture produite (Tonitto et coll., 2006). Le moment de l'enfouissement des EV (automne ou printemps) et leur ratio C/N sont à cet égard des éléments importants qui vont influencer le rythme de libération du N disponible. Leur gestion est de plus compliquée par une série de contraintes culturelles ou spécifiques aux espèces d'EV utilisées. Par exemple, des travaux antérieurs réalisés à l'IRDA ont montré que le N des EV de légumineuses pures semées à la dérobée d'une céréale et enfouies l'automne précédant une culture de maïs grain se minéralise trop rapidement au printemps suivant, soit avant la fenêtre des besoins maximums du maïs qui se situe entre 60 et 90 jours après le semis (Landry et coll., 2017). L'enfouissement de l'EV au printemps pourrait donc être envisagé, toutefois les producteurs sont peu enclins à adopter cette pratique car les conditions de sols sont difficilement praticables à cette période de l'année et les risques de compaction en sols lourds non ressuyés sont importants. De plus, Verville (2014) a montré qu'au Québec il n'y avait pas avantage à incorporer un EV au printemps plutôt qu'à l'automne, sur les rendements d'une céréale.

En ce qui a trait au rapport C/N de la biomasse, celui-ci influence fortement la minéralisation du N de l'EV, un C/N élevé retardant d'autant celle-ci. La teneur en N des tissus doit ainsi être supérieure à 1,5 % N pour pouvoir s'assurer d'une minéralisation pour la culture suivante (Sullivan et Andrews, 2012). Cela explique en général qu'un rapport de 20 représente la limite sous laquelle on peut s'attendre à une minéralisation rapide des résidus et à un apport important à la culture subséquente (Janzen et Schaalje, 1992) et au-dessus de laquelle il y a un risque d'immobilisation et de réduction du N disponible à la culture subséquente (Aulakh et coll., 1991). Sur ces bases, il devient donc envisageable de jouer sur la valeur du ratio C/N de l'EV à l'aide de mélanges d'espèces pour mieux synchroniser la minéralisation du N avec la culture subséquente. Les légumineuses ont généralement un rapport C/N bas, qui mènera à une minéralisation rapide des résidus, alors que les graminées ont à maturité un rapport C/N plus élevé (Reeves, 1994). C'est pourquoi, les mélanges peuvent permettre de trouver un équilibre dans le rapport C/N global de l'EV pour viser un relâchement du N au moment voulu. Ceci permettrait de bénéficier de la teneur supérieure en N des EV de légumineuses.

Obtenir le N nécessaire, au bon moment, en plein cœur de la saison de croissance pourrait aussi se faire en important une coupe d'EV très fermentescible et riche en N dans une fenêtre précédent de quelques jours la période pic de besoins en N du maïs, à l'image de ce qui se fait avec l'épandage du lisier de porc en post-levée. Cette coupe pourrait être pratiquée sur une prairie de légumineuses voisine. Cette pratique, communément appelée « fauché-récolté » pourrait ainsi offrir une alternative intéressante à la culture d'EV pleine saison ou à la dérobée l'année précédente car le contrôle sur le moment de libération du N devient plus serré, permettant une synchronisation plus fiable de la fourniture en N de l'EV avec les besoins de la culture. Il a d'ailleurs été démontré lors d'essais en grandes cultures biologiques que la synchronisation des apports avec les besoins est plus importante que la quantité de N apportée en elle-même (Landry et coll., 2017). La pratique du « fauché-récolté » demeure toutefois peu répandue en grande culture biologique au Québec. Elle pourrait pourtant s'avérer une alternative présentant plusieurs avantages. En plus des aspects listés plus haut en lien avec l'apport de N, cette technique pourrait encourager le maintien ou le retour des superficies en prairies qui ont diminué de 25 % au profit des cultures annuelles ces trente dernières années (Gélinas, 2016). Le maintien des superficies en prairies est important car il est reconnu que celles-ci aident à la conservation des sols et contribuent au maintien de la diversité écologique des systèmes agricoles. De récentes recherches ont également rapporté des hausses de

rendements et de la qualité de la production sur un retour en prairies (Li et coll., 1999). En Europe, cette stratégie est également en développement pour réussir à s'affranchir des EF chez les producteurs biologiques sans élevage (Frund, 2015), ce qui est le cas de plusieurs producteurs québécois. Sous nos conditions, il y a déjà la ferme Agri-Fusion, chef de file en production de grandes cultures biologiques, qui a testé cette option en 2014 en apportant de la biomasse de trèfle en post-levée du maïs. Ceux-ci ont ainsi estimé qu'un hectare de trèfle pouvait fournir plus ou moins 100 kg de N dans une première coupe (Desperrier Roux, 2014). Lors de la récolte, ils ont par ailleurs obtenu des rendements en maïs équivalents au traitement fertilisé avec du fumier.

Objectif général

Le présent projet a comme objectif principal de présenter un moyen de combler une part significative des besoins en N de cultures exigeantes en cet élément grâce à une meilleure synchronisation de la fourniture en N, tout en préservant la fenêtre de production de revenus du producteur l'année précédant ces cultures (ex. EV à la dérobée l'automne précédent ou « fauché-récolté »)

Objectifs spécifiques

Afin de répondre à l'objectif global, les impacts recherchés par ce projet sont :

- D'augmenter la productivité ainsi que la rentabilité des grandes cultures biologiques grâce à une meilleure synchronisation des apports azotés avec les besoins de la culture tout en maintenant la fenêtre de revenus l'année précédente;
- De diminuer les pertes de nitrate dans l'environnement et l'accumulation de P dans les sols par le recours moins systématique aux EF, surtout avec les cultures exigeantes en N;
- De faciliter la gestion de la fertilisation des producteurs de grandes cultures sans élevage en réduisant ou en s'affranchissant de la nécessité de trouver des sources de EF pour les producteurs;
- De favoriser la conservation des sols (structure et bon taux de matière organique, deux facteurs liés à la rentabilité long terme des entreprises) et la biodiversité en encourageant le maintien ou le retour des superficies en prairies dans les rotations.

2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 SITE ET TRAITEMENTS

L'étude s'est déroulée à la ferme expérimentale de l'IRDA à Saint-Lambert-de-Lauzon dans un sol de type loameux en transition biologique. À l'automne 2018, un engrais vert (EV) constitué d'une légumineuse pure (pois fourrager 40-10) a été comparé à un mélange légumineuse-graminée (pois fourrager 40-10 et seigle (cv. Gazel)), tous deux semés à la dérobée d'une culture de blé de printemps, n'ayant reçu aucun apport de fertilisant (Figures 1 et 2). Les EV à la dérobée (EVd) ont été semés avec un semoir Great Plain (14 août 2018), suivant la préparation du sol (voir Tableau 1 pour les taux de semis). Ils ont été ensuite fauchés à l'aide d'une tondeuse Orsi et incorporés par un labour peu profond à l'automne précédant l'année en maïs-grain. Au printemps 2019, une culture de maïs-grains (variété E50K45, 2400 UTM) a été semée (80 000 grains ha⁻¹) le 30 mai 2019. Deux stratégies de fertilisation en post-levée du maïs ont été comparées, soit le lisier de porc ou l'épandage d'un engrais vert provenant d'une première coupe de prairie de légumineuses fauché-récolté (EVfc). La liste des traitements est résumée dans le Tableau 2.

Tableau 1. Variétés et taux de semis des engrais verts, saison 2018.

Culture	Variété	Taux de semis
Pois fourrager	40-10	150
Mélange Pois fourrager et Seigle	40-10 Gazel	100 70

Tableau 2. Description des traitements, saisons 2018 et 2019.

2018 - EV à la dérobée	2019 - Engrais organique
Sans EV	EV de légumineuse « cut & carry » (EVfc)
Pois fourrager	ON
Pois fourrager	EV de légumineuse « cut & carry » (EVfc)
Pois fourrager	Lisier de porc
Pois fourrager et Seigle	ON

Un contrôle minutieux des mauvaises herbes a été assuré tout au long de la saison par des sarclages mécaniques pour éviter tout biais sur les rendements. Un dépistage régulier des maladies et ravageurs a été également réalisé par l'agronome-conseillère du MAPAQ, Véronique Samson. Le lisier et l'Evfc ont été incorporés suivant leur application en post-levée du maïs. Une attention particulière a été portée afin que l'Evfc fraîchement coupé soit transporté le plus rapidement possible dans les parcelles appropriées pour limiter au maximum les pertes de N. Une caractérisation préalable du lisier et de l'Evfc a permis d'établir les quantités à apporter pour viser des apports de N efficace (N_{eff.}) équivalents entre les deux et de l'ordre de 100 kg N_{eff.} ha⁻¹. L'Evfc a été appliqué manuellement dans les parcelles et incorporé avec le passage d'un mini-rotoculteur le jour même (2 juillet 2019, Figure 3), à un

taux de 40 T ha⁻¹ de biomasse fraîche. Par la suite, le lisier de porc a été épandu manuellement (11 juillet 2019, Figure 4) à une dose de 21 T ha⁻¹ et a été incorporé par un passage de sarcléur dans toutes les parcelles du dispositif. Un pluviomètre a été installé à chacune des années pour suivre les conditions de pluviométrie (Annexe). Les dates des principales opérations culturales pour les deux années de l'essai figurent au Tableau 3.

Tableau 3. Calendrier des principales opérations culturales dans le dispositif expérimental en 2018 et 2019.

Opérations		
2018	Date	JAP
Prélèvement de sol pour caractérisation avant semis des EVd	13 août	-1
Semis des EVd	14 août	0
Évaluation du recouvrement des parcelles EVd et M.H.	15 octobre	62
Prélèvement des EVd et de sol	15 octobre	62
Fauchage des EVd	22 octobre	69
Incorporation des EVd	23 octobre	70
2019	Date	JAP
Prélèvement de sol pour caractérisation avant semis de maïs	30 mai	0
Semis du maïs-grains	30 mai	0
Prélèvement des Evfc	2 juillet	33
Fauchage et incorporation de Evfc	2 juillet	33
Application du lisier de porc et son incorporation	11 juillet	42
Prélèvement de sol et plants au stade soie	16 août	78
Prélèvement de sol en fin de saison	22 octobre	145
Récolte de maïs-grains	24 octobre	147
Prélèvement de grains et de plants	24 octobre	147

EVd : engrais vert à la dérobée

M.H. : mauvaises herbes

Evfc : engrais vert de prairie fauché-récolté (i.e. coupe de prairie)

2.2 DISPOSITIF ET ANALYSES STATISTIQUES

Le dispositif de cet essai était un plan en bloc complet aléatoire avec cinq traitements, combinant ou non les EV d'automne (EVd) et la fertilisation en post-levée du maïs, le tout répété 3 fois (blocs), pour un total de 15 parcelles expérimentales. Les parcelles faisaient 6 m de large X 10 m de long (Figure 5).

Toutes les analyses statistiques du projet ont été effectuées avec le logiciel SAS, version 9.4. Une analyse de variance a été effectuée avec la procédure PROC MIXED de SAS (Littell et coll., 2006). Pour chacun des paramètres mesurés, les traitements ont été comparés à l'aide du test de T.

2.3 COLLECTE DE DONNÉES ET ANALYSES CHIMIQUES DE LABORATOIRE

Tous les échantillonnages de sol ont été effectués sur la strate 0-30 cm. La masse volumique apparente (MVA) du sol a été déterminée à chacun des échantillonnages afin de pouvoir convertir les concentrations (mg kg^{-1}) en charge à l'hectare (kg ha^{-1}). Le sol a été caractérisé dans chacun des réplicats (blocs) à la mi-août en 2018, juste avant les semis des EVd. Au printemps 2019, avant de semer le maïs, une caractérisation du sol a été à nouveau réalisée dans chacune des parcelles. Cette analyse comprenait le pH_{eau} dans un rapport sol/eau 1:1 (Conseil des productions végétales du Québec, 1988). Les contenus en carbone (C_{total}) et azote (N_{total}) totaux ont été mesurés par combustion au LECO. Le N minéral (N_{min}) sous forme de nitrate (N-NO_3) et d'ammonium (N-NH_4) a été extrait au KCl 2M a été extrait au KCl 2M (Isaac et Johnson, 1976) et déterminé par colorimétrie avec un auto-analyseur Technicon. Les éléments totaux P, K, Ca, Mg et Al ont été extraits dans une solution Mehlich-3 (Tran et Simard, 1993) et dosés à l'ICP optique.

À la fin de saison en 2018 (15 octobre), un échantillonnage de sol pour doser les contenus résiduels en nitrate (N-NO_3 au KCl 2M) dans chacune des parcelles a été effectué juste avant l'incorporation des EVd. Par la suite, une évaluation du recouvrement en EVd a été réalisée à l'aide d'un quadrat de 1 m^2 distribué aléatoirement dans chacune des parcelles. De plus, l'évaluation de la biomasse aérienne des EVd produite a été réalisée en pesant toute la biomasse récoltée à la suite de deux passages de mini-fourragère, sur toute la longueur de la parcelle, en excluant 1 m au début et à la fin de la parcelle. Un sous-échantillon a également été rapporté au laboratoire et séché à 65°C pendant 48 heures afin d'analyser sa teneur en humidité, ses contenus en C_{total} et N_{total} mesurés par combustion au LECO et les autres éléments totaux P, K, Ca, Mg et Na mesurés par digestion à l'acide nitrique ($\text{HNO}_3 - \text{H}_2\text{O}_2$). Ceci devait permettre d'estimer entre autres l'apport de N provenant des EVd pour la culture subséquente.

Pendant la saison 2019, le développement du maïs a été suivi à deux stades cibles, soit en post-levée (stade 7-8 feuilles; 2 juillet), juste avant l'application des fertilisants (lisier et Evfc) et au stade nutritionnel de l'apparition des soies (16 août). Au stade soies du maïs, une analyse du feuillage (feuille opposée à l'épi) comme indice nutritionnel a aussi été réalisée. À chacun de ces stades, le NO_3 a aussi été mesuré dans le sol. Lors de la récolte (24 octobre), les rendements (plants et grains) des deux rangs centraux sur $2 \times 4 \text{ m}$ linéaires ont été prélevés et pesés. Des sous-échantillons de la biomasse de grains et de plants des zones de rendements ont aussi été séchés à 65°C et acheminés au laboratoire pour doser leurs contenus totaux en N, P, K, Ca, Mg et ainsi connaître les prélèvements totaux en nutriments par la culture. Le NO_3 résiduel du sol a été dosé dans le sol à la récolte également. Enfin, des membranes d'échanges ioniques (MEI), un outil qui permet de simuler l'absorption du nitrate par les racines des plantes, ont été insérées dans le sol pendant 7 périodes consécutives du 16 mai au 22 août 2019 (Tableau 4). Ainsi, l'intensité des flux de N-NO_3 ($\mu\text{g cm}^{-2} \text{ période}^{-1}$) du sol en fonction des différents traitements a pu être comparée. Enfin des visites régulières ont été effectuées en saison pour évaluer la croissance de la culture et dépister les maladies et ravageurs.

Tableau 4. Périodes de pose-retrait des membranes d'échange ionique lors de la saison maïs-grains en 2019.

Pose MEI	Retrait MEI	Durée de la période (jours)
16 mai	30 mai	14
30 mai	13 juin	14
13 juin	2 juillet	19
2 juillet	11 juillet	9
11 juillet	25 juillet	14
25 juillet	8 août	14
8 août	22 août	14



Figure 1. Parcelle expérimentale de pois fourrager (gauche) et sans engrais vert (droite), le 20 septembre 2018.



Figure 2. Parcelle expérimentale de pois avec seigle, le 20 septembre 2018.



Figure 3. Épandage de la prairie « fauché-récolté » (EVfc), 2 juillet 2019.



Figure 4. Épandage du lisier de porc, 11 juillet 2019.

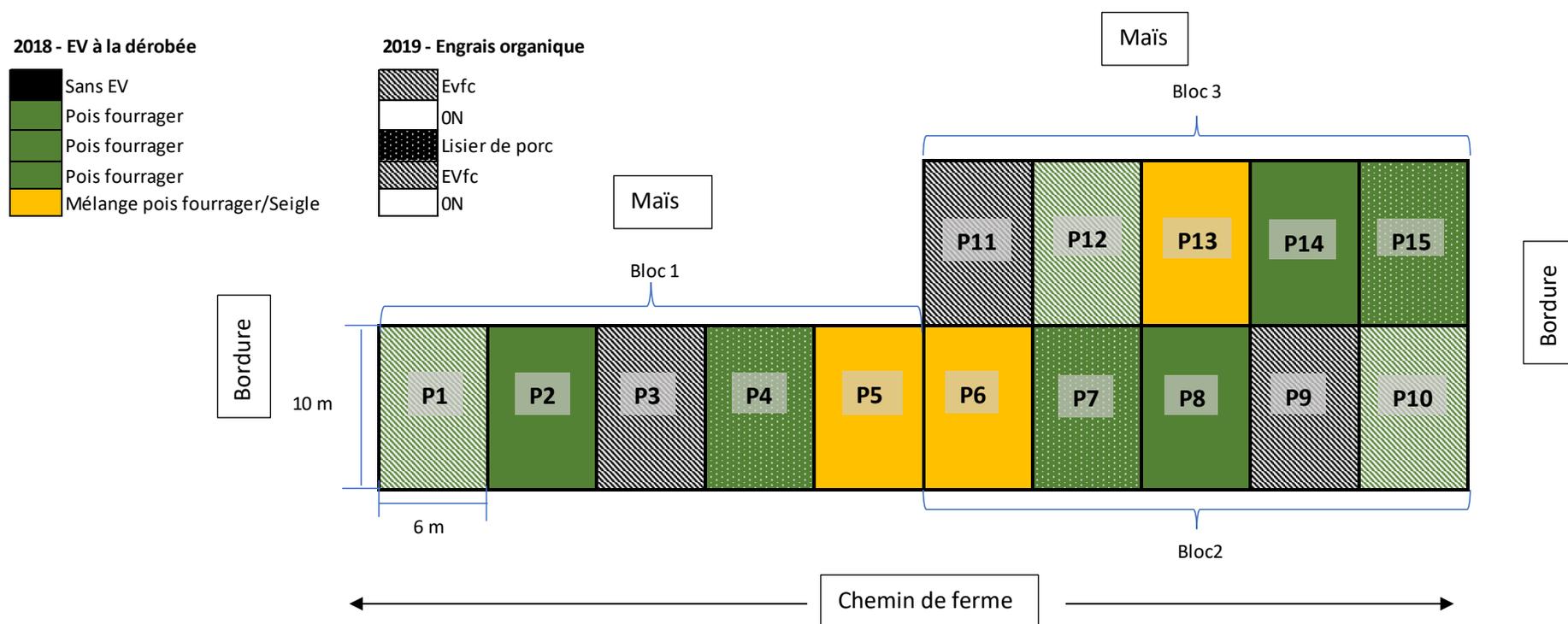


Figure 5. Dispositif expérimental à Saint-Lambert-de-Lauzon, saisons 2018 et 2019.

3 RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 CARACTÉRISATION DU SOL

Tout au long de l'expérience, le sol a présenté en moyenne un pH adéquat pour la croissance du maïs-grains, soit 5,9 (Tableau 5). Sur la base de l'analyse d'automne 2018, les contenus en phosphore (P) et potassium (K) étaient cependant sous la barre des recommandations pour le maïs-grains (CRAAQ 2010). En effet, avec un ISP moyen de 2,4 %, des apports de 80 kg P₂O₅ ha⁻¹ étaient recommandés alors qu'avec des contenus moyens en K_{mehlich-3} de 175 kg ha⁻¹ des apports de 60 kg K₂O ha⁻¹ étaient recommandés (tableau 4; CRAAQ 2010). Afin d'éviter des carences en PK, le 11 juillet 2019, soit au même moment que les apports de lisier de porc en post-émergence du maïs, de la poudre d'os (2-14-0) comme complément de P et du sulfate de K (0-0-51) comme complément de K ont été apportés. Ces produits sont acceptés en production biologique. Un coefficient d'efficacité (CE) de 70 % a été appliqué au contenu en P total de la poudre d'os, alors qu'un CE de 100 % a été appliqué au contenu total en K du sulfate de potassium. Toutes les parcelles du dispositif ont reçu la même dose de poudre d'os et de sulfate de K, soit 816 et 118 kg ha⁻¹, respectivement, sauf les parcelles recevant le lisier de porc. Pour ces dernières, l'efficacité du P du lisier a été évalué à 80 % et celle du K à 90 % (CRAAQ 2010), ainsi les apports de P et K par le lisier ont été soustraits aux besoins en poudre d'os et en sulfate de K. Ainsi seulement 408 kg ha⁻¹ de poudre d'os ont été apportés dans ces parcelles et aucun apport de sulfate de K n'a été nécessaire. Les apports en P et K de la coupe de prairie n'ont cependant pas été considérés puisque cette pratique n'est pas rependue au Québec, accordant au EV surtout une valeur en unité de N. Ainsi, il y a un manque d'informations au sujet des apports en P et K efficace des EV qui ne permet pas d'en tenir compte de façon sécuritaire pour la culture. Il a donc été jugé plus prudent de compléter totalement les besoins du maïs en P et K avec la poudre d'os et le sulfate de K dans les parcelles avec la coupe de prairie, tout comme dans les parcelles sans apport d'engrais organique en 2019. D'autant plus que l'élément testé est l'azote.

Tableau 5. Caractéristiques physico-chimiques du sol au site d'étude en 2018 et 2019.

Paramètres	Juillet 2018			μ	Printemps 2019					
	Bloc 1	Bloc 2	Bloc 3		Pois + ON	Pois + lisier	Pois + Evfc	Sans EV + Evfc	Pois/seigle + ON	μ
pH_{eau}	5,9	5,9	5,9	5,9	5,8	5,9	5,9	5,8	5,9	5,9
N-NO₃ (kg ha⁻¹ b.s.)	26	33	27	28,7	24	29	28	29	28	28
C_{tot} (%)	1,8	2,1	2,2	2,0	2,0	1,8	1,9	2,0	2,1	2,0
N_{tot} (%)	0,13	0,16	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,16	0,15
C/N	13,6	13,4	14,5	13,8	13,4	12,5	12,8	13,1	12,8	12,9
Texture	Loam									
Densité apparente (0-30 cm) (g cm³⁻¹)	1,14	1,15	1,09	1,13	1,21					
Éléments majeurs Mehlich-3 (kg ha⁻¹ b.s.)										
P	74	71	54	66	111	99	112	117	96	107
K	167	185	174	175	256	259	296	294	250	271
Ca	1902	1971	2003	1959	3038	3344	3205	3082	3339	3202
Mg	255	251	224	243	351	468	417	339	351	385
Al (mg kg⁻¹)	1182	1203	1338	1241	1299	1254	1247	1304	1334	1288
P_{M3}/Al_{M3} (%)	2,8	2,6	1,8	2,4	2,3	2,2	2,5	2,5	2,0	2,3

3.2 CARACTÉRISATION DES ENGRAIS ORGANIQUES

3.2.1 Engrais verts d'automne 2018

La production de biomasse par les engrais verts implantés le 14 août 2018 a été intéressante avec en moyenne 7,4 T ha⁻¹ de biomasse fraîche de pois fourrager et 8,7 T ha⁻¹ de biomasse fraîche produite avec le mélange pois fourrager-seigle (Tableau 6), ce qui est comparable à d'autres essais réalisés en Chaudière-Appalaches avec des EV semés le 15 août 2018 (Landry, com. pers. 2019). De plus la présence de M.H. était négligeable (données non montrées; voir Figures 1 et 2). Dans le présent essai, le mélange d'EV a donc produit près de 1 tonne de plus de biomasse que le pois fourrager semé seul. Ainsi, comme les contenus en N, P et K étaient très similaires entre le mélange de pois/seigle et le pois fourrager (Tableau 6), la plus grande biomasse produite par le mélange explique que ce dernier devrait permettre les apports les plus importants en N disponible (efficace) l'année suivante pour le maïs-grains avec 49 kg N_{eff.} ha⁻¹, contre en moyenne 38 kg N_{eff.} ha⁻¹ avec le pois fourrager seul. Il était d'ailleurs attendu que les EV d'automne fournissent en moyenne 50 kg N_{eff.} ha⁻¹. La caractérisation des EV montre ainsi que cette cible est atteinte avec le mélange pois-seigle, mais pas avec le pois fourrager qui a toutefois fourni seul 76 % de la quantité visée.

Tableau 6. Biomasse d'engrais verts produite, contenu en N-P-K et apport estimé de N pour la culture du maïs-grain, en fonction de chacun des engrais verts d'automne 2018.

Engrais vert 2018 + engrais à venir en 2019	Biomasse fraîche	Biomasse sèche	C/N	N (% b.s.)	P	K	N total	P total	K total	N disponible* (kg ha ⁻¹)
	(kg ha ⁻¹)				(g b.s. kg ⁻¹)		(kg ha ⁻¹)			
Pois (parcelle ON)	6896	845	9,2	4,7	4,6	29,0	39,7	3,9	24,5	35,7
Pois (parcelle EVfc)	7610	968	9,4	4,6	4,6	29,0	44,5	4,4	28,2	40,0
Pois (parcelle Lisier)	7645	919	9,3	4,6	4,6	28,6	42,6	4,2	26,3	38,3
Pois/Seigle (parcelle ON)	8720	1208	9,7	4,5	4,5	30,1	54,2	5,4	36,3	48,8

* Jobin et Douville (1996) dans Duval et coll. (2014)

3.2.2 Engrais organiques 2019

Comme les besoins en N de la culture sont estimés à 150 kg N_{eff.} ha⁻¹ et que les EVd ont fourni près de 50 kg N_{eff.} ha⁻¹, des compléments de N sous forme d'engrais organiques visés de 100 kg N_{eff.} ha⁻¹ ont été ajoutés à certains traitements. Ainsi, à la suite d'une caractérisation préalable, il a été nécessaire d'apporter 40 T ha⁻¹ de biomasse fraîche de prairie (EVfc) pour combler les besoins en N_{eff.} et 21 T ha⁻¹ de biomasse fraîche de lisier de porc. Au moment de l'épandage, de nouveaux échantillons de la biomasse de prairie coupée et de lisier de porc ont été analysés pour valider les apports réels en N, P et K. Sur la base de l'analyse au jour d'épandage (Tableau 7), les 40 T ha⁻¹ de prairies ont fourni 98 kg N_{eff.} ha⁻¹, contre 65 kg N_{eff.} ha⁻¹ avec le lisier de porc. Ce résultat est surprenant

et s'explique du fait que l'analyse préalable qui a servi à faire le calcul de la dose à épandre de lisier de porc montrait un contenu en N total de 6,29 kg T⁻¹ (Annexe). Toutefois, le lot utilisé au jour de l'épandage, a montré un contenu en N total de seulement 3,82 kg T⁻¹ à la suite de sa caractérisation. Cela s'est donc traduit par des apports en N de seulement 78 kg N_{total} ha⁻¹ et de 65 kg N_{eff.} ha⁻¹ au lieu de 100 kg N_{eff.} ha⁻¹ (Tableau 7). Dans le cas de la coupe de prairie, des contenus similaires entre l'analyse préalable et celle du lot réellement épandu ont été obtenus ce qui explique que 98 kg N_{eff.} ha⁻¹ ont bel et bien été apportés (Tableau 7). À noter qu'un CE du N de 70 % a été appliqué au contenu en N_{total} de la biomasse de la prairie au lieu d'un CE 60 % qui aurait dû être appliqué selon la méthode de Jobin et Douville (1996) pour des engrais verts avec un contenu en N de 3 %. Cette décision a été prise puisque la fauche de prairie résulte en de petits brins de 2 à 3 cm contrairement à l'engrais verts incorporé. Il a donc été estimé que la minéralisation pouvait être accélérée dans ces conditions et c'est pourquoi un CE légèrement supérieur a été utilisé. Par ailleurs, le ratio N_{eff.} / P de l'EVfc s'est avéré beaucoup plus élevé, de 42 %, par rapport à celui du lisier. Ceci signifie que la coupe de prairie apporte non seulement une quantité intéressante de N_{eff.}, mais qu'une bien plus grande quantité de N_{eff.} est apportée pour une même quantité de P. Ceci est une caractéristique très intéressante de l'engrais fauché-récolté pour limiter la hausse de la saturation des sols en P lors de la fertilisation de cultures plus exigeantes en N. Le ratio N_{eff.} / K est également 50 % plus élevé avec la coupe de prairie, comparativement au lisier (Tableau 7).

Tableau 7. Caractérisation des engrais organiques de 2019

Engrais 2019	Biomasse		C/N	N (%)	P	K	N total	P total	K total	N ¹² disponible* (kg/ha)	N _{eff.} / P	N _{eff.} / K
	(T b.h. ha ⁻¹)	(kg b.s./ha)										
Engrais verts fauché-récolté	40	4,6	14	3,0	3,4	29,4	135	16	135	98	6,1	0,7
Lisier de porc	21	0,6	2,4	13	0,7	2,2	78	15	46	65	4,3	1,4

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

²CRAAQ 2010

3.3 CHARGE DU SOL EN NITRATE

3.3.1 Automne 2018

À la fin de la saison 2018, juste avant le travail de sol et l'enfouissement des EV, les contenus du sol en N disponible (N-NO₃) étaient les plus élevés dans le traitement sans engrais vert (sol à nu). Les contenus en N-NO₃ retrouvés dans ce traitement étaient de 44 kg N-NO₃ ha⁻¹, soit 66 et 75 % plus élevés que les contenus retrouvés dans les parcelles avec du pois fourrager (en moyenne 15 kg N-NO₃ ha⁻¹) et celles avec le mélange de pois/seigle (11 kg N-NO₃ ha⁻¹), respectivement (Figure 6). Afin de conserver le sol à nu, le sol du traitement sans EVd a été travaillé 2 fois avec un sarcler pour limiter la croissance des mauvaises herbes, entre la mi-août à la mi-octobre. Ceci explique certainement pourquoi les contenus en N-NO₃ sont plus élevés dans ces parcelles. En effet, le travail de sol, en retournant et en aérant la terre, active la minéralisation de l'azote de la matière organique par les microorganismes et ce, davantage que dans le sol non travaillé. En contrepartie, la présence d'une culture de

couverture favorise la rétention du N-NO₃ dans la biomasse des plantes et ceci s'est davantage observé avec la présence d'une graminée (seigle), dans le mélange pois/seigle. Comme la graminée n'a pas la faculté de fixer l'azote atmosphérique comme les légumineuses (pois), elle prélève uniquement dans le sol le N-NO₃ nécessaire à sa croissance, ce qui peut expliquer la concentration légèrement moins élevée de nitrate résiduel dans ces parcelles contrairement à celles de pois fourrager. Ces résultats font ressortir l'avantage agronomique de mise en réserve du N dans les tissus d'EV mais aussi de diminution du risque de lessivage de nitrate en automne.

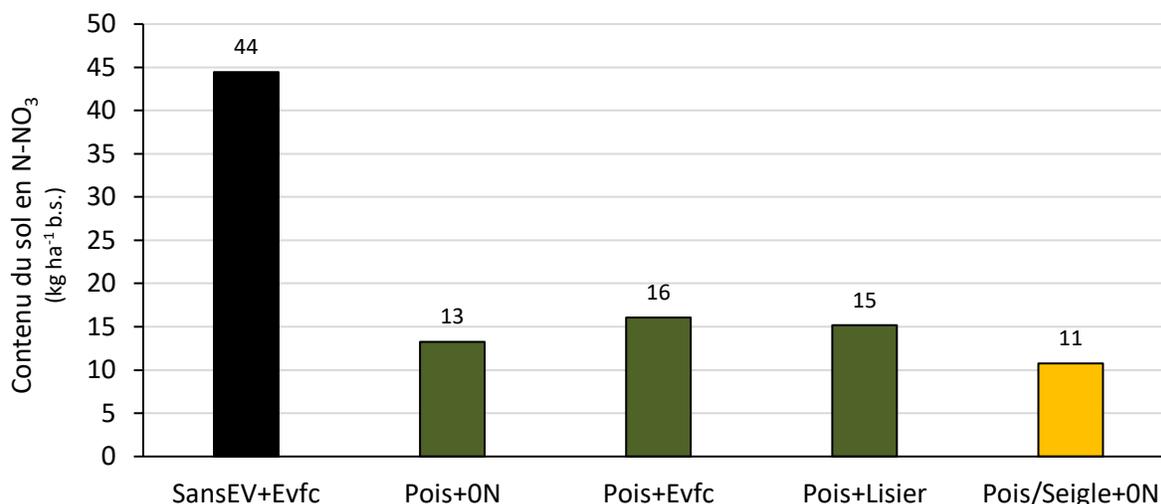


Figure 6. Contenu du sol en N-NO₃ résiduel juste avant l'enfouissement des engrais verts le 15 octobre 2018. *Aucune statistique*

3.3.2 Saison 2019

En 2019, le suivi *in situ* de l'intensité du N-NO₃ du sol à l'aide de membranes d'échange ionique (MEI) a débuté dès le ressuyage du sol au printemps, soit deux semaines (16 mai au 30 mai) avant les semis de maïs pour bien suivre la minéralisation du N-NO₃ provenant de l'incorporation des engrais verts d'automne. Il en ressort que les différents traitements de fertilisation d'automne (pois vs. pois/seigle vs. sol sans EV) n'ont pas donné de différence significative sur les flux de nitrate (Figure 7) ou les charges en N-NO₃ mesurées ponctuellement (Figure 8). Par la suite, du 2 juillet au 8 août, les données démontrent qu'il n'y a pas eu de gain pour hausser les teneurs de N disponible du sol à utiliser le lisier comme fertilisant à la place des engrais vert. Des différences sur les niveaux de N-NO₃ du sol se sont seulement dessinées vers la fin de la saison (Figure 7 : dernière période des MEI; 8 au 22 août : $P = 0,1066$ et Figure 8 : charge en N-NO₃ à la récolte : $P = 0,0272$). À ce moment, ce sont les traitements ayant reçu une fertilisation organique en 2019 qui présentaient les intensités en N-NO₃ les plus élevées, en comparaison des traitements ayant seulement reçu des engrais verts d'automne (EVd) (figure 7), et ces mêmes traitements présentaient également des charges résiduelles en N-NO₃ plus élevées à la récolte, en moyenne de 52 % (Figure 8). Ainsi, la disponibilité en nitrate est statistiquement similaire entre le sol fertilisé avec la coupe de prairie seule ou avec pois, en comparaison du lisier avec pois.

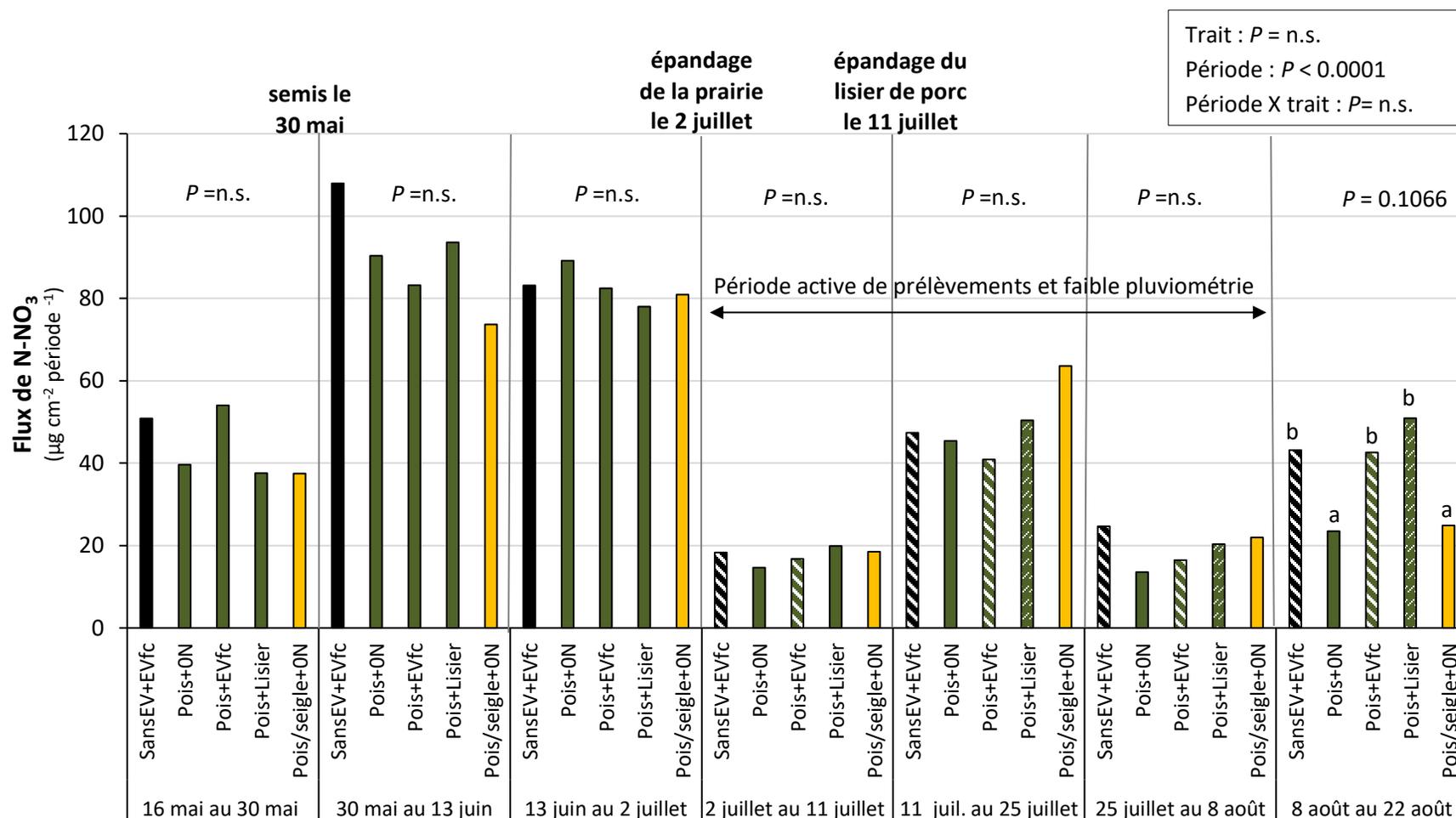


Figure 7. Flux de N-NO₃ en fonction des apports d'engrais verts d'automne 2018 et d'engrais organiques de 2019, pendant la saison de croissance du maïs-grains en 2019. À chacune des dates, lorsque l'effet est significatif à $P < 0,1$, les valeurs avec des lettres distinctes sont significativement différentes au seuil $P \leq 0,1$.

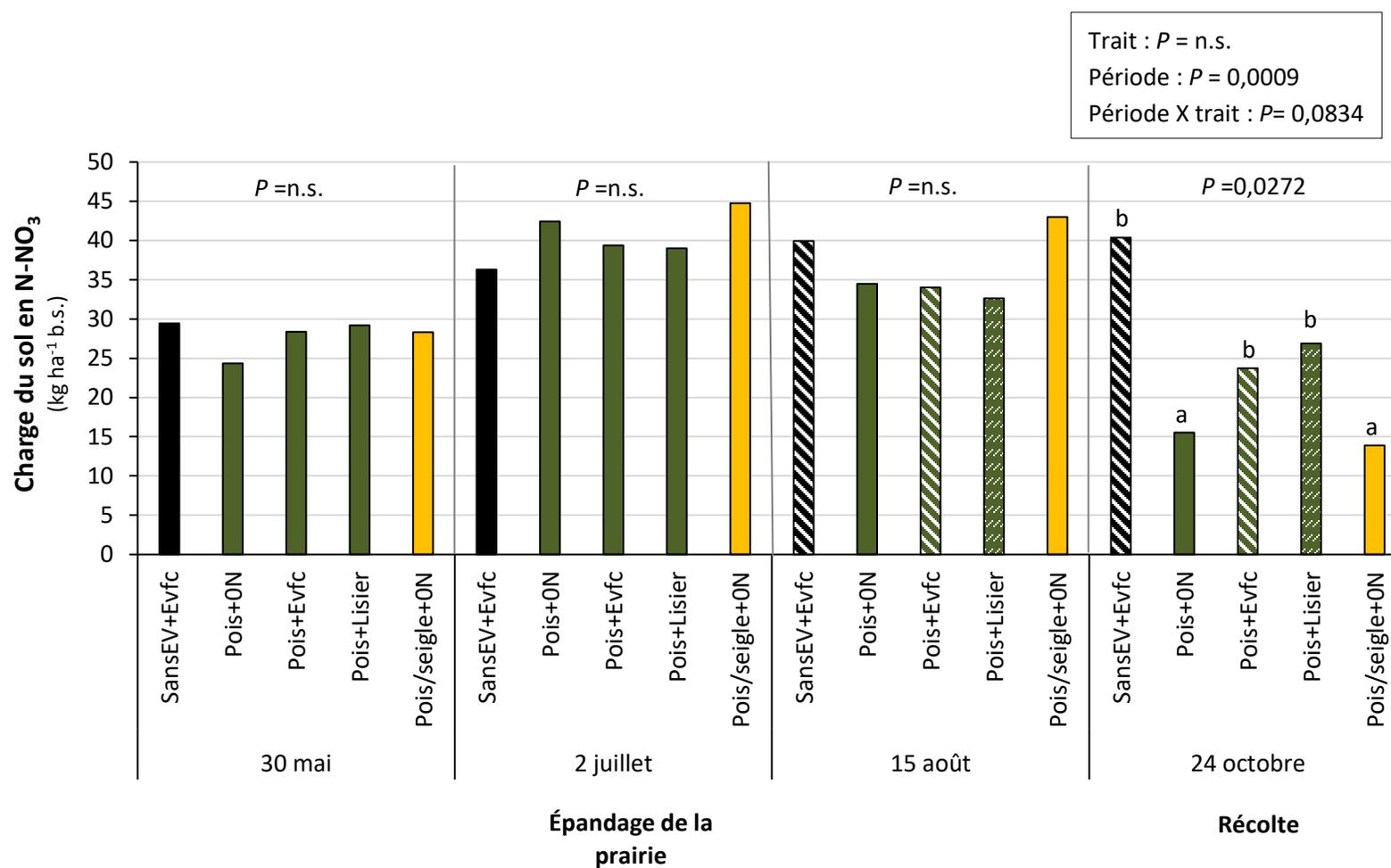


Figure 8. Charge du sol en N-NO₃ en fonction des apports d'engrais verts d'automne 2018 et d'engrais organiques en 2019 à différents moments pendant la croissance du maïs-grains en 2019. À chacune des dates, lorsque l'effet est significatif à $P < 0,1$, les valeurs avec des lettres distinctes sont significativement différentes au seuil $P \leq 0,1$.

3.4 CROISSANCE ET PRÉLÈVEMENTS EN NUTRIMENTS DU MAÏS-GRAINS

3.4.1 Croissance et rendements

Malgré l'absence d'effet sur les flux ou les contenus en N-NO₃ du sol au 2 juillet (Figures 7 et 8), juste avant l'épandage de la coupe de prairie, alors qu'aucune fertilisation n'avait encore eu lieu en 2019, les EVd de pois seul tendaient à produire une plus grande biomasse de plants, en comparaison des parcelles sans EV (Figure 9 : $P = 0,0551$), le mélange pois-seigle présentant quant à lui une meilleure biomasse statistiquement 30 % plus élevée que celles des parcelles témoins sans EV. Le mélange Pois/Seigle a donc davantage stimulé la croissance des plants, en comparaison du pois fourrager seul (Figure 9).

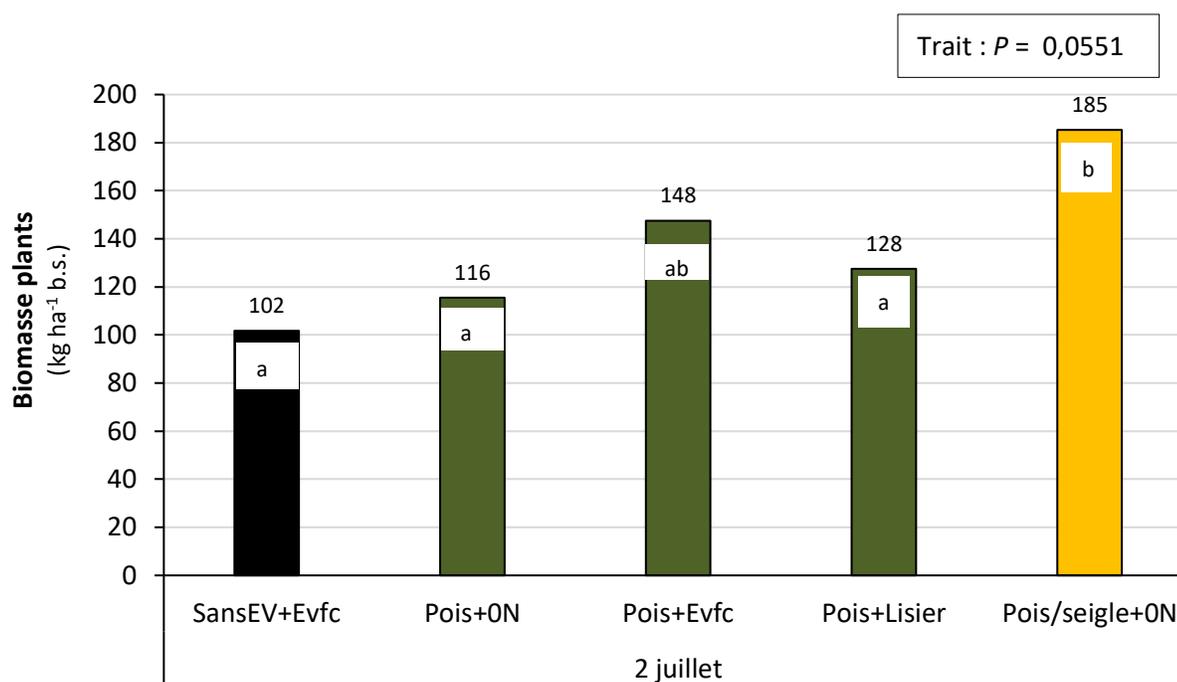


Figure 9. Biomasse aérienne des plants de maïs en fonction des apports d'engrais verts d'automne 2018 et d'engrais organiques, le 2 juillet 2019. À chacune des dates, lorsque l'effet est significatif à $P < 0,1$, les valeurs avec des lettres distinctes sont significativement différentes au seuil $P \leq 0,1$.

La situation s'est toutefois inversée après les apports d'engrais organiques en 2019. À la récolte du maïs, la biomasse des plants (excluant les grains) était la plus élevée avec le traitement sans EVd mais ayant reçu un complément de coupe de prairie en 2019 (Figure 10 ; plants : $P = 0,0654$), même si non différente de celle obtenue avec le traitement de pois/seigle et le traitement avec pois + lisier. Néanmoins, au global, la biomasse totale du maïs (plants + grains) est demeurée similaire avec tous les traitements (Figure 10; plants et grains : $P = 0,1417$), mais c'est tout de même le traitement avec pois sans fertilisation en 2019 qui a donné la biomasse totale la plus faible, de 17 % inférieure par rapport aux autres, même si l'effet n'est pas significatif au seuil ($P < 0,1$). En

considérant seulement la production de grains, celle-ci n'est également pas différente significativement entre tous les traitements (Figure 10) et elle a été en moyenne de 4635 kg ha⁻¹ b.s. (5452 kg ha⁻¹ à 15 % hum.). Il s'agit de rendements moyens pour le maïs-grains pour la région, soit 1 T de moins que la moyenne des rendements obtenus en Chaudière-Appalaches cette année-là (6,5 T ha⁻¹ à 15 % hum.) (ISQ 2019), tous types de régions confondues (bio ou conventionnelle). Au final, les différentes régions de fertilisation ont davantage influencé la production de feuillage que la production de grains. Même sans ajout d'engrais organique en 2019, les traitements avec EVd apportant seulement environ 50 kg N_{eff.} ha⁻¹ ont permis de produire autant de grains que les autres traitements qui apportaient 98 kg N_{eff.} ha⁻¹ (traitement Sans EV + EVfc), 103 kg N_{eff.} ha⁻¹ (traitement Pois + lisier) ou 138 kg N_{eff.} ha⁻¹ (traitement Pois + Evfc) (Tableaux 6 et 7). À noter que le traitement apportant le plus de N_{eff.} (Pois + Evfc) demeure malgré tout celui qui a produit le plus de grains (5030 kg ha⁻¹ b.s) même si cette différence ne s'est pas avérée significative statistiquement.

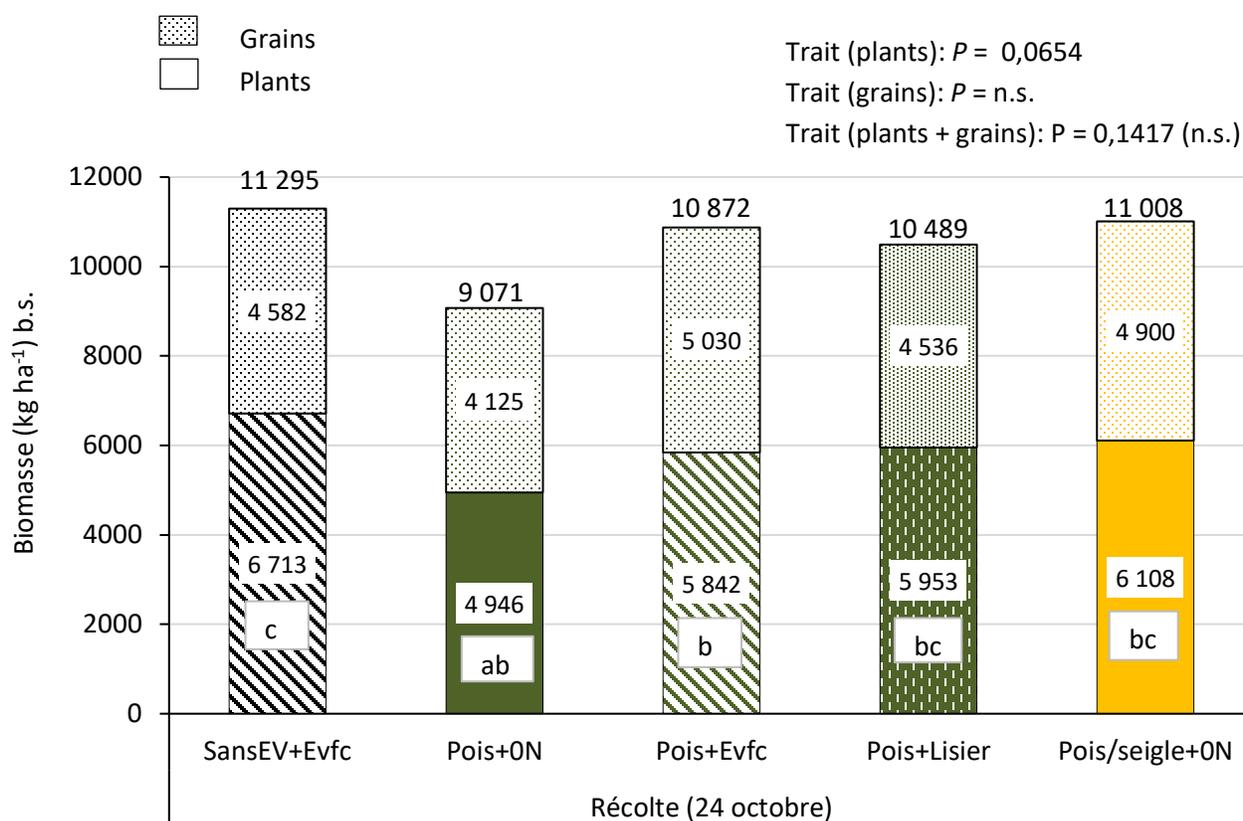


Figure 10. Biomasse aérienne des plants et biomasse des grains de maïs en fonction des apports d'engrais verts d'automne 2018 et d'engrais organiques en 2019 à la récolte du maïs-grains le 24 octobre 2019. Lorsque l'effet est significatif à $P < 0,1$, les valeurs avec des lettres distinctes sont significativement différentes au seuil $P \leq 0,1$.

3.4.2 Prélèvements en nutriments par la culture

La biomasse totale produite par les plants n'a pas différencié statistiquement, bien que le traitement avec pois fourrager et aucune fertilisation en 2019 ait produit 17 % moins de biomasse (Figure 10). Ainsi, seul ce dernier a significativement prélevé en moyenne 19 % moins de N pendant la saison en comparaison des autres traitements. Le traitement avec seulement un mélange de pois/seigle à l'automne, même s'il n'a reçu aucune fertilisation en 2019 a donné quant à lui des prélèvements totaux en N inférieurs seulement vis-à-vis du traitement sans engrais vert d'automne (EVd) mais avec une coupe de prairie en 2019, ce dernier étant le traitement avec les prélèvements en N les plus importants de l'essai, quoique non différents statistiquement de ceux des traitements Pois + Evfc et Pois + lisier (Figure 11). Il apparaît donc que des facteurs autres que la nutrition azotée semble avoir bénéficié à la croissance du maïs avec le traitement de pois/seigle et cela mériterait à être davantage exploré. De plus, comme le traitement de Pois/seigle apportait moins de N que les autres traitements (sauf celui de pois fourrager sans fertilisation en 2019), il a aussi laissé une moins grande quantité de N résiduel dans le sol à la récolte en comparaison des traitements qui ont reçu une fertilisation organique en 2019, ce qui est un avantage du point de vue environnemental (Figure 8). En effet le nitrate résiduel, très soluble, est susceptible de contaminer les eaux souterraines par lessivage. D'un point de vue expérimentale, la bonne performance du traitement pois/seigle pourrait aussi s'expliquer par des facteurs de sites puisque les parcelles de ce traitement ce sont aléatoirement retrouvées au centre de l'essai alors que pour les autres traitements, des réplicats étaient situés plus en bordure de champ (Figure 5) et donc même si cela ne ressort pas au niveau statistique, il est possible que cette disposition ait influencé la performance des autres traitements ou trop favorisé celle du traitement Pois/seigle. Des essais avec plus de répétitions pourraient venir éliminer ce biais possible et confirmer les résultats obtenus.

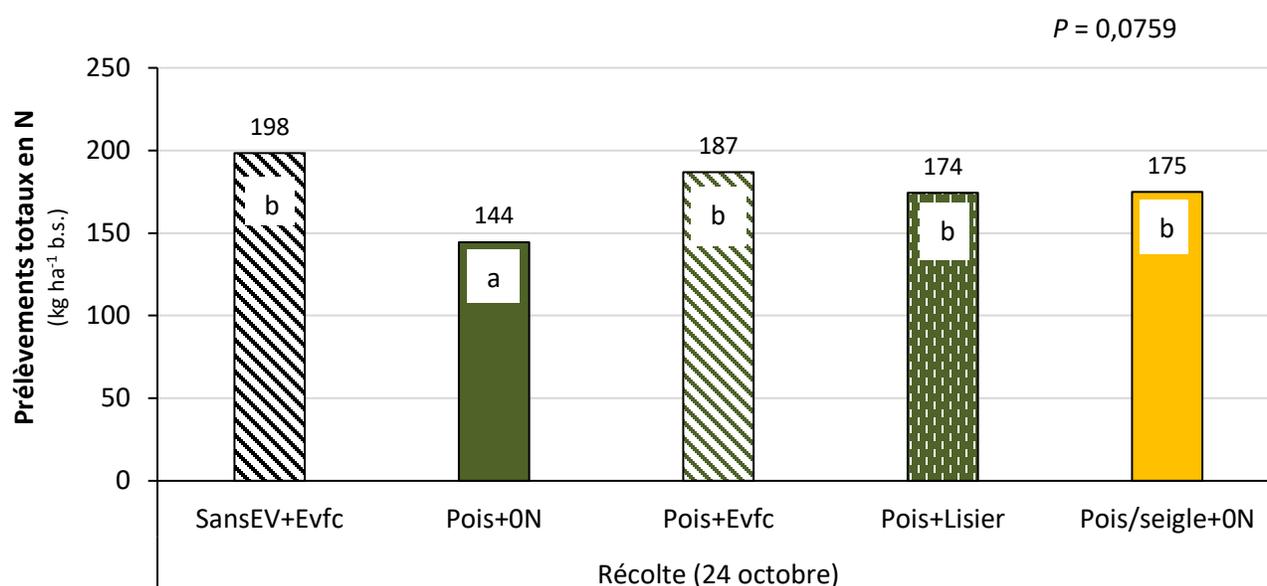


Figure 11. Prélèvements totaux en N (plants + grains) en fonction des engrais verts d'automne et des engrais organiques en 2019, à la récolte du maïs -grains le 24 octobre 2019. Lorsque l'effet est significatif à $P < 0,1$, les valeurs avec des lettres distinctes sont significativement différentes au seuil $P \leq 0,1$.

Enfin les prélèvements totaux en K quant à eux ont été significativement influencés par l'apport de la coupe de prairie en comparaison de tous les autres traitements. Des contenus élevés en K de 135 kg ha⁻¹ ont été mesurés dans la biomasse de prairie (Tableau 6) soit près de 2x plus que les apports de 46 kg K ha⁻¹ avec le lisier de porc, ce qui explique les différences observées sur les prélèvements par la culture. La biomasse de prairie s'avère donc une excellente source de K pour le maïs-grains. De plus, les prélèvements en K n'ont pas différencié statistiquement entre les traitements de Pois sans engrais en 2019, de pois+lisier ou du mélange pois/seigle. Ainsi, même si aucun apport de K sous forme de sulfate de K n'a été réalisé dans le traitement pois+lisier puisqu'il avait été estimé que le lisier allait fournir suffisamment de K, il semble en effet que les 55 kg de K₂O total ha⁻¹ apportés par le lisier (Tableau 7 : valeur en K total) ont été suffisants pour soutenir la croissance du maïs de la même manière que les traitements sans apports d'engrais organiques en 2019 mai qui ont reçu un complément de 60 kg K₂O total ha⁻¹ sous la forme de sulfate de K en 2019.

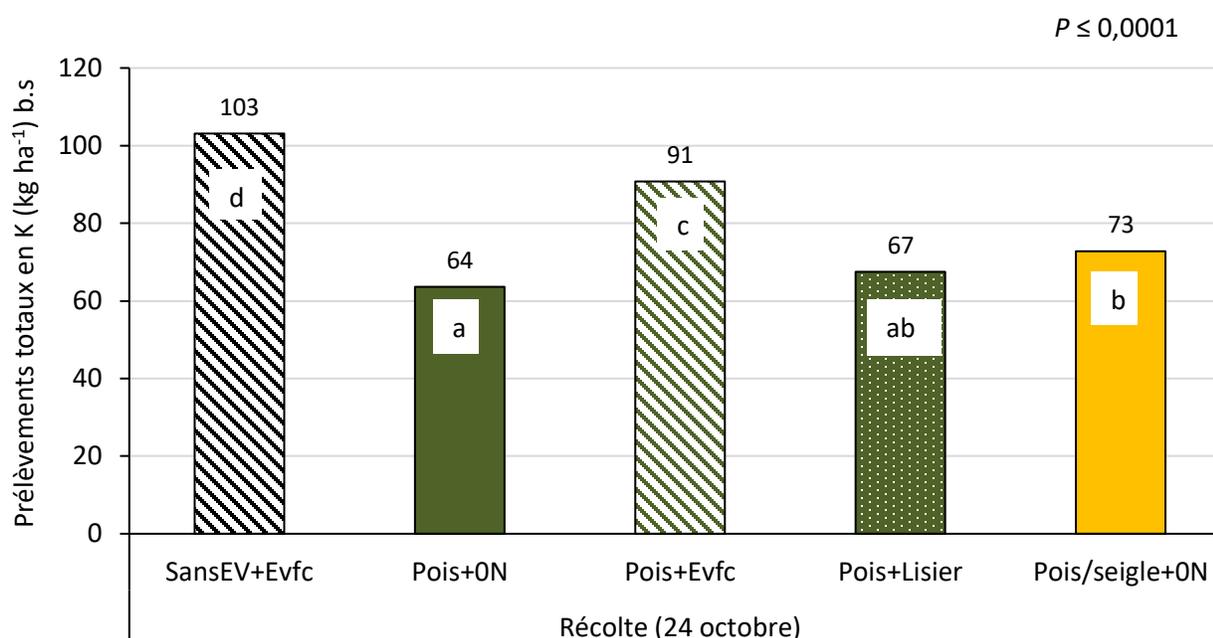


Figure 12. Prélèvements totaux en K (plants + grains) en fonction des engrais verts d'automne et des engrais organiques en 2019, à la récolte du maïs -grains le 24 octobre 2019. Lorsque l'effet est significatif à $P < 0,1$, les valeurs avec des lettres distinctes sont significativement différentes au seuil $P \leq 0,1$.

3.5 ÉVALUATION DES COÛTS DES RÉGIES

Une analyse de coûts-bénéfices (marge de production) a été réalisée en fin de projet. Les coûts des régies (intrants, machinerie et main d'œuvre) et les revenus (rendements) avec chacun des traitements ont été rapportés à l'hectare et comparés afin de calculer la marge de production. L'analyse constitue toutefois un estimé, considérant que les coûts associés à une régie apportant un Evfc doivent encore être étudiés. De plus, le coût des intrants

« lisier de porc » et « Prairie » n'a pas été pris en compte dans l'évaluation économique. En effet, contrairement aux semences d'EV qui doivent être achetées en supplémentaire, les déjections animales ressortent plutôt comme des ententes entre les fournisseurs et receveurs que d'un achat. Ils peuvent aussi provenir directement de la ferme. Il en va de même pour la prairie, qui, dans un principe de valorisation de la coupe de prairie, proviendrait de champs en rotation du producteur ou d'une entente, sans toutefois exiger un déboursé. Enfin, les bénéfices d'ordre environnementaux et agronomiques associés à l'intégration de champs en prairie dans la rotation du producteur comme source d'intrant azoté (retour de matière organique, bris du cycle des maladies, amélioration de la structure et de la résilience du sol aux changements climatiques etc.) n'ont pas été pris en compte dans cette évaluation économique sommaire. De nombreux gains associés à la plus-value des sols en santé devraient toutefois être considérés et permettrait d'atténuer voir réduire les coûts supplémentaires associés aux opérations d'utilisation de la coupe de prairie fauché-récolté en comparaison des autres régies. Car effectivement, les traitements qui incluaient une fauche de prairie ont occasionné la moins bonne marge de production même si elle n'était en moyenne que 14 % moins élevée que le traitement ayant permis la meilleure marge, soit le pois/seigle. En effet, la bonne performance du traitement pois/seigle autant d'un point de vue de la croissance du maïs, s'est répercuté sur la marge de production qui était la plus élevée suivi de près par le traitement avec le pois+lisier (tableau 8).

Tableau 8. Analyse coût-bénéfices en fonction des différentes régies de fertilisation organique du maïs-grains biologique en 2018 et 2019.

Coûts d'opérations	Pois fourrager + ON	Pois fourrager + lisier de porc	Pois fourrager + Evfc	Sans EV + Evfc	Mélange pois fourrager /seigle + ON
Intrants (\$)/ha					
Engrais verts d'automne (EVD)¹	154.98	154.98	154.98	0	183.78
Machinerie et main-d'œuvre² (\$/ha)					
Semis des EVD	21.80	21.80	21.80	0	40.94
Fauche des EVD	40.69	40.69	40.69	0	40.69
Labour et incorporation des EVD	104.86	104.86	104.86	104.86	104.86
Récolte de la coupe de prairie fauchée-récoltée (Evfc)	0	0	240.82	240.82	0
Épandage (lisier ou Evfc)³	0	66.15	415.93	415.93	0
Coût dépenses (\$/ha)	322.33	388.48	979.08	761.61	370.27
Rendements maïs-grain (T/ha) à 15 % hum.	4.9	5.3	5.9	5.4	5.8
Prix moyen pondérés maïs-grain bio⁴ (\$/T)	501	501	501	501	501
Total des produits (\$/ha)	2455	2655	2956	2705	2906
Analyse coûts-bénéfices (marge de production) (\$/ha)	2133	2267	1977	1943	2536

¹ Coûts des engrais verts basés sur l'AGDEX 537/821b – Engrais verts semés à la dérobée et en intercalaire - coûts d'implantation. 2016.

² Coûts des opérations basés sur l'AGDEX 740/825 – Machinerie – Coûts d'utilisation et taux à forfait suggérés. 2018

³ Densité des engrais verts fauché-récoltés estimée la même que celle d'un fumier 630 kg/m³ (AGDEX 980) et celle du lisier à 1000 kg/m³

⁴ <http://www.pgq.ca/articles/services-dinformation-sur-les-marches/autres/grains-biologiques/evolution-du-prix-des-grains-biologiques-marche-local/evolution-du-prix-du-mais-grain-biologique>

CONCLUSION

Ce court projet (automne 2018 à automne 2019), a permis de tester l'implantation d'engrais verts d'automne ainsi que les apports d'une coupe de prairie fauché-récolté comme fertilisant azoté pour le maïs-grains, en comparaison du lisier de porc, ce dernier étant plus à risque de hausser la saturation des sols en P en production biologique. En absence de tout autre forme de fertilisation azoté dans un sol en transition biologique, de premiers résultats sur la vitesse de minéralisation de la coupe de prairie l'année de son apport/incorporation ont été possibles et ont permis de constater qu'elles sont comparables au lisier de porc épandu 1 semaine après la prairie. *A posteriori*, il a toutefois été constaté que le lisier de porc a apporté 34 % moins de N_{eff} que la prairie car le lot épandu s'est avéré moins riche en N que prévu. La coupe de prairie a toutefois permis de maintenir des teneurs en N disponible du sol sur la saison et d'atteindre des rendements à la récolte comparables à l'application du lisier de porc. L'efficacité fertilisante en N de la coupe de prairie apparaît donc concluante surtout que les prélèvements totaux en N par la culture ont été les plus élevés avec les traitements recevant une coupe de prairie. Ce résultat est très intéressant si l'on considère que l'inclusion de prairies dans la rotation de producteurs sans élevage pourrait également contribuer à l'amélioration de la santé globale de leur sol, en plus d'être une source efficace d'intrant N pour les cultures exigeantes comme le maïs-grains. La coupe de prairie s'est également illustrée comme une source non négligeable de K pour le maïs-grains. Les prélèvements totaux en K par le maïs étaient 30 % plus importants avec la coupe de prairie, en comparaison des autres traitements qui n'en recevaient pas. Il faut également souligner la bonne performance du mélange d'engrais vert de pois/seigle incorporé à l'automne qui dans cet essai a permis la production d'une biomasse totale (plants + grains) comparable aux traitements qui combinaient un apport de pois fourrager à l'automne et une fertilisation organique en 2019. Des bénéfices, autres que la nutrition azotée, semblent liés à l'ajout de seigle dans le mélange d'engrais vert à la dérobé, ce qui mériterait à être davantage exploré, surtout que ce traitement a permis de concrètement diminuer les charges de N résiduel l'automne suivant après la récolte du maïs, en comparaison des traitements qui ont reçu une fertilisation organique pendant la saison de croissance du maïs. Enfin, ce traitement a également permis la marge de production la plus élevée de l'essai, suivi de près par le traitement de pois +lisier. Comparativement à ces derniers, les traitements avec coupe de prairie ont donné une marge 14 % inférieure, mais il faut considérer que le calcul de cette marge ne prenait pas en compte les bénéfices liés à l'inclusion de prairies dans la rotation des producteurs sur la santé globale de leurs sols et les hausses de rendements de toute la rotation qui pourraient en découler à plus long terme.

RÉFÉRENCES

Aulakh, M.S., Doran, J.W., Walters, D.T., Mosier, A.R. et Francis, D.D. 1991. Crop residue type and placement effects on denitrification and mineralization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55: 1020-1025.

Beaudet, P., Grenier, M., Giroux, M. et Girard, V. 2003. Description statistique des propriétés chimiques des sols minéraux du Québec. MAPAQ et IRDA, Québec. 112 p.

Conseil des Productions Végétales du Québec (CPVQ). 1988. Méthodes d'analyse des sols, des fumiers et des tissus végétaux. Méthode PH-1. Détermination du pH à l'eau. Agdex 533. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation. Québec, QC.

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

Desperrier Roux, J. 2014. Fertilisation post-levée du maïs avec de la matière végétale fraîche : une alternative au fumier. Présentation faite le 2 décembre 2014 au Journées Horticoles de Saint-Rémi.

Duval, J., Weill, A., et N'Dayegamiye, A. 2014. Contribution en azote en provenance des engrais verts de légumineuses. CETAB. 6 p.

Frund, D. 2015. Potentiel d'utilisation de coupes d'herbe de prairie temporaire pour la fumure en système de grandes cultures biologiques sans bétail. Mémoire de Diplôme réalisé dans le cadre de la formation en écologie et sciences de l'environnement ECOFOC. Suisse. 55 p.

Gélinas, B. 2016. Du trèfle en grandes cultures : pourquoi s'en passer? <https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Regions/centreduquebec/INPACQInfolettre/productionsvegetales/Pages/Du-trefleengrandesculturespourquoisenpasser.aspx>

Institut de la statistique du Québec (ISQ). 2016. Profil sectoriel de l'industrie horticole au Québec Édition 2016. [En ligne] <http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/agriculture/profil-industrie-horticole.html> (consultée en février2019).

Institut de la statistique du Québec (ISQ). 2019. <http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/agriculture/profil-industrie-horticole.html> (consultée en février2019).

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

Janzen, H.H. et Schaalje, G.B. 1992. Barley response to nitrogen and non-nutritional benefits of legume green manure. *Plant Soil*. 142: 19-30.

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

Landry, C., Marchand-Roy, M. et Mainguy, J. 2017. Grains bio : fertiliser sans saturer. Présentation faite le 7 décembre 2017 aux Journées Horticoles de Saint-Rémi.

Li, H., Parent, L. E., Tremblay, C., et Karam, A. 1999. Potato response to crop sequence and nitrogen fertilization following sod breakup in a Gleyed Humo-Ferric Podzol. *Can. J. Plant Sci.* 79(3):439-446. doi:10.4141/P98-042.

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

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

Reeves, D.W. 1994. Cover crops and rotations. In: Crops Residue Management, Advances in Soil Science. J.L. Hatfield and B.A. Stewart (Eds.). Boca Raton, FL. 125-172.

Roy, J. 2016. Opportunité et défis : Grande culture Bio. Présentation faite le 8 mars 2016. https://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Regions/SaguenayLacStJean/PresentationJonathanRoy_Lac-St-Jean_Gr-cultures2016.pdf

Sullivan, M.D. et Andrews, N.D. 2012. Estimating plant available nitrogen release from cover crops. Oregon State University. <https://catalog.extension.oregonstate.edu/sites/catalog/files/project/pdf/pnw636.pdf>.

Tonitto, C., David, M.B. et Drinkwater, L.E. 2006. Replacing bare fallows with cover crops in fertilizer-intensive cropping systems: A meta-analysis of crop yield and N dynamics. *Agr. Ecosyst. Environ.* 112: 58-72.

Tran, T.S. et R.R. Simard. 1993. Mehlich III-extractable elements. p. 43-49. In M.R. Carter (ed.) Soil sampling and methods of analysis. Canadian Society of Soil Science, Lewis Publ., CRC Press, Boca Ration, FL.

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

-

ANNEXE

Nom du receveur:	IRDA
No. d'intervenant MDDEP:	0

Nom du fournisseur:	Gestion Lido inc.	
Adresse	132, rue Léon-Vachon Saint-Lambert-de-Lauzon G0S2W0	Téléphone: 418-889-9335 Responsable: Donald Lefebvre
No. d'intervenant MDDEP:	#	

Engrais organique	Volume disponible (m ³)	Disponibilité	Valeur Fertilisant (kg/t)				C/N	Densité t/m ³	Source
			N	N-NH4	P ₂ O ₅	K ₂ O			
Lisier engraissement site Landry (E120)			6,29	4,04	2,43	4,17	3,98	1,000	Caractérisation

Figure 13. Analyse du lisier de porc pour calcul d'apport avant épandage (source : Carl Paquet agr.)

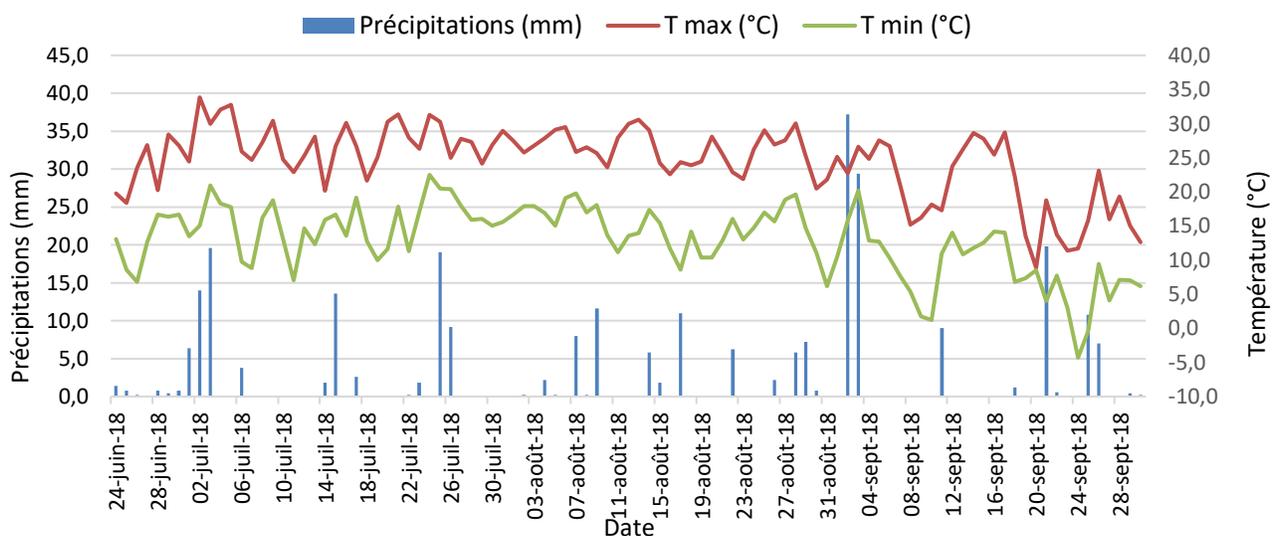


Figure 14. Conditions météorologiques journalières au site d'étude. Les précipitations sont issues du pluviomètre en place au site et les températures maximales et minimales sont issues de la station météorologique St-Bernard (Chaudière-Appalaches), à proximité du site, saison 2018.

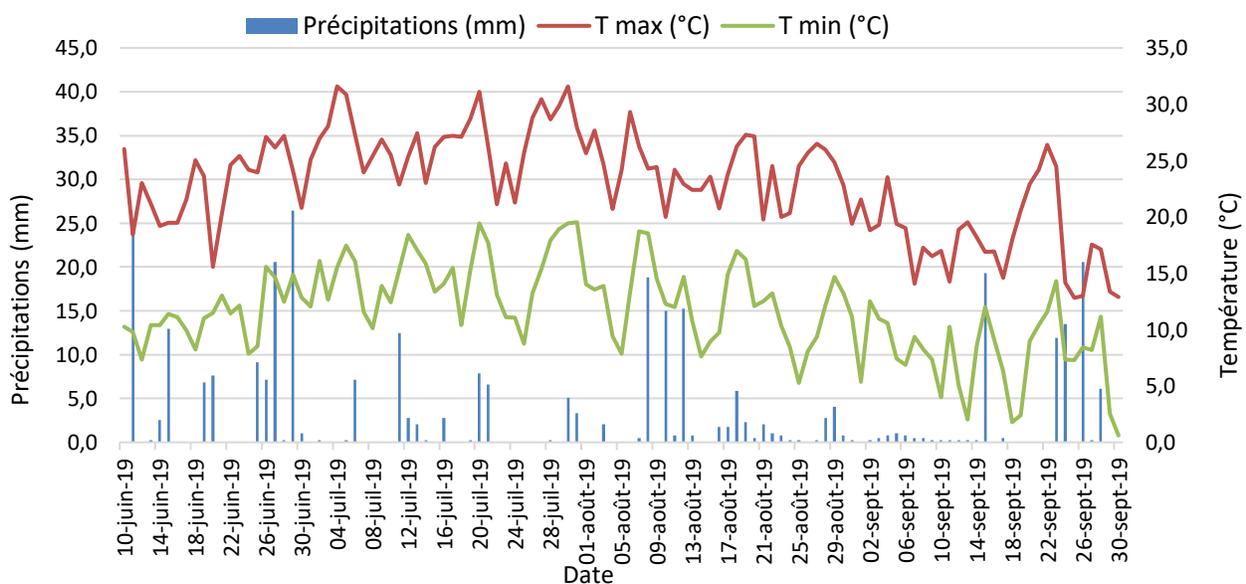


Figure 15. Conditions météorologiques journalières au site d'étude. Les précipitations sont issues du pluviomètre en place au site et les températures maximales et minimales sont issues de la station météorologique St-Bernard (Chaudière-Appalaches), à proximité du site, saison 2019.